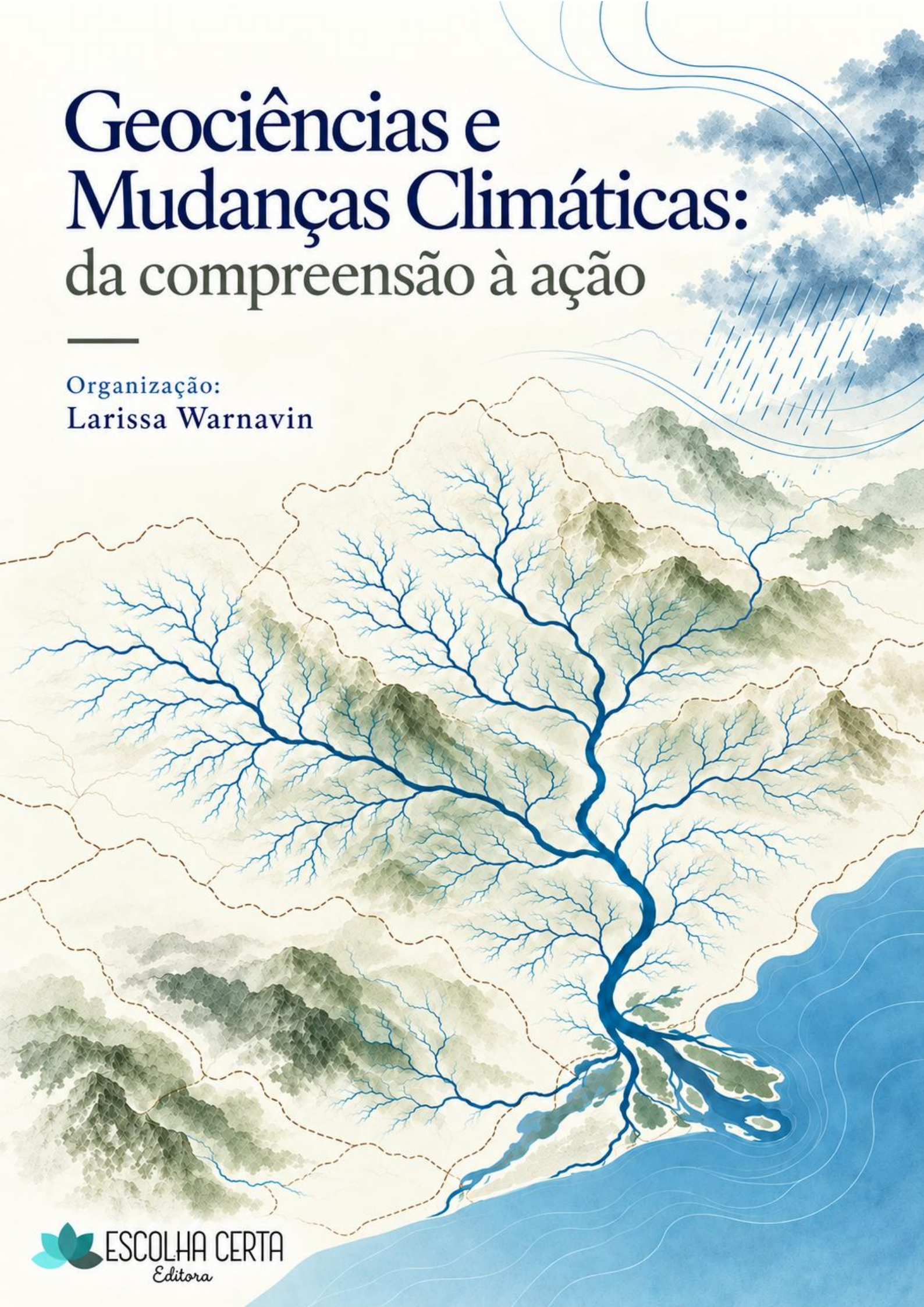
Geociências e Mudanças Climáticas: da compreensão à ação

Organização:
Larissa Warnavin



ESCOLHA CERTA
Editora

GEOCIÊNCIAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

ESCOLHA CERTA
Editora

GEOCIÊNCIAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS:
DA COMPREENSÃO À AÇÃO

Larissa Warnavin

(Organizadora)

ESCOLHA CERTA
Editora
Curitiba-2026

REVISÃO DE TEXTO E EDITORAÇÃO ELETRÔNICA

Larissa Warnavin e Renata Burgo Fedato

DIAGRAMAÇÃO

Larissa Warnavin e Renata Burgo Fedato

CAPA

Larissa Warnavin e Anderson Roberto Benedetti

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Geociências e mudanças climáticas [livro eletrônico] : da compreensão à ação / Larissa Warnavin (organizadora). -- Curitiba, PR : Escolha Certa Editora, 2026.
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-85446-40-2

1. Ciências da terra 2. Climatologia 3. Geociências 4. Monitoramento ambiental 5. Mudanças climáticas I. Warnavin, Larissa.

26-410754.0 CDD-551.69

Índices para catálogo sistemático:

1. Climatologia : Aspectos ambientais : Ciências da terra 551.69

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

D.O.I 10.5281/zenodo.24198594

Notas de transparência Editorial:

Esta obra integra a produção acadêmica do Grupo de Pesquisa "***EaD, presencial e o híbrido: vários cenários de docência, de currículo, de aprendizagem e políticas públicas***", constituído em 2018, registrado no Diretório dos Grupos de Pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sob a liderança da Prof.ª Dr.ª Dinamara Pereira Machado. O grupo dedica-se à investigação das modalidades educacionais e de suas relações com a docência, o currículo, as tecnologias, a avaliação, as políticas públicas e a formação profissional.

Ferramentas de Inteligência Artificial foram utilizadas como recursos de apoio à organização textual, à revisão linguística e à diagramação. Todas as contribuições geradas pelas ferramentas foram analisadas criticamente, revisadas e validadas pelos autores e organizadores, que assumem integral responsabilidade pelo conteúdo final apresentado aos leitores.

Todos os autores e organizadores formalizaram sua concordância com esta publicação por meio de declarações arquivadas no sistema.

Licença **Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional**
A licença Creative Commons permite a redistribuição e reutilização de uma obra licenciada, desde que o criador seja devidamente creditado.

Para

Àqueles que estudam a Terra, protegem a vida e transformam conhecimento em ação.

Às comunidades que já vivem os efeitos das mudanças climáticas e às gerações que virão, que essa obra possa contribuir para que encontrem caminhos mais justos, resilientes e sustentáveis.

“A existência da vida em nosso planeta deve-se, primariamente, às características da atmosfera terrestre.”

Lucí Hidalgo Nunes

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO **8**

SEÇÃO I - CLIMA, TERRA E SISTEMAS SOCIOECOLÓGICOS

MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO TEMPO GEOLÓGICO: CICLOS, REGISTROS E RECONSTRUÇÕES **10**

Rodrigo Aguilar
Gabriela Velásquez

FUNDAMENTOS CLIMÁTICOS E DINÂMICA ATMOSFÉRICA: VARIABILIDADE, MUDANÇAS E INTERAÇÕES **38**

Pedro Augusto Breda Fontão
Vera Cristina Scheller dos Santos Rocha
Luana Rudy

PEDOLOGIA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: GÊNESE, DEGRADAÇÃO E IMPACTOS ECONÔMICOS NA AGRICULTURA BRASILEIRA **67**

Anderson Roberto Benedetti
Paloma Estefane Santana Ferreira
Thalia Alves Ferreira

SINERGIA DE CRISES: IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BIODIVERSIDADE DA MATA ATLÂNTICA FRAGMENTADA **100**

Liliani Marilia Tiepolo
Isabela de Sá Leal

SEÇÃO II - CLIMA, TERRITÓRIO E EXTREMOS

CLIMATOLOGIA URBANA E ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS: REVISÃO E APLICAÇÕES NO CONTEXTO BRASILEIRO **120**

Martina Victoria Klein
Wilson Flavio Feltrim Roseghini
Francisco Jablinski Castelhano

INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DOS PADILHAS (CURITIBA/PR): ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE 2009–2022 ..... **156**

Franciele Marilies Estevam
Vera Cristina Scheller dos Santos Rocha
Otacílio Lopes de Souza Paz
Janderson Ferreira Muniz
Karina Scheffer Cordeiro e Silva
Alexandre Germano Marciano
Renata Adriana Garbossa Silva

O IMPACTO DAS SECAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO PARANÁ **178**

Lucas Tamanini Camargo
Guilherme Gonzatto
Wilson Flavio Feltrim Roseghini

SEÇÃO III - CLIMA, SAÚDE E VIDA

CLIMA, TERRITÓRIO E ENFERMIDADES: UMA ANÁLISE DA GEOGRAFIA DA SAÚDE SOB A ÓTICA DO COMPLEXO PATOGÊNICO E DA SAÚDE ÚNICA **201**

Thiago Kich Fogaça
Wilson Flavio Feltrim Roseghini

SAÚDE ANIMAL E HUMANA EM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS: DESAFIOS E PERSPECTIVAS 222

Larissa Kaniak Ikeda Rodrigues
Fernanda Loffler Niemeyer Attademo
Maria Luiza Rech Capuci
Nicole Geraldine de Paula Marques Witt

DOENÇAS INFECCIOSAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS 249

Nicole Geraldine de Paula Marques Witt
Adriane Suzin
Joyce Cândida Thomé Pereira
Andréia Monique Lermen
Aline Gomes de Lira Furlaneto
Vera Lucia Pereira dos Santos
Larissa Warnavin

QUALIDADE DO AR, ILHAS DE CALOR URBANO E MORBIMORTALIDADE 294

Mariana Andreotti Dias
Francisco Jablinski Castelhano

SEÇÃO IV - CONHECIMENTO, TECNOLOGIA E AÇÃO CLIMÁTICA

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO MONITORAMENTO AMBIENTAL NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS 321

Larissa Warnavin
Franciele Marilies Estevam
Nayana Machado
Mauriele Felix da Silva

MITIGAÇÃO, ADAPTAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO GEOSSISTÊMICA: JUSTIÇA CLIMÁTICA, SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA E O PLANEJAMENTO ADAPTATIVO 368

Larissa Warnavin
Renata Adriana Garbossa Silva
Nayana Machado
Anne Zugman

EDUCAÇÃO CLIMÁTICA E FORMAÇÃO CIDADÃ 417

Maria Eneida Fantin
Carolina Datria Schulz
Allyson Felipe da Silva
Cristiane Dall' Agnol da Silva Benvenutti

CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA NA ESCOLA: APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E PROTAGONISMO ESTUDANTIL DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS 447

Stella Maris Benitez
Maria Eneida Fantin
Mariana Andreotti Dias
Vera Cristina Scheller dos Santos Rocha
Franciele Marilies Estevam

COLABORAÇÃO CIENTÍFICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL: UMA PESQUISA EXPLORATÓRIA A PARTIR DO CATÁLOGO OPENALEX 471

André Francisco Matsuno da Frota
Lucas Fabrin Schneider
Tatiana de Souza Mendonça Mischek
Yuri Rezende dos Santos
Tiele Rodrigues dos Santos

APRESENTAÇÃO

As transformações do clima acompanham a história da Terra e participam da configuração de suas paisagens, ecossistemas e formas de vida. Ao longo do tempo geológico, variações da composição atmosférica, da dinâmica tectônica, da circulação oceânica e dos parâmetros orbitais produziram mudanças de diferentes magnitudes e durações. Na atualidade, contudo, a intensificação das mudanças globais do clima, impulsionadas predominantemente pelas atividades humanas, confere nova urgência à compreensão das relações entre os processos naturais e a organização das sociedades.

É nesse contexto que se insere a obra *Geociências e Mudanças Climáticas: da compreensão à ação*. Reunindo dezesseis capítulos, a obra propõe uma abordagem interdisciplinar das mudanças climáticas, articulando fundamentos das geociências, estudos ambientais, saúde, tecnologias de monitoramento, planejamento territorial e educação. Seu propósito é contribuir para uma leitura crítica da crise climática, que reconheça tanto a complexidade do sistema terrestre quanto a distribuição desigual de seus impactos sobre populações e territórios.

O percurso tem início com a perspectiva do tempo geológico, examinando os registros e mecanismos das transformações climáticas pretéritas, e avança para os fundamentos da climatologia e da dinâmica atmosférica. A partir dessa base, as relações entre solos, mudanças climáticas e produção agrícola são discutidas em diálogo com os desafios da conservação da biodiversidade. Esses estudos evidenciam que a compreensão das mudanças ambientais exige considerar processos físicos, biogeoquímicos e ecológicos de maneira integrada.

Na escala dos territórios ocupados, os capítulos dedicados à climatologia urbana, às zonas climáticas locais e às inundações demonstram a importância da análise espacial para identificar desigualdades ambientais e subsidiar estratégias de prevenção. A discussão sobre os efeitos das secas na geração hidrelétrica amplia

essa perspectiva ao abordar a relação entre variabilidade climática, recursos hídricos e segurança energética.

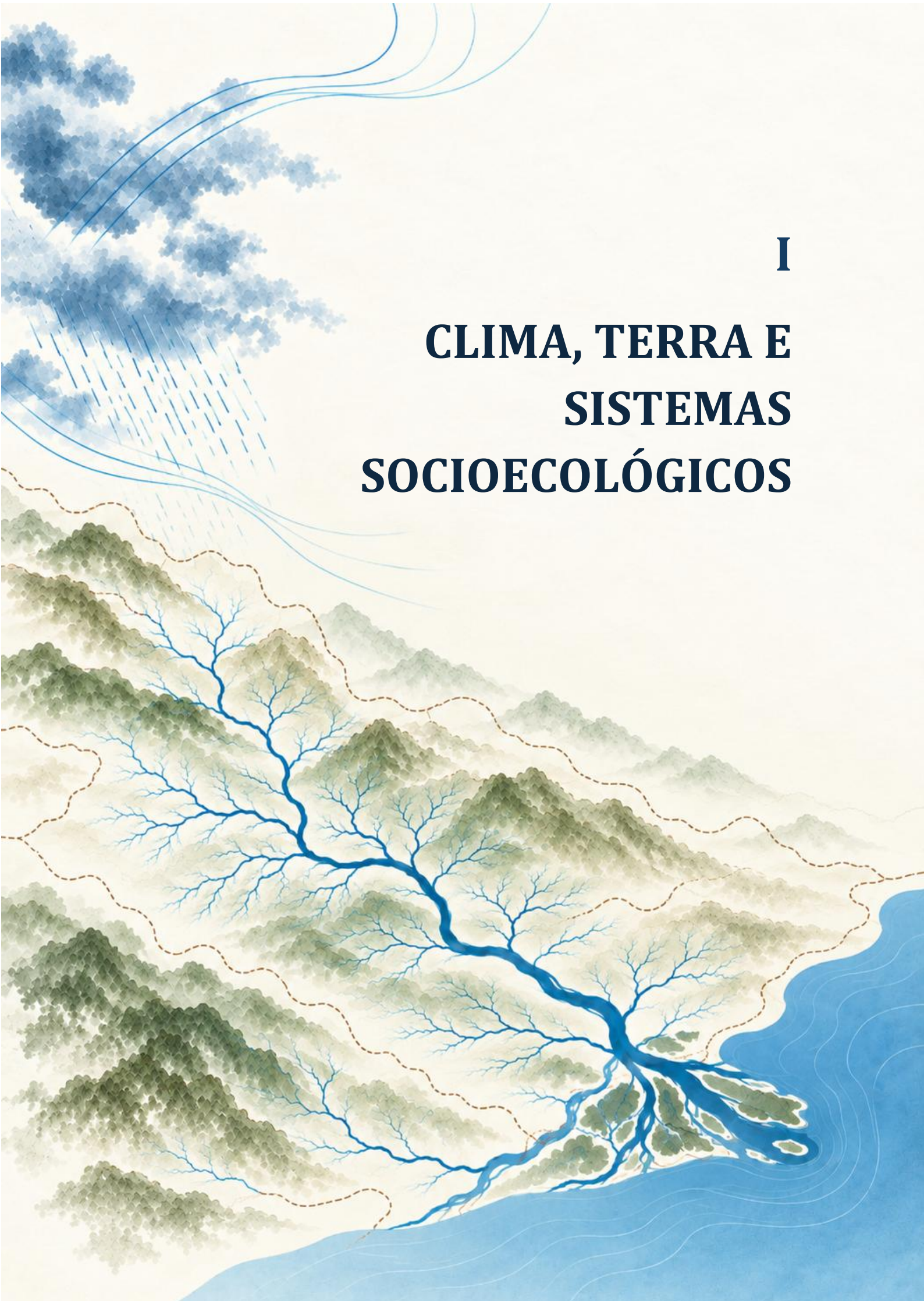
A interface entre clima e saúde constitui outro eixo central da obra. A partir da Geografia da Saúde e da abordagem de Saúde Única, são examinadas as conexões entre condições ambientais, saúde humana e animal, doenças infecciosas, poluição atmosférica e ilhas de calor urbano. Os textos ressaltam que os efeitos da mudança do clima sobre a saúde não se distribuem uniformemente, sendo influenciados pelas condições de exposição, vulnerabilidade social, infraestrutura e capacidade de resposta das comunidades.

Na transição do diagnóstico para a intervenção, as geotecnologias são apresentadas como instrumentos de produção de conhecimento e apoio à gestão ambiental, à identificação de áreas suscetíveis e ao monitoramento de processos que afetam os territórios. Em complemento, as discussões sobre mitigação, adaptação, justiça climática, soluções baseadas na natureza e planejamento adaptativo evidenciam a necessidade de respostas integradas, socialmente justas e fundamentadas em evidências científicas.

A educação climática e a formação cidadã ampliam o alcance dessas discussões, aproximando o conhecimento científico da escola e das experiências cotidianas. Ao mesmo tempo, o estudo das redes de colaboração científica no Brasil convida à reflexão sobre a produção e a circulação do conhecimento necessário ao enfrentamento da crise climática. Ciência, formação e cooperação aparecem, assim, como dimensões complementares de uma agenda coletiva de transformação.

Mais do que reunir diagnósticos, esta obra busca fortalecer a capacidade de interpretar mudanças, reconhecer vulnerabilidades e orientar decisões. A expressão ‘da compreensão à ação’, presente em seu título, sintetiza essa intenção: transformar o conhecimento sobre a dinâmica da Terra e suas interações com a sociedade em subsídios para a conservação ambiental, a redução de riscos, a construção de políticas públicas e a promoção de formas de desenvolvimento compatíveis com os limites ecológicos e com a justiça social.

Larissa Warnavin
Organizadora



I

CLIMA, TERRA E SISTEMAS SOCIOECOLÓGICOS

MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO TEMPO GEOLÓGICO: CICLOS, REGISTROS E RECONSTRUÇÕES

Rodrigo Aguilar - Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH-UFPR)[1]
Gabriela Velásquez - Laboratório de Análise de Bacias (LABAP-UFPR)[2]

1 INTRODUÇÃO

O tema das mudanças climáticas é um dos mais relevantes e presentes no imaginário social-científico do século XXI. No entanto, essa perspectiva quase sempre diz respeito às alterações nos fenômenos e produtos do clima em relação ao que era observado há poucas décadas ou, no máximo, às condições anteriores à Segunda Revolução Industrial no século XIX (p. ex. FERRANDIN *et al.*, 2025).

Por mais importante que esse contexto seja para a sociedade humana atual, do ponto de vista geológico, o último par de séculos não representa nada além do mais ínfimo instante da história do planeta (ICS, 2024). Isso porque o tempo geológico trabalha com escalas de tempo de dezenas, centenas ou até milhares de milhões de anos no passado remoto da Terra, muito além do que a espécie humana teve o privilégio de presenciar e modificar nas últimas centenas de anos. Mais que isso, essa passagem de tempo está muito longe de ter sido climaticamente estática.

Ao longo das eras e éons geológicos, o clima do planeta passou por transformações que tornariam irreconhecíveis as paisagens que são observadas atualmente na Terra. Mudanças de posição de placas tectônicas, oscilações da atividade solar, variações nos padrões de órbita da Terra, choques de corpos celestes, surgimento e evolução de novas formas de vida são apenas algumas das variáveis

[1]Mestre em Geologia – rodrigo98ag@gmail.com
[2]Mestre em Geologia – gabrielabvelasquez@gmail.com

responsáveis pelas diversas modificações dos climas do planeta ao longo dos últimos 4,56 bilhões de anos.

Parte do trabalho dos geocientistas é reconstruir como ocorreram essas transformações ao longo da história da Terra, desde a formação do planeta no Hadeano até o contexto que vemos hoje no Holoceno. Para isso, são usados dados petrológicos, sedimentológicos, paleontológicos e geoquímicos para reconstruir os cenários pretéritos do planeta. Com esses vestígios, é possível dizer, ainda que de forma aproximada, como variáveis como temperatura atmosférica e oceânica, pluviosidade, tipos de vegetação e taxas de insolação flutuaram ao longo do tempo.

No entanto, cada uma dessas pistas permite examinar o passado climático terrestre de forma distinta. Enquanto algumas são úteis para compreender transições de grandes tendências de resfriamento ou aquecimento do clima, ao longo de dezenas de milhões de anos, outras servem como microscópios de detalhe das pequenas oscilações internas às tendências mais amplas.

O objetivo principal desse capítulo é mostrar como a Terra possui uma história climática dinâmica, trazendo ciclos de mudanças, transições graduais e abruptas do clima ao longo de centenas de milhões de anos. Além disso, demonstrar como estudos nesse tema são desenvolvidos nas geociências, ilustrando como diferentes objetos de estudo podem servir para avaliar diferentes escalas de tempos geológicos e fenômenos influenciadores do clima do planeta.

Com isso, será possível avaliar algumas das perguntas mais importantes da atualidade: quão especiais são as mudanças climáticas que estão ocorrendo na Terra? Existe correlação entre a atividade humana e essas modificações recentes ou elas podem ser explicadas pelos fenômenos que regeram as mudanças climáticas do passado? Todas as modificações do clima aconteceram de formas semelhantes? Existe alguma tendência climática geral ao longo dos éons?

Para responder a esses questionamentos, serão apresentados resultados e discussões de artigos científicos relevantes focados na paleoclimatologia do tempo profundo e de épocas recentes da Terra, assim como de estudos que dissertam sobre as mudanças climáticas atuais do planeta. A partir da integração de estudos de caso brasileiros e internacionais, do passado remoto, do presente e do futuro dos climas

terrestres, espera-se demonstrar a relevância e a beleza da contribuição geocientífica para compreender a história e as perspectivas climáticas do planeta.

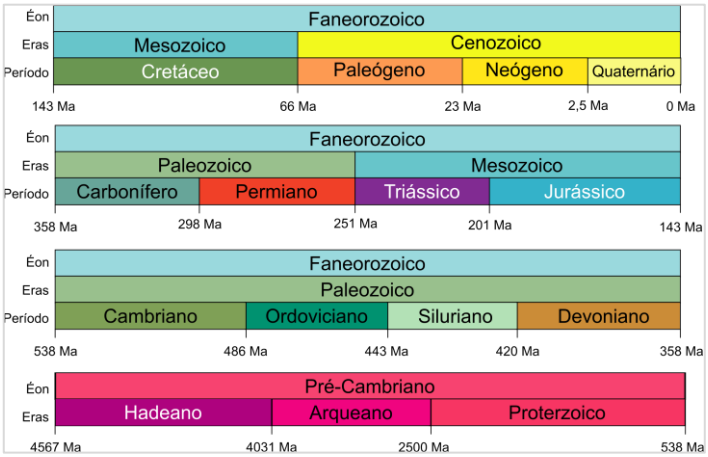
2 O TEMPO GEOLÓGICO PROFUNDO

Compreender a história climática da Terra é aceitar uma escala de tempo que ultrapassa qualquer referência humana. É reconhecer que as mudanças que vivenciamos hoje, por mais urgentes e preocupantes que sejam para a humanidade, constituem apenas um breve capítulo na história do planeta. Ao olharmos para o tempo geológico profundo, percebemos que o clima terrestre sempre esteve em transformação deixando evidências no registro geológico.

Interpretar estas evidências exige, no entanto, situá-las dentro da própria linha do tempo da Terra, estruturada em divisões que organizam bilhões de anos e que revela padrões que nos ajudam a compreender as mudanças climáticas do presente e projetar cenários futuros.

A formação de nosso planeta ocorreu há aproximadamente 4,54 bilhões de anos, juntamente com o nascimento do Sol e dos demais corpos do Sistema Solar (HOLMES, 1946; PATTERSON, 1956). O intervalo de tempo desde então é tradicionalmente organizado em quatro grandes éons: Hadeano, Arqueano, Proterozoico e Fanerozoico (Figura 1).

Figura 1 – Tabela do tempo geológico simplificada com indicação dos principais éons, eras e períodos



Fonte: Simplificado de International Chronostratigraphic Chart v2024.12

Os três primeiros compõem o chamado Pré-Cambriano, período que abrange cerca de 80% de toda a história terrestre e registra desde a solidificação inicial da crosta e a formação da atmosfera primitiva até o surgimento das primeiras formas de vida unicelular. O Fanerozoico, por sua vez, marca o intervalo em que a vida complexa se torna abundante e diversificada, representando a base da maior parte dos registros fossilíferos. Cada éon é subdividido em eras, que por sua vez se desdobram em períodos, posteriormente divididos em épocas e, finalmente, em idades. Essa hierarquia estratigráfica ordena os eventos no tempo geológico profundo, permitindo que as variações e transições climáticas sejam posicionadas em um quadro cronológico.

3 PRINCIPAIS CONTROLES E FEEDBACKS CLIMÁTICOS

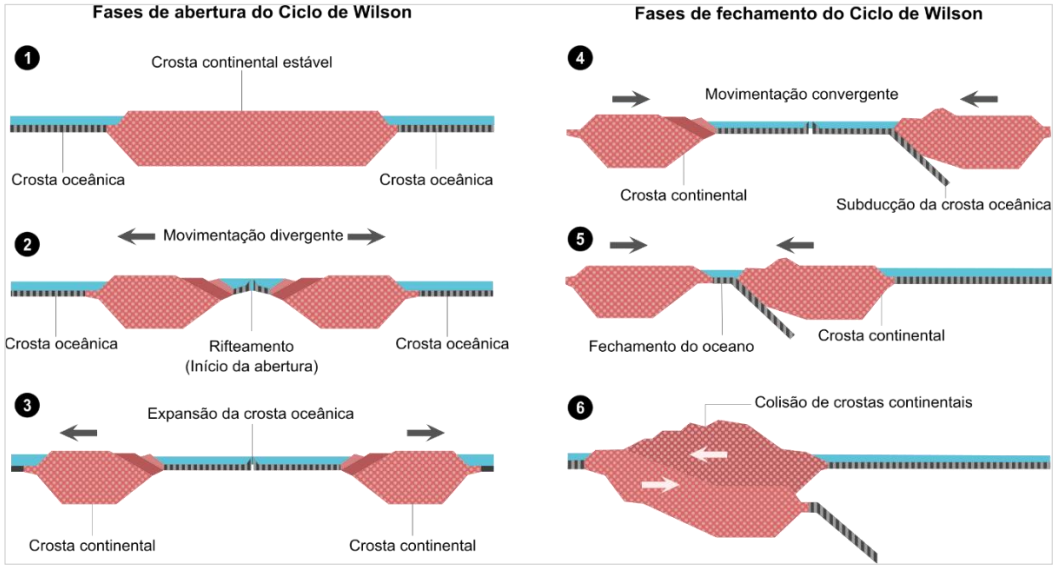
O clima ao longo dessa extensa história é produto da interação entre forças externas e feedbacks internos do sistema terrestre. Variações na órbita terrestre descritas pelos Ciclos de Milankovitch, movimentos tectônicos que reorganizam continentes, episódios de vulcanismo intenso, mudanças na composição química da atmosfera e dos mares, expansão ou retração de mantos de gelo e respostas biogeoquímicas atuaram, em diferentes intensidades, ao longo de 4,54 bilhões de anos. Esses processos moldaram o comportamento climático do planeta e deixaram marcas profundas em nosso registro geológico, permitindo reconhecer momentos de estabilidade, transições graduais e eventos episódicos.

3.1 CICLO DE WILSON

O Ciclo de Wilson representa uma das ideias centrais da geotectônica moderna. Seu conceito foi inicialmente introduzido por J. Tuzo Wilson na publicação clássica “*Did the Atlantic close and then re-open*?” (WILSON, 1966), na qual o autor propôs que oceanos podem se abrir e se fechar repetidamente ao longo do tempo geológico. Em 1975, Burke e Dewey formalizaram o termo “Ciclo de Wilson” (BURKE & DEWEY, 2011), consolidando-o como uma das bases teóricas fundamentais das geociências.

Em síntese, essa teoria descreve os processos de fragmentação e amalgamação dos continentes impulsionados pela dinâmica interna da Terra (WILSON, 1966). O ciclo envolve fases de rifteamento, nas quais massas continentais se rompem e originam novos oceanos, e fases de convergência e colisão, que resultam no fechamento desses oceanos e na formação de supercontinentes (Figura 2). O Ciclo de Wilson explica como grandes blocos continentais se dispersam e se reúnem ao longo de bilhões de anos, exemplificado por supercontinentes como Gondwana, formado no Neoproterozoico e posteriormente fragmentado ao longo do Mesozoico, culminando em seu desmembramento no final do Jurássico.

Figura 2 – Ilustração esquemática do Ciclo de Wilson



Fonte: Simplificado de Wilson *et al.* (2019)

Durante as fases de fragmentação continental, as áreas sujeitas a processos de rifteamento contribuem para ocorrência de intensas atividades vulcânicas. A liberação elevada de CO_2 e outros gases causa mudanças na composição atmosférica, aumentando o efeito estufa e promovendo o aquecimento global (PETIT *et al.*, 1999). Em contraste, nas fases de amalgamação, quando os continentes convergem e se unem para formar supercontinentes, ocorre a formação e maior exposição de extensas áreas elevadas, a intensificação do intemperismo químico e a redução da atividade vulcânica. Nesses momentos, a disponibilidade de CO_2 na atmosfera tende a diminuir, podendo induzir um resfriamento climático significativo.

A presença de uma massa continental única também altera profundamente os padrões de circulação oceânica e atmosférica, favorecendo extremos de temperatura entre interior e margens e facilitando a formação de gelo quando amplas regiões continentais se posicionam próximas aos polos.

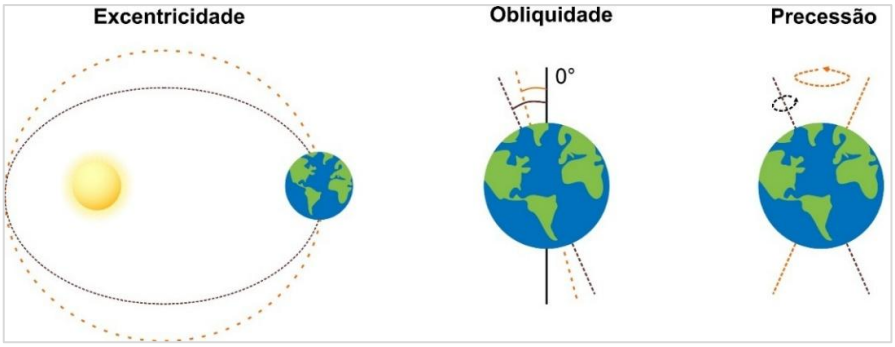
Além de descrever a dinâmica das grandes massas continentais, a abertura e o fechamento de bacias oceânicas e a formação de cadeias montanhosas, o Ciclo de Wilson também conecta os processos que têm origem no interior da Terra, especialmente na região mantélica, a eventos climáticos de significância global.

3.2 CICLOS DE MILANKOVITCH

No cotidiano, a órbita da Terra ao redor do Sol costuma ser entendida como algo uniforme e previsível, sem alterações relevantes ao longo dos anos. Nessa dinâmica simplificada, apenas as alterações das estações do ano são levadas em conta, em função da maior ou menor incidência de radiação solar entre os hemisférios sul e norte do planeta durante os meses.

Contudo, em escalas de dezenas de milhares a milhões de anos, a geometria orbital terrestre oscila ciclicamente (Figura 3). Essas mudanças condicionam taxas variáveis de insolação, favorecendo temperaturas mais quentes ou frias na atmosfera da Terra. De forma geral, essas variações periódicas da órbita terrestre são chamadas de Ciclos de Milankovitch (GANOPOLSKI, 2024), e englobam mudanças orbitais em termos de forma (excentricidade), orientação no espaço (precessão) e inclinação do eixo (obliquidade).

Figura 3 – Esquema ilustrativo dos Ciclos de Milankovitch



Fonte: os autores, 2025.

Primeiro, as variações de excentricidade dizem respeito ao quão circular ou elíptico é o deslocamento da Terra ao redor do Sol. Em ciclos que variam de 0,1 a 2,4 milhões de anos (KOCKEN *et al.*, 2019), essas mudanças tornam mais relevantes as diferenças de insolação entre períodos de periélio (fase mais próxima do Sol) e afélio (estágio mais afastado da estrela). Ou seja, mesmo que a soma total de radiação solar incidindo no planeta não mude ao longo de um ano, a distribuição dessa insolação nas estações se torna mais aguda, e pode agravar efeitos de outras oscilações.

Mudanças de precessão são exemplos dessa possível combinação, já que elas dizem respeito ao movimento circular variável do eixo da Terra, isto é, para qual estrela apontam os polos geográficos do planeta. Com ciclos de 19 a 25 mil anos (HILGEN, 1991), essa oscilação controla qual hemisfério apresenta verões mais intensos e em que fase orbital isso acontece, afetando diretamente fenômenos climáticos como a distribuição de chuvas em sistemas de monções (CHENG *et al.*, 2022).

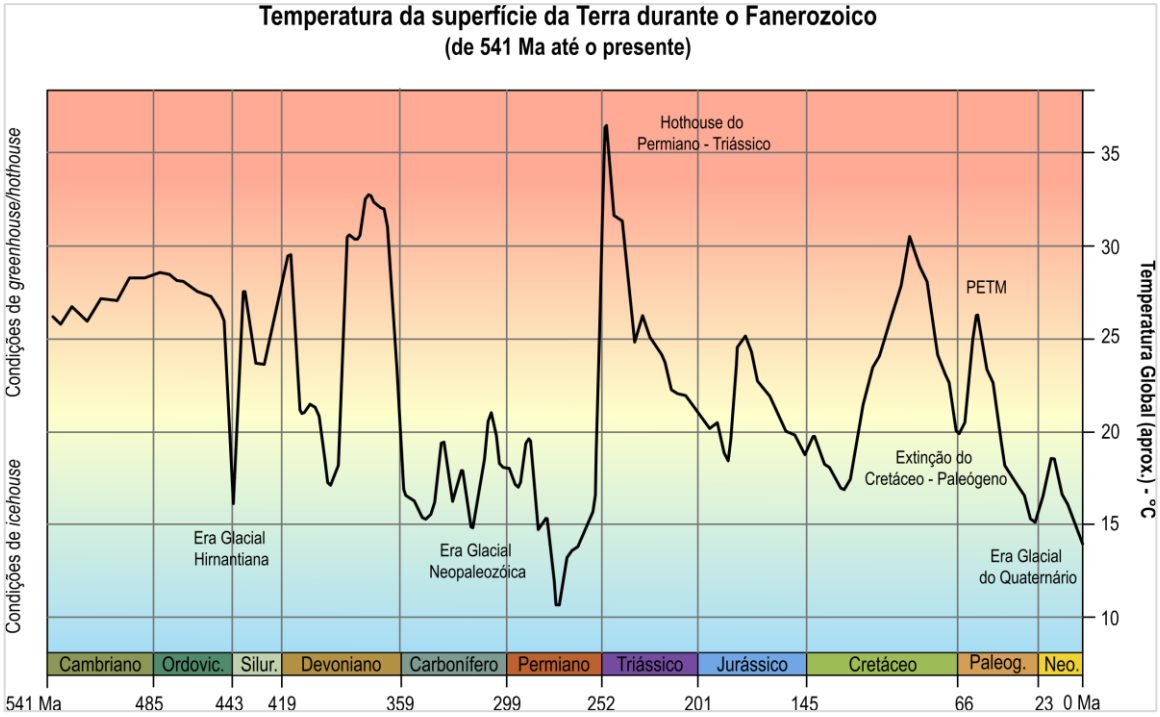
Por fim, o eixo de rotação terrestre também pode mudar em termos de obliquidade em relação ao plano de órbita em relação ao Sol (eclíptica). Com períodos principais de cerca de 41 mil anos e secundários de até 1,2 milhão de anos (GANOPOLSKI, 2024), essa variação controla a intensidade de temperaturas de verões e invernos nos hemisférios, afetando diretamente a cobertura de campos de gelo em altas latitudes e, portanto, servindo como gatilho e modulador de fases glaciais planetárias (LISIECKI, 2005).

Na realidade, somando-se os efeitos de todos os Ciclos de Milankovitch, foi observado que eles funcionaram como marcapassos de fases glaciais dos últimos 450 mil anos (HAYS *et al.*, 1976; BARKER *et al.*, 2025). Com períodos principais de 23, 42 e 100 mil anos, correspondentes respectivos às variações de precessão, obliquidade e excentricidade, foi demonstrado que o início de deglaciações é fortemente condicionado por mudanças na precessão, enquanto oscilações de obliquidade controlam principalmente a manutenção da temperatura global em fases interglaciais (GANOPOLSKI, 2024).

4 GRANDES EVENTOS CLIMÁTICOS DA HISTÓRIA DA TERRA

Ao longo do tempo geológico, alguns eventos específicos foram especialmente transformadores das condições climáticas vigentes e definidores do que estaria por vir no futuro. Nesses períodos, diferentes associações entre fatores geológicos, biológicos, químicos e físicos fizeram a temperatura da Terra oscilar entre condições mais quentes, frias ou similares às vigentes nos dias de hoje (Figura 4). Algumas dessas mudanças térmicas foram abruptas, enquanto outras seguiram tendências de dezenas de milhões de anos para ocorrerem, como veremos a seguir.

Figura 4 – Variação da temperatura da superfície da Terra ao longo do Fanerozoico.



Fonte: Adaptado de (SCOTESE *et al.* 2021)

4.1 O GRANDE EVENTO DE OXIDAÇÃO

Entre os grandes eventos climáticos da história da Terra, o Grande Evento de Oxidação do Paleoproterozoico (*Great Oxidation Event,* ou GOE) ocupa um lugar singular. Ocorrido entre 2,43 e 2,06 bilhões de anos atrás (HOLLAND, 1999; 2002 POULTON *et al.*, 2021), esse episódio marcou a primeira elevação significativa das concentrações de oxigênio na atmosfera, passando de níveis praticamente

inexistentes (inferiores a 10^{-5} do valor atual) para valores próximos de 1% da atmosfera moderna (ZAHNLE *et al.*, 2006). Esse salto, embora aparentemente modesto, representou uma profunda transição no estado químico do planeta, estabelecendo pela primeira vez uma atmosfera oxidante, cujos desdobramentos climáticos foram transformadores.

A proliferação de cianobactérias capazes de realizar fotossíntese oxigênica é frequentemente apontada como um dos principais gatilhos do GOE. Contudo, estudos recentes indicam que a simples produção biológica de oxigênio não teria sido suficiente para promover o aumento atmosférico observado. Para que o O_2 pudesse realmente se acumular na atmosfera, foi necessário que os grandes "sumidouros geológicos de oxigênio" diminuíssem progressivamente ao longo do Paleoproterozoico (KASTING, 2003). A combinação entre a maior disponibilidade biológica de O_2 e o enfraquecimento desses sumidouros criou as condições para a transição rumo a uma atmosfera mais oxidante.

Embora as cianobactérias já existissem antes do GOE, elas ainda não dominavam os ecossistemas microbianos. À medida que os ambientes marinhos e costeiros passaram a limitar a disponibilidade de sulfetos e ferro dissolvido (recursos essenciais para organismos fototróficos anoxigênicos, até então dominantes nestes ambientes), as cianobactérias adquiriram vantagens ecológicas e foram capazes de se proliferar em taxas mais elevadas. Essa proliferação e expansão das colônias de cianobacterias é registrada no aparecimento e diversificação dos estromatólitos, estruturas fósseis laminadas formadas por antigas colônias microbianas que testemunham o momento em que a fotossíntese oxigênica passou a desempenhar um papel central na história biogeoquímica da Terra.

Além dos estromatólitos, outras evidências reforçam a ocorrência e a magnitude do GOE. Alterações nas concentrações de ferro em horizontes de solos fósseis (RYE & HOLLAND, 1998), ampla deposição das formações ferríferas bandadas, o surgimento de *red beds* (camadas sedimentares avermelhadas resultantes da oxidação de minerais de ferro) e a perda gradual de uraninita e de outros minerais sensíveis à oxidação (RASMUSSEN & BUICK, 1999) registram a transição para uma atmosfera mais rica em oxigênio.

Do ponto de vista climático, o O_2 recém-disponível oxidou progressivamente o metano (CH_4), até então o principal gás de efeito estufa da atmosfera primitiva. A queda abrupta das concentrações de metano reduziu significativamente esse efeito, contribuindo para o resfriamento global, ao qual são associados os eventos glaciais Huronianos (ZAHNLE *et al.*, 2006). Além disso, a maior disponibilidade de oxigênio permitiu a formação da camada primitiva de ozônio (O_3). A radiação ultravioleta solar quebrava moléculas de O_2, e os átomos resultantes reagiam com outras moléculas para gerar O_3, o que reduziu substancialmente a entrada de radiação UV na superfície (CATLING *et al.*, 2001).

Dessa forma, a interação entre ciclos biogeoquímicos, a composição atmosférica e as reconfigurações climáticas em escala global caracterizam o Grande Evento de Oxidação do Paleoproterozoico, marcando-o como uma das primeiras e maiores transições climáticas na história da Terra.

4.2 AS ERAS GLACIAIS

Os termos “era glacial” ou “glaciação” fazem referência a longos intervalos em que as temperaturas globais diminuem e os mantos de gelo polares se expandem a partir dos polos, recobrindo extensas áreas continentais. Entre essas grandes fases frias (i*cehouse periods*), a Terra experencia os chamados “períodos de *greenhouse*” ou momentos de “*hothouse”* marcados por temperaturas mais elevadas, condições climáticas globais mais quentes e consequente retração das massas de gelo. Cada era glacial, por sua vez, é composta por ciclos internos: períodos glaciais, caracterizados pela expansão dos centros de gelo, e períodos interglaciais, que registram fases de retração dessas massas.

A literatura sobre essas glaciações é vasta e tem se expandido continuamente à medida que novos métodos e dados refinam a compreensão dos mecanismos envolvidos. Identificar com precisão os gatilhos responsáveis pelo resfriamento global permanece um desafio, mas é amplamente reconhecido pelos geocientistas que a evolução das eras glaciais resulta de uma complexa combinação de fatores e feedbacks climáticos. Variações nas concentrações atmosféricas de CO_2, mudanças na circulação oceânica e episódios de vulcanismo em larga escala, entre outros

processos, operaram em intensidades e durações variadas, moldando o surgimento e a persistência desses eventos climáticos.

Ao longo dos 4,54 bilhões de anos de história do planeta, algumas grandes eras glaciais se destacam: a Era Glacial Huroniana (2,3 – 2,2 Ga), as glaciações criogenianas Sturtiana (717–659 Ma) e Marinoana (645–635 Ma), a Glaciação do Hirnantiano (445–443 Ma), a Era Glacial Neopaleozoica (360 a 255 Ma) e a Glaciação do Quaternário (2,6 Ma – atual). Apesar das diferenças significativas em termos de duração, intensidade e contexto tectônico, estes capítulos refletem momentos importantes de transição no sistema climático terrestre.

Entre essas glaciações, a Era Glacial Huroniana (2,32–2,22 bilhões de anos) representa o mais antigo evento glacial de significância global registrado. Sua ocorrência reflete mudanças no sistema climático terrestre engatilhadas pela transição para uma atmosfera progressivamente mais oxidante, em função do Grande Evento de Oxidação do Paleoproterozoico. Seu nome deriva do Supergrupo Huroniano, no Canadá, que reúne o registro sedimentar mais completo e detalhado desse evento (COLEMAN, 1907; MIALL, 1983). No entanto, outras evidências também são encontradas em sucessões metassedimentares do noroeste da Europa, da África do Sul e da Austrália, indicando sua expressão global. Os eventos glaciais associados a essa era ocorreram principalmente sobre as massas continentais do proto-continente Kenorland (WILLIAMS *et al.*, 1991). Contudo, por serem rochas muito antigas, processos de reciclagem sedimentar, erosão intensa e sucessivas modificações tectônicas ao longo de mais de dois bilhões de anos comprometeram parte desse registro.

No Neoproterozoico, a Terra volta a experenciar condições glaciais extremas com as Eras Glaciais do Criogeniano. A Glaciação Sturtiana, com duração prolongada de aproximadamente 53 milhões de anos (717–659 Ma), e a Glaciação Marinoana, mais breve, com cerca de 10 milhões de anos (645–635 Ma) (HOFFMAN *et al.*, 2017), caracterizam este período. Evidências sedimentares, geocronológicas e geoquímicas obtidas em múltiplos continentes demonstram que o gelo avançou até latitudes tropicais, indicando um estado climático excepcionalmente frio. Entre esses fatores descritos como causadores destas glaciações, destacam-se o resfriamento associado a paleogeografia do supercontinente Rodínia, condições que favoreceram a remoção

de CO_2 atmosférico por intemperismo e processos ligados à circulação oceânica e atmosférica. (p.ex., HOFFMAN *et al.*, 2017; WALZER & HENDEL, 2023).

O final do período Ordoviciano é marcado pela Era Glacial Hirnantiana, que ocorreu entre 445 e 443 Ma. Essa glaciação relativamente curta é caracterizada pela ocorrência de dois ciclos rápidos de expansão e retração das geleiras (SUTCLIFFE *et al.*, 2000) e coincide com o evento de extinção Ordoviciano–Siluriano (BRENCHLEY *et al.*, 1995). Massas de gelo se desenvolveram sobretudo na porção oeste do supercontinente Gondwana, com evidências distribuídas na África do Norte, Arábia, América do Sul, Sibéria, Laurentia, Báltica e China, indicando seu alcance global.

Já no Paleozoico tardio, instala-se a Era Glacial Neopaleozoica (ou Glaciação Permo-Carbonífera), com duração aproximada de 106 milhões de anos (final do Devoniano ao final do Permiano) (CAPUTO & CROWELL, 1985). As unidades sedimentares desse intervalo se encontram preservadas em extensas bacias paleozoicas da Argentina, Austrália, Antártica, África, Brasil, Península Arábica, vários países da Ásia, Estados Unidos e Sibéria.

Esse período representa a primeira grande transição de um estado *icehouse* para um estado *greenhouse* em um planeta biologicamente complexo (FIELDING *et al.*, 2008). Durante esse intervalo, o supercontinente Gondwana se deslocou sobre o Polo Sul, favorecendo a nucleação de múltiplos centros de gelo. A queda expressiva no CO_2 atmosférico e a evolução de grandes cinturões montanhosos intensificaram o resfriamento global, conduzindo o planeta ao evento glacial mais severo do Fanerozoico (ROSA & ISBELL, 2021).

A era glacial mais recente, é representada pela Glaciação do Quaternário. Por ser um evento relativamente jovem no tempo geológico, é também a era glacial mais bem compreendida, uma vez que seus registros conseguem ser recuperados de forma mais contínua e mais facilmente correlacionado com datações geocronológicas. Essa é a glaciação presenciada pelos seres humanos, que aproveitaram o rebaixamento do nível do mar global para partir da África e alcançar por terra regiões como as Américas e inúmeras porções de terra que hoje são ilhas (HOFFECKER *et al.*, 2016).

Fortemente influenciada por Ciclos de Milankovitch (GANOPOLSKI, 2024) e mudanças nos padrões de circulação de correntes oceânicas (BARTOLI *et al.*, 2005), a era glacial do Quaternário é marcada por picos de glaciação separadas por fases

interglaciais de centenas de milhares de anos de duração. Atualmente, a Terra se encontra em uma dessas fases, muito provavelmente após o máximo térmico natural desse período, mas que passou a ser influenciada pela atividade humana (FERRANDIN *et al.*, 2025) e segue em tendência de aquecimento.

4.3 PERÍODOS DE AQUECIMENTO GLOBAL

A história climática da Terra também registra intervalos marcados por temperaturas elevadas e climas amenos, que caracterizam os períodos de *greenhouse*. Esses intervalos de clima quente são, na realidade, muito mais frequentes ao longo do Fanerozoico, e ocupam uma parcela substancialmente maior do tempo geológico em comparação às fases glaciais).

Apesar das particularidades de cada período de *greenhouse*, esses intervalos compartilham um conjunto de características. O registro geológico evidencia que nestes momentos a Terra experencia elevadas concentrações de CO_2 e outros gases de efeito estufa, retração significativa, ou ausência de massas de gelo, expansão das zonas tropicais para latitudes mais altas e elevação do nível do mar. O registro fóssil revela que esses episódios de aquecimento também deixam marcas profundas na biosfera, desencadeando reorganizações ecológicas e adaptações necessárias para a sobrevivência frente às novas condições ambientais impostas por um planeta mais quente.

No início do Fanerozoico, entre o Cambriano e o Ordoviciano, a Terra foi dominada por condições climáticas amenas. Estimativas paleoclimáticas indicam temperaturas dos oceanos superiores a 30 °C em regiões tropicais, entre 20–25 °C em latitudes de 65–70°S, e cerca de 15 °C mesmo nas proximidades dos polos (HEARING *et al.*, 2018). Esse clima quente e estável é considerado um dos elementos que favoreceram a chamada “Explosão Cambriana”, marcada pelo surgimento e rápida expansão de diversos grupos de organismos no registro fóssil da biota marinha (BATEMAN *et al.*, 1998).

Após o término da Era Glacial Hirnantiana, um novo período de condições *greenhouse* foi estabelecido entre o Siluriano e o Devoniano. Ao longo desses aproximadamente 70 milhões de anos, o clima global manteve-se relativamente

quente e estável, criando condições favoráveis para novas transformações ecológicas. Em conjunto com outros fatores biológicos e ambientais, as condições climáticas deste período permitiram uma radiação importante das plantas, evento recorrentemente tratado como análogo ao que foi a “Explosão Cambriana (CAPEL *et al.*, 2022).

Ao final da Era Glacial Neopaleozoica, ainda no Permiano, iniciou-se um novo período de aquecimento global que se estendeu ao longo de todo o Mesozoico. Durante esse intervalo, o planeta foi dominado por condições marcadamente mais quentes, sem calotas polares permanentes, e temperaturas tropicais e subtropicais estendendo-se até altas latitudes. A ausência de tillitos, evidências isotópicas, a presença de fósseis sensíveis à temperatura, como por exemplo samambaias tropicais, crocodilianos e recifes de coral, reforçam esse cenário climático ameno (HALLAM, 1985).

No Cretáceo, destaca-se o intervalo Cenomaniano–Turoniano (~100–90 Ma), momento em que a Terra alcançou um de seus máximos térmicos. Nesse período, concentrações elevadas de CO_2, intensa atividade tectônica relacionada à fragmentação de Pangeia e rápida expansão dos assoalhos oceânicos contribuíram para níveis do mar excepcionalmente altos e para a formação de extensos mares epicontinentais. Esses ambientes marinhos rasos e quentes favoreceram a diversificação de numerosos grupos oceânicos, enquanto, nos continentes, o clima quente e úmido promoveu a expansão de diferentes grupos de plantas e a reorganização de ecossistemas dominados por diversas linhagens de dinossauros.

O início do Cenozoico manteve o planeta em estado *greenhouse*, marcado por importantes eventos térmicos. Entre eles, destaca-se o Máximo Térmico do Paleoceno–Eoceno (PETM), ocorrido há cerca de 55,9 Ma, caracterizado por aquecimento abrupto associado à liberação maciça de carbono (ZACHOS *et al.*, 2010). Há aproximadamente 50 milhões de anos, uma série de mudanças tectônicas e oceânicas passou a reconfigurar a paisagem global e a circulação das grandes correntes marinhas. Essas transformações iniciaram uma tendência persistente de queda das temperaturas médias do planeta, conduzindo gradualmente ao estado *icehouse* que culminou na atual Era Glacial, conforme discutido anteriormente.

4.4 EVENTOS DE EXTINÇÃO EM MASSA E ASSINATURAS CLIMÁTICAS

A história da vida na Terra foi marcada por oscilações na biodiversidade, intercalando períodos de diversificação e momentos de colapso ecológico. Os eventos de extinção em massa, definidos como episódios relativamente curtos, em escala geológica, ocorrem quando uma proporção elevada de espécies, gêneros ou famílias desaparece em um intervalo de tempo reduzido (HALLAM & WIGNALL, 1999). Esses eventos representam rupturas no sistema biótico global, reorganizando os processos evolutivos subsequentes. No registro geológico, esses eventos são reconhecidos por quedas acentuadas de diversidade do conteúdo fóssil, mudanças bruscas de fácies e assinaturas geoquímicas anômalas.

As extinções em massa são descritas na literatura como fruto de processos multifatoriais, normalmente deflagrados pela combinação de pressões ambientais intensas e rápidas que ultrapassam a capacidade adaptativa dos organismos (LITTLE, BENTON, 1995). Entre os principais mecanismos associados a esses eventos, destacam-se: mudanças climáticas abruptas, atividade vulcânica em larga escala, impactos de corpos extraterrestres, mudanças na composição oceânica, reorganização da circulação oceânica e variações nas concentrações de CO_2 e O_2.

Cinco eventos de extinção em massa são amplamente reconhecidos no tempo geológico profundo. A extinção Ordoviciano–Siluriano (~445 Ma) está associada a um período de intenso resfriamento global, formação de centros glaciais extensos e queda significativa do nível do mar, cujos impactos foram particularmente devastadores para os ecossistemas marinhos. A extinção do Devoniano Superior (~372–359 Ma) reflete a combinação entre mudanças climáticas, anóxia oceânica e possíveis pulsos de vulcanismo, gerando forte declínio em corais, peixes e organismos de águas rasas. A extinção Permiano–Triássico (~252 Ma), considerada a mais severa, relaciona-se a erupções massivas de vulcões com emissões significativas de CO_2 e CH_4, aquecimento extremo, acidificação oceânica e anóxia generalizada. No limite Triássico–Jurássico (~201 Ma), o vulcanismo associado à abertura do Atlântico Central contribuiu para rápidas oscilações climáticas e colapso de diversos grupos faunísticos. Por fim, a extinção Cretáceo–Paleógeno (~66 Ma), marcada pelo impacto de Chicxulub, desencadeou um “inverno de impacto”, interrompendo a fotossíntese e

provocando severas alterações climáticas, embora grandes erupções tenham amplificado seus efeitos.

Extinções em massa frequentemente surgem em momentos em que o sistema climático é perturbado de maneira abrupta, seja por resfriamentos extremos e glaciações, seja por aquecimentos violentos impulsionados por emissões vulcânicas ou liberações súbitas de gases do efeito estufa na atmosfera. Essas mudanças afetam a solubilidade do oxigênio nos oceanos, a acidez das águas, os padrões de circulação atmosférica e oceânica e, consequentemente, a produtividade biológica.

O reconhecimento de extinções em massa no registro geológico depende de múltiplas linhas de evidência: quedas abruptas de diversidade; mudanças no padrão isotópico de determinados elementos; camadas enriquecidas em elementos traço, como irídio no limite Cretáceo–Paleógeno; mudanças súbitas de fácies sedimentares; e interrupções na continuidade ecológica. Integrar esses sinais permite reconstruir não apenas o evento de extinção, mas os processos que a antecederam e as consequências.

Atualmente, estamos no decorrer do sexto evento de extinção em massa, denominado como extinção do Holoceno ou extinção do Antropoceno, impulsionada por atividades humanas e marcada por taxas de desaparecimento de espécies muito superiores às registradas nos eventos anteriores (CEBALLOS *et al.*, 2010). Estudos indicam que, nos últimos 100 anos, o número de espécies extintas teria exigido de 800 a 10.000 anos para desaparecer caso apenas processos naturais estivessem operando (CEBALLOS *et al.*, 2015).

Essa aceleração abrupta relaciona-se diretamente à expansão das atividades antrópicas, incluindo destruição de habitats, mudanças climáticas induzidas pelo aumento de CO_2, introdução de espécies invasoras e aumento nas taxas de poluição. O conjunto dessas evidências implica em um cenário inédito na história recente do planeta, no qual as pressões ambientais modernas são de magnitudes e velocidade semelhantes às que desencadearam antigas extinções em massa.

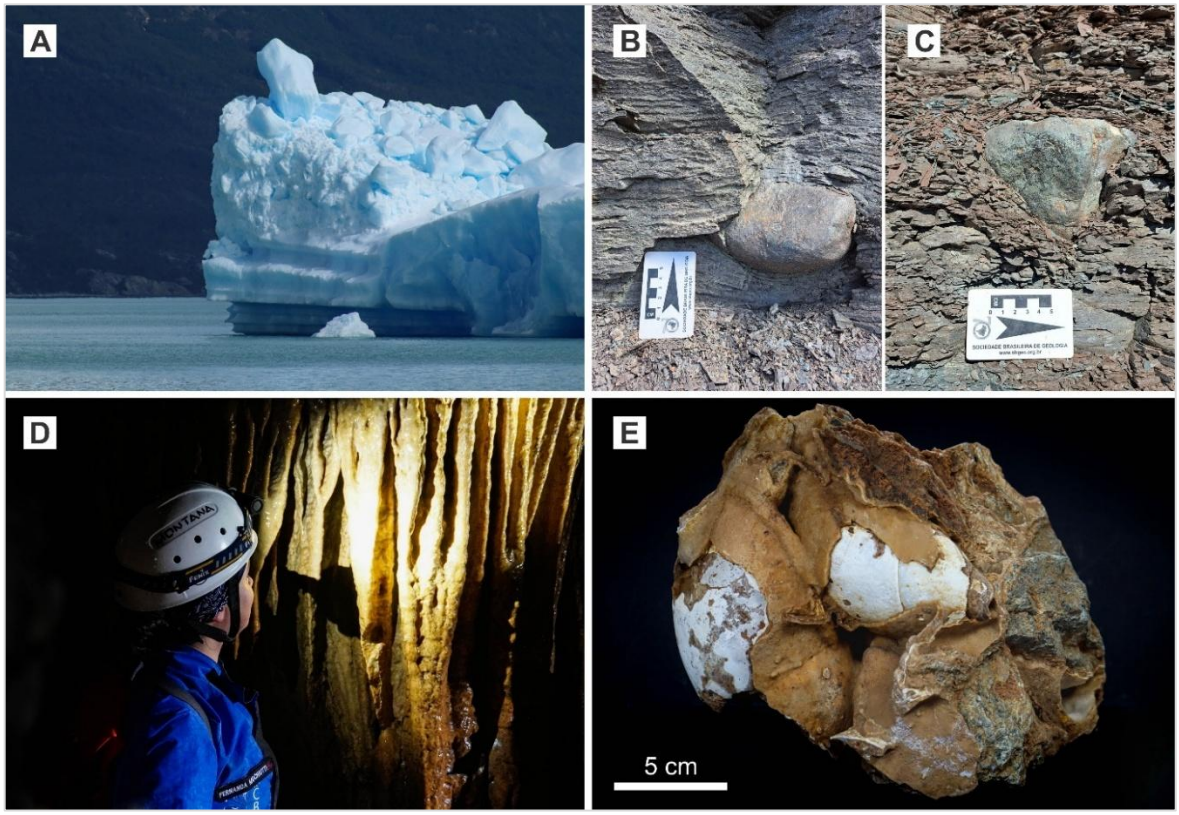
Considerar as extinções em massa na perspectiva do tempo geológico profundo evidencia o quanto o sistema terrestre é sensível a perturbações rápidas e intensas. Esses episódios, embora distintos em suas causas, compartilham padrões que ajudam a compreender os limites de resiliência da biota. Ao situarmos a atual

perda acelerada de biodiversidade nesse contexto histórico, nota-se que compreender os mecanismos que governaram as extinções do passado é de grande valor para interpretar os desafios contemporâneos e prever suas possíveis trajetórias.

5 REGISTROS FÓSSEIS, DATAÇÕES E INDICADORES PALEOCLIMÁTICOS

Para poder reconstruir cada variável das histórias paleoclimáticas do planeta, diversos elementos da geodiversidade são utilizados. Nisso, incluem-se desde objetos materiais, como massas de gelo, depósitos sedimentares e fósseis, até as assinaturas geoquímicas desses materiais (Figura 5). Normalmente, são usadas associações de diferentes indicadores, também chamados de proxies, tanto como complementos de dados como para redundância de informação. O exemplo mais comum é a associação de métodos de datação absoluta, normalmente baseada em decaimento radioativo, com informações qualitativas oriundas de petrografia, geoquímica ou outros métodos.

Figura 5 – Exemplos de indicadores paleoclimáticos



(A) incluindo glaciares e geoquímica associada, (B e C) depósitos transportados por gelo, (D) espeleotemas e (E) fósseis. Fonte: os autores.

5.1 INDICADORES GEOQUÍMICOS DE PALEOINTEMPERISMO

O intemperismo químico representa um importante mecanismo de feedback climático associado à redução das concentrações atmosféricas de CO_2. A umidade atmosférica incorpora CO_2, formando ácido carbônico, que reage com os minerais formadores das rochas, alterando sua composição química e originando minerais mais estáveis sob as novas condições ambientais (BERNER, 1997). Essas reações consomem CO_2 atmosférico, convertendo-o em espécies dissolvidas que podem ser transportadas para os oceanos e, posteriormente, armazenadas em sedimentos carbonáticos por milhões de anos (BERNER & CALDEIRA, 1997)

Sob condições climáticas quentes e úmidas, os processos de hidrólise e dissolução são favorecidos, intensificando o intemperismo químico. Em contrapartida, em condições áridas, quentes ou frias, predominam os processos de intemperismo físico, reduzindo a eficiência das reações químicas que consomem CO_2 (NESBITT & YOUNG, 1982).

As alterações composicionais resultantes do intemperismo químico manifestam-se principalmente pela perda de elementos mais móveis ou lábeis, como cálcio, magnésio, potássio e sódio, acompanhada por um aumento relativo na concentração de elementos mais resistentes às condições superficiais, como alumínio e titânio (NESBITT & YOUNG, 1982). Assim, os chamados indicadores de paleointemperismo baseiam-se em razões que comparam a proporção de óxidos de elementos mais móveis com a de óxidos de elementos relativamente imóveis. Dentre os diferentes indicadores geoquímicos propostos na literatura, destaca-se o *Chemical Index of Alteration* (CIA – Índice Químico de Alteração), introduzido por Nesbitt e Young (1982) como a primeira tentativa de quantificar o grau de intemperismo químico e discriminar cenários com diferentes intensidades de alteração.

5.2 DETRITOS TRANSPORTADOS POR GELO

Clastos caídos (*dropstones*) e pellets de diamictito (*diamictite pellets*) correspondem a detritos liberados por massas de gelo, especialmente icebergs, encontrados comumente associados a rochas finas, como siltitos, ritmitos e folhelhos.

Esses clastos desprendidos durante o derretimento do gelo, são liberados na coluna d'água e afundam rapidamente, podendo seu impacto gerar feições de deformação nos sedimentos ainda inconsolidados. A liberação de aglomerados de sedimentos pelo rolamento de icebergs, bem como pelo gelo superficial de mares e lagos, pode produzir cluster de clastos (*clast clusters)* e estruturas de tombamento de sedimentos (*dump structures*) no fundo dessas bacias. Essas estruturas consistem em pequenos montes ou lentes de diamictito depositadas de forma abrupta em meio a sedimentos predominantemente finos (THOMAS & CONNELL, 1985).

Feições de abrasão glacial observadas sobretudo em *dropstones* reforçam sua interpretação como indicadores de processos associados a massas de gelo. Estrias glaciais, superfícies polidas e geometrias com formato de "ferro de passar" revelam que esses sedimentos foram retrabalhados por abrasão basal de geleiras antes de serem incorporados ao gelo e posteriormente depositados (ver Fotografias de IRD).

O aporte de detritos transportados pelo gelo em depósitos sedimentares pode ocorrer tanto durante avanços quanto em recuos glaciais, uma vez que os processos que controlam o desprendimento de icebergs nas margens de geleiras são altamente complexos e influenciados por múltiplos fatores (BENN *et al.*, 2007).

A ocorrência dessas feições no registro geológico constitui uma importante ferramenta para a reconstrução das condições climáticas e da dinâmica das massas de gelo próximas à bacia. Nesse sentido, destacam-se os chamados Níveis de Heinrich (*Heinrich layers*), camadas sedimentares ricas em detritos glaciomarinhos em meio a sedimentos finos. Evidências obtidas a partir de testemunhos do Atlântico Norte demonstram que esses níveis, compostos por areia grossa e cascalhos, registram episódios catastróficos de descarga de icebergs durante o último período glacial, resultantes do colapso de porções instáveis da camada de gelo Laurentide (HEINRICH, 1988).

5.3 PALEOCLIMATOLOGIA EM CAVERNAS

A espeleologia é a ciência que estuda as cavidades naturais subterrâneas desenvolvidas nos mais diversos tipos de rochas, assim como o conteúdo mineral, biológico e arqueológico desses ambientes. Boa parte desse material contém pistas sobre as condições climáticas do passado da Terra, especialmente das últimas centenas de milhares de anos, já que cavernas tendem a desaparecer depois de poucos milhões de anos.

Em cavidades subterrâneas carbonáticas, por exemplo, é comum a precipitação mineral por gotejamento, gerando pares de estruturas chamadas estalactites e estalagmites (genericamente chamadas de espeleotemas). Os cristais dessas feições são essencialmente compostos por carbonato de cálcio ($CaCO_3$), cujo carbono e oxigênio apresentam composição isotópica diretamente representativa da atmosfera e do solo no momento da precipitação. Ou seja, as camadas de precipitação mineral em espeleotemas funcionam como páginas de um livro que conta a evolução do clima ao longo de milhares de anos.

Em condições climáticas mais quentes, uma quantidade maior de isótopos de oxigênio e hidrogênio pesados (^{18}O e ^{2}H) evapora em relação ao oxigênio e hidrogênio leves (^{16}O e ^{1}H) da água oceânica (CLARK & FRITZ, 1997), gerando chuvas isotopicamente enriquecidas nesses isótopos pesados. Junto disso, o tipo de vegetação e os regimes hídricos vigentes em cada momento geológico são decisivos na definição dos isótopos de carbono (^{12}C e ^{13}C) que estarão disponíveis no solo quando a água pluvial infiltrar rumo às cavidades subterrâneas (WONG & BREECKER, 2015).

Como essa umidade será a base para a precipitação mineral dos carbonatos, a combinação isotópica registrada nos cristais dos espeleotemas refletirá diretamente o sinal isotópico hídrico e vegetacional durante a precipitação. Datações desses cristais podem ser feitas via radiocarbono, U-Th, Ar-Ar, dentre outros métodos, e outras informações relevantes para a paleoclimatologia podem vir de diversos isótopos, como estrôncio ($\delta^{87}Sr$), cálcio ($\delta^{44}Ca$), enxofre ($\delta^{34}S$) e muitos outros (BAJO *et al.*, 2017).

Como exemplo dessa aplicação, um estudo paleoclimático com sinais isotópicos de espeleotemas da Caverna de Botuverá (SC) mostrou que o Sistema de Monções da América do Sul foi o mecanismo pluvial dominante em Santa Catarina ao longo dos últimos 9.000 anos (BERNAL *et al.* 2016). Além disso, os autores também mostraram que, no início do Holoceno, a contribuição da umidade amazônica para as chuvas do Sul do Brasil era menor do que hoje, se tornando progressivamente mais relevante nos últimos milhares de anos.

Outro trabalho, desta vez desenvolvido nas Grutas Trapiá e Furna Nova (RN), auxiliou na compreensão de quando as condições semiáridas nordestinas se estabeleceram no Holoceno (UTIDA *et al.*, 2023). No estudo, foi demonstrado que os últimos 3.200 anos concentraram o avanço de condições climáticas secas no Nordeste brasileiro, em função do enfraquecimento do Sistema de Monções da América do Sul em escala orbital e da migração da Zona de Convergência Intertropical. Na prática, esses registros geoquímicos cavernícolas mostraram que a escassez hídrica nordestina não é um fenômeno que sempre existiu, mas sim uma condição muito recente no tempo geológico.

Diversos outros materiais cavernícolas são usados na interpretação das condições paleoambientais da Terra. Exemplos disso são fósseis de megafauna (VILLAVICENCIO & WERDELIN, 2018), que refletem habitats distintos do que são encontrados hoje, registros arqueológicos como pinturas rupestres (PONTES *et al.* 2023), que ilustram a vegetação presente em cada região, e outros elementos da geodiversidade interna das cavernas, que ilustram regimes hídricos, mecanismos de erosão e muito mais.

5.4 AQUÍFEROS E O CLIMA DO PASSADO

Da mesma forma que a geoquímica mineral em cavernas ilustra a composição da água meteórica do passado e, consequentemente, do paleoclima terrestre, aquíferos funcionam como cofres que armazenam a água desses períodos. A partir da chuva, a água infiltra no solo e pode alcançar rochas porosas, fraturas e cavidades no subterrâneo, passando a estar isolada das condições superficiais por períodos que chegam a milhões de anos.

Assim, as assinaturas isotópicas de oxigênio e hidrogênio das moléculas de H_2O da água subterrânea representam fontes de informação potencialmente tão ricas quanto aquelas presentes nos espeleotemas. O próprio hidrogênio dessas moléculas possui pequenas concentrações de uma variedade radioativa, o trítio (^3H), que pode ser usada para datar águas subterrâneas de até 60 anos de idade (FEITOSA *et al.*, 2008). No entanto, como diversos minerais são solubilizados quando em contato com a água, pode ser usado o carbono presente em formas como bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e CO_2 dissolvidos para datações de radiocarbono (^{14}C), capazes de datar amostras de até 40.000 anos (IAEA, 2013).

Com dados desse tipo, estudos como os de Wang *et al.* (2024) demonstram o potencial da geoquímica isotópica da água subterrânea para reconstituições paleoclimáticas em áreas sem outros bons proxies, como é o caso do permafrost ártico. Além disso, pesquisas como as de Bedaso *et al.* (2020) utilizam essas razões isotópicas para descobrir quais são as origens e trajetórias atmosféricas das chuvas que alimentam os aquíferos, dados essenciais para reconstruir padrões climáticos do passado em termos hídricos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os climas da Terra já passaram por diversas transformações ao longo do tempo geológico, sendo que essas mudanças são muito bem-estabelecidas na literatura. Indicadores petrológicos, paleontológicos e geoquímicos atestam para a ocorrência de temperaturas muito menores e muito mais altas do que as atuais, assim como períodos muito mais secos e outros mais úmidos do que temos hoje ao longo do tempo profundo. No entanto, essa evolução climática do passado ocorreu em escalas e em função de processos bastante distintos do que presenciamos na atualidade.

Entender as variáveis que condicionaram as transformações do clima no tempo geológico ajuda a perceber o quão singulares são as mudanças climáticas vistas desde o século XIX. Ciclos orbitais, vulcanismo e atividade tectônica são mecanismos que podem gerar alterações climáticas, mas não explicam o aquecimento atmosférico e oceânico terrestre sem levar em conta as atividades humanas. Através da industrialização, a humanidade se tornou um agente geológico poderoso, capaz de transformar os climas do planeta como jamais ocorreu nos 4,54 bilhões de anos da história da Terra.

REFERÊNCIAS

BAJO, P.; BORSATO, A.; DRYSDALE, R.; HUA, Q.; FRISIA, S.; ZANCHETTA, G.; HELLSTROM, J.; WOODHEAD, J. Stalagmite carbon isotopes and dead carbon proportion (DCP) in a near-closed-system situation: An interplay between sulphuric and carbonic acid dissolution. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 210, p. 208-227, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2017.04.038

BARKER, S.; LISIECKI, L. E.; KNORR, G.; NUBER, S.; TZEDAKIS, P. C. Distinct roles for precession, obliquity, and eccentricity in Pleistocene 100-kyr glacial cycles. **Science**, v. 387, n. 6737, e3491, 2025. https://doi.org/10.1126/science.adp3491

BARTOLI, G.; SARNTHEIN, M.; WEINELT, M.; ERLENKEUSER, H.; GARBE-SCHÖNBERG, D.; LEA, D. W. Final closure of Panama and the onset of northern hemisphere glaciation. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 237, p. 33-44, 2005. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.020

BATEMAN, R. M.; CRANE, P. R.; DIMICHELE, W. A.; KENRICK, P. R.; ROWE, N. P.; SPECK, T.; STEIN, W. E. Early evolution of land plants: phylogeny, physiology and ecology of the primary terrestrial radiation. **Annual Reviews of Ecology and Systematics**, v. 29, p. 263–292, 1998. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.263

BEDASO, Z. K.; DELUCA, N. M.; LEVIN, N. E.; ZAITCHIK, B. F.; WAUGH, D. W.; WU, S. Y.; HARMAN, C. J.; SHANKO, D. Spatial and temporal variation in the isotopic composition of Ethiopian precipitation. **Journal of Hydrology**, v. 585, e124364, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124364

BENN, D.I.; HULTON, N.R.J.; MOTTRAM, R.H. “Calving Laws”, “Sliding Laws” and the stability of tidewater glaciers. Annals of Glaciology, v. 46, p.123-131, 2007.

BERNAL, J. P.; CRUZ, F. W.; STRÍKIS, N. M.; WANG, X.; DEININGER, M.; CATUNDA, M. C. A.; ORTEGA-OBREGÓN, C.; CHENG, H.; EDWARDS, R. L.; AULER, A. S. High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cave, Brazil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 450, p. 186-196, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.008

BERNER, R.A. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO2. **Science**, v. 276, p. 544–546, 1997.

BERNER, R.A.; CALDEIRA, K. The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle. **Geology**, v.1, p. 955–956, 1997.

BRENCHLEY, P. J.; CARDEN, G. A. F.; MARSHALL, J.D. Environmental changes associated with the "first strike" of the Late Ordovician mass extinction, **Modern Geology**, v. 20, p. 69-82, 1995.

BURKE, K. Plate tectonics, the Wilson Cycle, and mantle plumes: geodynamics from the top. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 39, p. 1–29, 2011. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040809-152521.

CAPEL, E.; CLEAL, C.J.; XUE, J.; MONNET, C.; SERVAIS, T.; CASCALES-MINANA, B. The Silurian–Devonian terrestrial revolution: Diversity patterns and sampling bias of the vascular plant macrofossil record. **Earth-Science Reviews**, v. 231, 104085, 2022. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104085.

CAPUTO, M.V.; CROWELL, J. Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era. **Geological Society American Bulletin**, v. 96 (8), p. 1020–1036, 1985.

CATLING, D. C.; ZAHNLE, K. J.; MCKAY, C. P. Biogenic methane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of early earth. **Science**, v. 293, p. 839–843, 2001.

CEBALLOS, G.; GARCIA, A.; EHRLICH, P.R. The sixth extinction crisis: Loss of animal populations and species. J. Cosmology, v. 8, p. 1821–1831, 2010.

CEBALLOS, G.; EHRLICH, P.R.; BARNOSKY, A.D.; GARCÍA, A.; PRINGLE, R.M.; PALMER, T.M. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. **Science Advances**, v. 1(5), 1400253, 2015. https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253.

CHENG, H.; LI, H.; SHA, L.; SINHA, A.; SHI, Z.; YIN, Q.; LU, Z.; ZHAO, D.; CAI, Y.; HU, Y.; HAO, Q.; TIAN, J.; KATHAYAT, G.; DONG, X.; ZHAO, J.; ZHANG, H. Milankovitch theory and monsoon. **The Innovation**, v. 3, 100338, 2022. https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100338

CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. 1. ed. Nova Iorque: CRC Press, 1997.

COLEMAN, A.P. A Lower Huronian Ice Age. **American Journal of Science**, v. 23, p. 187-192, 1907.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FERRANDIN, S.; PLUNKETT, G.; BRITTON, K.; GUIRY, E.; BEGLANE, F. Dual role of human activities and climate in pre-industrial nitrogen shifts in Ireland. **Journal of Archaeological Science**, v. 180, e106271, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106271

FIELDING, C. R.; FRANK, T. D.; ISBELL, J. L. The late Paleozoic Ice Age–A review of current understanding and synthesis of global climate patterns. Special Papers - **Geological Society of America**, v. 1, p. 343–354, 2008. https://doi.org/10.1130/2008.2441(24).

GANOPOLSKI, A. Toward generalized Milankovitch theory (GMT). **Climate of the Past**, v. 20, p. 151-185, 2024. https://doi.org/10.5194/cp-20-151-2024

HALLAM, A. A review of Mesozoic Climates. **Journal of Geological Society of London**, v. 142, p.433-445, 1985.

HALLAM, A.; WIGNALL, P. Mass extinctions and sea-level change: **Earth-Science Reviews**, v. 48, p. 217–250, 1999.

HAYS, J. D.; IMBRIE, John; SHACKLETON, N. J. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. **Science**, v. 194, n. 4270, p. 1121-1132, 10 dez. 1976. Disponível em: https://www.science.org/doi/10.1126/science.194.4270.1121.

HEARING, T.W.; HARVEY, T.H.; WILLIAMS, M.; LENG, M.J., LAMB, A.L.; WILBY, P.R.; BABBOTT, S.E.; POHL, A.; DONNADIEU, Y. An early Cambrian greenhouse climate. **Science Advances**., v. 4 (5), 5690, 2018. https://doi.org/10.1126/sciadv.aar5690.

HEINRICH, H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. **Quaternary Research**, v. 29, p.149-152, 1988.

HILGEN, F. J. Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropels in the Mediterranean and implication for the Geomagnetic Polarity Time Scale. Earth and Planetary Science Letters, v. 104, p. 226–244, 1991. https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90206-W

HOFFECKER, J. F.; ELIAS, S. A.; O'ROURKE, D. H.; SCOTT, G. R.; BIGELOW, N. H. Beringia and the global dispersal of modern humans. **Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews**, v. 25, n. 2, p. 64-78, 2016. https://doi.org/10.1002/evan.21478

HOFFMAN, F.; ABBOT, S.D.; ASHKENAZY, Y.; BENN, I.D.; BROCKS, J.J.; COHEN, A.P.; COX, M. G.; CREVELING, R.J.; DONNADIEU, Y.; ERWIN, H.D. Snowball Earth Climate Dynamics and Cryogenian. **Science Advances**, v. 3, n.11, 2017. https://doi.org/10.1126/sciadv.1600983

HOLLAND, H. D. When did the Earth's atmosphere become oxic? A Reply. **The Geochemical News**, v. 100, p. 20–22, 1999.

HOLLAND, H.D. Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 66, p. 3811–3826, 2002.

HOLMES, A. An estimate of the age of the Earth. **Nature**, v. 157 (3995), p. 680–684. 1946.

ICS – INTERNATIONAL COMMISSION ON STRATIGRAPHY. Carta Cronoestratigráfica Internacional, 2024. Disponível em: https://stratigraphy.org/chart/. Acesso em 10 Nov 2025

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotope methods for dating old groundwater, 2013. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1587_web.pdf. Acesso em: 01 Dez 2025

KASTING, J.F.; CATLING, D. Evolution of a habitable planet. **Annual Review of Astronomy & Astrophysics**, v. 41. p. 429–463, 2003.

KOCKEN, I. J.; CRAMWINCKEL, M. J.; ZEEBE, R. E.; MIDDELBURG, J. J.; SLUIJS, A. The 405 kyr and 2.4 Myr eccentricity components in Cenozoic carbon isotope records. **Climate of the Past**, v. 15, p. 91–104, 2019. https://doi.org/10.5194/cp-15-91-2019

LIBERA, M. E. D.; CAUHY, J.; STUMPF, C.; SANTOS, R. V.; CRUZ, F. W.; STRÍKIS, N. M.; PRADO, L. F.; MOQUET, J.-S.; WEBER, M.; ORRISON, R.; CHENG, H.; EDWARDS, R. L.; NOVELLO, V. F.; VONHOF, H.; SCHOLZ, D. Speleothem-based reconstruction of Holocene changes in monsoonal patterns and environmental conditions in Central Brazil. **Global and Planetary Change**, v. 256, 105186, 2026. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2025.105186

LISIECKI, L. E.; RAYMO, M. E. A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ18O records. **Paleoceanography**, v. 20, PA1003, 2005. https://doi.org/10.1029/2004PA001071

LITTLE, C. T. S.; BENTON, M. J. Early Jurassic mass extinction: a global long-term event. **Geology**, Boulder, v. 23, n. 6, p. 495–498, 1995.

MIALL, A.D. Glaciomarine sedimentation in the Gowganda Formation (Huronian), northern Ontario. **Journal of Sedimentary Research**, v.53, p. 477-491, 1983.

NESBITT, H.W.; YOUNG, G.M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, v. 299, p. 715–717, 1982. https://doi.org/ 10.1038/299715a0.

PATTERSON, C. Age of meteorites and the earth. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 10 (4), p. 230–237. 1956

PETIT, J. R.; JOUZEL, J.; RAYNAUD, D.; BARKOV, N. I.; BARNOLA, J.-M.; BASILE, I.; BENDER, M.; CHAPPELLAZ, J.; DAVIS, M.; DELAYGUE, G.; DELMOTTE, M.; KOTLYAKOV, V. M.; LEGRAND, M.; LIPENKOV, V. Y.; LORIUS, C.; PEPIN, L.; RITZ, C.; SALTZMAN, E.; STIEVENARD, M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, v. 399, p. 429–436, 1999. https://doi.org/10.1038/20859

PONTES, H. S.; JUNGHANS, R.; MASSUQUETO, L. L.; MOCHIUTTI, N. F. B.; GUIMARÃES, R. A.; SILVA, A. G. C.; SILVA, A. R. First rupestrian representations of *Araucaria angustifólia* in Southern Brazil. **Caderno de Geografia**, v. 33, n. 72, p. 174-201, 2023. https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2023v33n72p174

POULTON, S.W.; BEKKER, A.; CUMMING, V.M.; ZERKLE, A.L; CANFIELD, D.E.; JOHNSTON D.T. A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation. **Nature**, v. 592, p. 232–236, 2021. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03393-7

RASMUSSEN, B.; BUICK, R. Redox state of the Archean atmosphere: evidence from detrital heavy minerals in ca. 3250–2750 Ma sandstones from the Pilbara Craton, Australia. **Geology,** v. 27, p. 115–118, 1999.

ROSA, E.L.M; ISBELL, J.L. Late Paleozoic Glaciation. In: Elia, S., Aldernton, D. (orgs.), Encyclopedia of Geology, 2021. p. 534 – 545

RYE, R.; HOLLAND, H. D. Paleosols and the evolution of atmospheric oxygen: a critical review. **American Journal of Science**, v. 298, p. 621–672, 1998.

SCOTESE, C.R.; SONG, H; MILLS, B.J.W.; MEER, D.G.V.D. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years. **Earth-Science Reviews**, v. 215, 103503, 2021. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103503.

SUTCLIFFE, O.E.; DOWDESWELL, J.A.; WHITTINGTON, R.J.; THERON, J.N.; CRAIG, J. Calibrating the Late Ordovician glaciation and mass extinction by the eccentricity of Earth's orbit. **Geology**, v. 28, p. 967–970, 2000.

THOMAS, G. S. P.; CONNELL, R.J. Iceberg drop, dump, and grounding structures from Pleistocene glacio-lacustrine sediments, Scotland. **Journal of Sediment Petrology**, v. 55(2), p. 243–249, 1985.

UTIDA, G.; CRUZ, F. W.; VUILLE, M.; AMPUERO, A.; NOVELLO, V. F.; MAKSIC, J.; SAMPAIO, G.; CHENG, H.; ZHANG, H.; DIAS DE ANDRADE, F. R.; EDWARDS, R. L. Spatiotemporal Intertropical Convergence Zone dynamics during the last 3 millennia in northeastern Brazil and related impacts in modern human history. **Climate of the Past**, v. 19, p. 1975–1992, 2023. https://doi.org/10.5194/cp-19-1975-2023

VILLAVICENCIO, N. A.; WERDELIN, L. The Casa del Diablo cave (Puno, Peru) and the late Pleistocene demise of megafauna in the Andean Altiplano. **Quaternary Science Reviews**, v. 195, p. 21-31, 2018. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.013

WANG, S.; WANG, S.; HUANG, X.; WANG, H.; HAN, Y.; WANG, S.; QI, S. Groundwater composition and stable isotopes as proxies to investigate paleoclimate change in permafrost thawing regions. **Applied Geochemistry**, v. 169, e106036, 2024. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106036

WALZER, U., HENDEL, R. Natural climate change and glaciations. **Earth-Science Reviews**, v. 241, 2023. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104435

WILLIAMS, H.; HOFFMAN, P.E.; LEWRY, J.F.; MONGER, J.W.H.; RIVERS, T. Anatomy of North America: thematic portrayals of the continent. **Tectonophys**, v. 187, p. 117-134, 1991.

WILSON, J.T. Did the Atlantic close and then re-open? **Nature**, v. 211, p. 676–681, 1966.

WONG, C. I.; BREECKER, D. O. Advancements in the use of speleothems as climate archives. **Quaternary Science Reviews**, v. 127, p. 1-18, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.019

ZACHOS, J.C.; MCCARREN, H.; MURPHY, B.; ROHL, U.; WESTERHOLD, T. Tempo and Scale of late Paleocene and early Eocene carbon isotope cycles: Implications for the origin of hyperthermals. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 299, p. 242-249, 2010. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.004.

ZAHNLE, K.J.N.; ARNDT, N.; COCKELL, C.; HALLIDAY, A.; NISBET, E.; SELSIS, F.; SLEEP, N.H. Emergence of a habitable planet. **Space Science Verification**, v. 129, p. 35–78, 2006. https://doi.org/10.1007/s11214-007-9225-z.

FUNDAMENTOS CLIMÁTICOS E DINÂMICA ATMOSFÉRICA: VARIABILIDADE, MUDANÇAS E INTERAÇÕES

Pedro Augusto Breda Fontão – Universidade Federal do Paraná[1]
Vera Cristina Scheller dos Santos Rocha – Centro Universitário Internacional Uninter[2]
Luana Rudy – Universidade Federal do Paraná[3]

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo principal abordar os fundamentos climáticos e da dinâmica atmosférica que influenciam diretamente o planeta. No contexto contemporâneo das mudanças climáticas, em que o clima tem assumido papel de destaque nas discussões ecológicas e ambientais em escala global, a atmosfera passa a ser cada vez mais valorizada por sua influência direta sobre as esferas social, econômica e ambiental. A combinação de fenômenos climáticos, hídricos e sociais é capaz de produzir e desencadear impactos e grandes tragédias que, por sua vez, podem resultar na perda de inúmeras vidas humanas, bem como na interrupção de atividades econômicas essenciais e de meios fundamentais de comunicação.

Diante disso, ressalta-se a importância da Climatologia para proporcionar uma visão integrada dos impactos desencadeados por eventos extremos sobre a sociedade, cujos efeitos costumam ser amplificados por outros fenômenos geográficos. Por integrar a obra *Geociências e Mudanças Climáticas: da compreensão*

[1] Doutor em Geografia – pedrofontao@ufpr.br
[2] Mestra em Geografia – vera.r@uninter.com
[3] Mestra em Geografia – luanarudy@ufpr.br

à ação, este capítulo exige um olhar articulado entre os sistemas naturais e as dinâmicas sociais, perspectiva que orientou sua elaboração. Assim, o texto estrutura-se em três eixos principais: I) a trajetória conceitual de tempo e clima, associando-os à variabilidade climática, às anomalias e às tendências; II) as contribuições da Climatologia e da Meteorologia para a análise e compreensão dos fenômenos climáticos e; III) a interação entre atmosfera, hidrosfera e biosfera no funcionamento do sistema climático.

2 CONCEITOS DE TEMPO E CLIMA, VARIABILIDADE CLIMÁTICA, ANOMALIAS E TENDÊNCIAS

Ao abordar o tema da Climatologia, uma questão elementar é diferenciar **Tempo** de **Clima**, conceitos-chave para a compreensão da atmosfera. A análise das condições atmosféricas, em escalas temporais distintas, em que o tempo expressa as condições momentâneas em um determinado lugar e instante, enquanto o clima representa um padrão característico em longo tempo, passa a impressão de ser algo trivial e de fácil compreensão, pois é ensinado desde o ensino fundamental nas escolas brasileiras. Na Base Nacional Comum Curricular (BNCC), no componente de Geografia (BRASIL, 2018), por exemplo, é possível encontrar entre as unidades temáticas a competência de relacionar conexões e escalas, e, em específico, a habilidade de “descrever os movimentos do planeta e sua relação com a circulação geral da atmosfera, o tempo atmosférico e os padrões climáticos”.

No entanto, embora esses conteúdos sejam ensinados desde cedo às novas gerações, ainda é comum encontrar pessoas que confundem ou apresentem dificuldades no uso adequado dos conceitos de tempo e clima. Uma das razões que contribuem para essa confusão é a ausência, na língua portuguesa, de um termo exclusivo para designar o tempo atmosférico, situação que também ocorre em outras línguas de origem latina, diferentemente de idiomas como o inglês (*weather*) ou o alemão (*wetter*). A palavra tempo, por sua vez, tem características polissêmicas, podendo assumir diferentes significados conforme o contexto de uso, como o cronológico, o histórico, o gramatical, o musical ou o atmosférico. Monteiro (2001, p. 133), ao abordar este assunto, analisa que:

> Como os termos tempo, ritmo, padrões fazem parte da linguagem vulgar, coloquial, do nosso dia a dia, a sua passagem pelo meteorológico com vistas à caracterização geográfica parece exigir que se parta desde o suporte do senso comum, um possível embasamento para atingir conotações possivelmente científicas.

Dessa forma, a concepção de tempo atmosférico passa a ser vista como algo momentâneo (ou no máximo diário), derivado da combinação de seus elementos morfológicos (temperatura, pressão umidade, entre outros), e resultante da dinâmica dos sistemas atmosféricos de baixa troposfera. Para Barros e Zavattini (2009, p. 256), "é uma combinação passageira, efêmera, de curta duração". Almeida (2016) também ressalta que o tempo meteorológico (ou atmosférico) varia significativamente sobre a superfície da Terra, tanto de um lugar para outro quanto em um mesmo local ao longo do tempo cronológico (dia, mês ou ano). Em síntese, corresponde ao conjunto de valores dos elementos atmosféricos que, em um determinado momento e local, caracterizam o estado da atmosfera (PÉDELABORDE, 1991), sendo uma combinação passageira que interessa ao geógrafo por determinar as condições que influenciam diretamente a sociedade.

É importante destacar que a compreensão do conceito de clima decorre diretamente do conhecimento prévio sobre o tempo atmosférico, sendo que a combinação e a sucessão dessas condições podem representar padrões habituais ou excepcionais, dependendo do local ou da época do ano. A identificação e a classificação dos tipos de tempo derivam dessa dinâmica, e a frequência e a intensidade dos eventos resultantes dessas combinações são fundamentais para a análise do espaço geográfico. Embora algumas obras mais antigas apresentem a ideia de que o tempo seria o "estado médio da atmosfera em uma determinada porção de tempo e local", essa visão estatística, baseada em medidas de tendência central, não é mais adotada na Climatologia contemporânea. A respeito disso, Monteiro (2001, p. 147) observa que:

> Assim também o tempo meteorológico, gerador dos climas dos lugares não pode restringir-se às medidas dos elementos e estabelecimento de parâmetros "amaciados" nos valores "médios". Há que considerar-se que o Homem, quer como ser vivo, biológico, quer como executor de trabalhos, sobretudo no cultivo da terra, está sujeito a ritmos e ciclos bióticos que não podem ignorar o que as oscilações climáticas oferecem em situações extremas (excessos ou carências), acidentais e catastróficas, que por não serem tão habituais causam impactos e significam riscos que não podem ser ignorados.

No caso da noção de clima, é importante observar e reconhecer as diferentes correntes históricas de pensamento e perspectivas teóricas que influenciaram os estudos climáticos, resultando na definição adotada atualmente. Nesse sentido, Fontão (2021) destaca a relevância da escola brasileira de Climatologia Geográfica para as perspectivas presentes e futuras do paradigma do ritmo climático, valorizando as transformações desse importante conceito. Considerando essa trajetória histórica, Sant'Anna Neto (2003, p. 11), ao investigar a gênese e evolução da Climatologia no Brasil, assinala que, inicialmente:

> Os conceitos de tempo, clima e toda a síntese dos conhecimentos da época, elaborados por Hann, a proposta metodológica de caracterização dos climas regionais de Köppen e os ensaios teóricos de Napier Shaw, em resumo, formavam a base de todo o conhecimento científico da Climatologia e da Meteorologia no Brasil, presentes ao final do século XIX.

Sem embargo, a concepção de clima vigente ao final do século XIX e início do século XX ainda era tratada como uma abstração estatística, fortemente vinculada à noção apresentada na obra clássica do austríaco Julius Hann (1883), *Handbuch der Klimatologie* (na tradução livre, *Manual de Climatologia*) na qual o clima era definido como o estado médio da atmosfera. Cumpre destacar a relevância dessa publicação como um dos fundamentos da própria consolidação da Climatologia enquanto disciplina científica emergente naquele período (HEYMANN, 2010). Embora baseada em medidas de tendência central, essa concepção já incorporava uma compreensão voltada às relações espaciais na atmosfera, característica da chamada Climatologia Clássica, que levou o russo Wladimir Köppen (1923) a propor sua conhecida classificação climática. Ainda que de natureza essencialmente estática, tal classificação permitiu categorizar e diferenciar os diversos climas do planeta a partir de dados (e médias) dos principais elementos.

No âmbito da Geografia brasileira, destaca-se, nesse período clássico, a obra de De Martonne (1909), que, embora fundamentada na linha de pensamento de Hann, reconhece que o tempo atmosférico não variava de forma desordenada, conduzindo a uma compreensão qualitativa do clima e da relevância dos tipos de tempo. Todavia, é importante ressaltar que a literatura brasileira já apresentava obras interessantes, como a de Euclides da Cunha (1905, p. 60), que, há mais de cem anos, definia o clima como a "tradução fisiológica de uma condição geográfica", uma perspectiva intrigante,

fortemente vinculada à paisagem e que evidenciava a tentativa de demonstrar a inexistência de um meio físico uniforme no país. De maneira complementar, Afrânio Peixoto (1938, p. 15) reforçou essa concepção do clima, associando-o à saúde humana e descrevendo-o como o "artista da vida".

Com o passar do tempo, a visão clássica da Climatologia, predominante até meados do século XX, passou a ser progressivamente questionada, sobretudo a partir do desenvolvimento da meteorologia dinâmica, influenciada pelas escolas de Bergen e de Chicago (BJERKNES E SOLBERG, 1922; ROSSBY, 1939). Esses avanços contribuíram para a consolidação de fundamentos físicos e conceituais de uma Climatologia de caráter dinâmico que, por meio da análise sinótica, passou a enfatizar a atuação e a recorrência dos tipos de tempo, bem como das massas de ar e frentes associadas. É nesse contexto que o geógrafo francês Maximilien Sorre (1951), em *Les Fondements de la Géographie Humaine*, promove uma revisão geográfica do conceito de clima, atribuindo-lhe um caráter dinâmico ao defini-lo como a "série de estados atmosféricos sobre determinado lugar em sua sucessão habitual" (SORRE, 2006, p. 90).

O conceito de clima formulado na obra de Sorre, de caráter eminentemente dinâmico ao empregar a expressão "sucessão habitual" e ao afastar-se da noção de média aritmética, exerceu grande influência sobre a Climatologia francófona no início da segunda metade do século XX. Pagney (2012, p. 7) denomina esse momento de "*la phase de maturité*", no qual a Climatologia Dinâmica e a busca por explicações (e não mais por descrições) passam a integrar de forma central os estudos climáticos, a exemplo do método sintético das massas de ar e dos tipos de tempo aplicado por Pédelaborde (1991). No Brasil, as influências dessas ideias tornam-se evidentes nos estudos desenvolvidos pelo professor Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro (1971), ao propor a análise rítmica. Embora outros pesquisadores tenham se destacado nesse período, como Edmon Nimer, a contribuição de Monteiro foi decisiva ao integrar a circulação atmosférica (e os tipos de tempo) ao espaço geográfico e às suas repercussões em escala local.

A esse respeito, destaca-se que a interação entre os elementos e os fatores climáticos possibilita revelar a gênese dos fenômenos, oferecendo parâmetros consistentes para a investigação dos diversos problemas de natureza geográfica.

Nesse sentido, o paradigma do ritmo climático enfatiza a necessidade de “caracterizar e compreender processos” (MONTEIRO, 1971, p. 9). O enunciado a seguir explicita esse entendimento, bem como a relevância das escalas climáticas (MONTEIRO, 1999, p. 10):

> Quando enunciamos que o clima de um lugar (espaço) é a resultante do comportamento dinâmico mais habitual ou recorrente da atmosfera, cronologicamente desenvolvido (tempo) sobre aquele dado lugar, teremos o problema de definir que lugar é este. Ele pode variar desde o globo terrestre, passando pelos continentes, regiões, países até atingir um dado lugar.

A denominada escola brasileira de Climatologia Geográfica consolidou-se ao final do século XX (ZAVATTINI, 1998; 2004), em referência à corrente de pensamento desenvolvida no país, intrinsecamente vinculada às orientações teóricas e metodológicas do paradigma do ritmo climático e aos desdobramentos das obras do professor Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro (1971; 2015), bem como de outros pesquisadores de sua época. Contudo, o reconhecimento da produção científica nacional nessa área remonta a períodos anteriores, como evidenciado por Ribeiro (1982, p. 49), ao afirmar que Monteiro “chegou a criar uma ‘escola’ de Climatologia Dinâmica”. Ancorada em uma concepção analítica eminentemente geográfica, essa perspectiva orientou (e continua a orientar) uma comunidade crescente de pesquisadores ao longo de décadas que, embora apresente avanços ainda modestos no plano do discurso teórico, tem registrado progressos expressivos na incorporação de técnicas cada vez mais sofisticadas e no desenvolvimento de soluções inovadoras no âmbito da análise geográfica (SANT’ANNA NETO, 2014).

Paralelamente, os avanços no campo da Física e das Ciências Atmosféricas passaram a introduzir também uma visão quantificada da atmosfera, somada aos desdobramentos da modelização oriunda da Teoria Geral dos Sistemas (BERTALANFFY, 1973). A efervescência dessas ideias e a preocupação em focalizar as questões geográficas e ambientais sob uma perspectiva “sistêmica” (CHRISTOFOLETTI, 1979) revitalizaram diversas formas de abordagem científica, em especial na Geografia Física. Do mesmo modo, transformou-se a ciência em nível mundial, como no caso da Meteorologia, por meio da adoção e do aperfeiçoamento dos Modelos de Circulação Global (EDWARDS, 2011), que utilizam equações

envolvendo a dinâmica dos fluidos e a termodinâmica para a modelagem da atmosfera, subsidiadas pela evolução dos satélites e dos sistemas computacionais.

Para Pagney (2012), a superação dos impasses metodológicos reside na aceitação conjunta das diferentes abordagens da Climatologia, como a climatologia analítica, a sinótica e a modelização, bem como no reconhecimento das contribuições específicas de cada campo teórico. Aos poucos, o clima passou a ser associado aos padrões e às condições da atmosfera e do sistema climático em um determinado local/região, ao longo de extensos períodos de tempo. O período de 30 anos, ou as chamadas "normais climatológicas", passou a ser amplamente utilizado, conforme recomenda a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2017, p. 1):

> *Historical practices regarding climate normal (...) date from the first half of the twentieth century. The general recommendation is to use 30-year periods of reference. The 30-year period of reference was set as a standard mainly because only 30 years of data were available for summarization when the recommendation was first made. The early intent of normals was to allow comparison among observations from around the world. The use of normals as predictors slowly gained momentum over the course of the twentieth century.*[4]

Douguedroit (2005, p. 17) reforça essa nova concepção de clima, ao afirmar que "L'application de la théorie générale des systèmes à la climatologie fut le fondement de l'élaboration du nouveau paradigme de cette science, celui de «l'état du système climatique»"[5]. Essa concepção possibilitou avanços em alguns campos de pesquisa, como a modelagem e os estudos sobre as Mudanças Climáticas (IPCC, 2021). Ao mesmo tempo, as já conhecidas divergências entre meteorologistas e geógrafos, especificamente no ramo da Climatologia, acentuaram-se ainda mais, embora tais abordagens sejam complementares e, gradualmente, essas áreas venham se aproximando. Na Geografia Física, por exemplo, diversos autores têm

4 "As práticas históricas relativas às normais climáticas (…) remontam à primeira metade do século XX. A recomendação geral é a utilização de períodos de referência de 30 anos. O período de referência de 30 anos foi estabelecido como padrão, principalmente, porque apenas 30 anos de dados estavam disponíveis para síntese quando a recomendação foi formulada pela primeira vez. A intenção inicial das normais era permitir a comparação entre observações realizadas em diferentes partes do mundo. O uso das normais como preditores ganhou impulso gradualmente ao longo do século XX" (WMO, 2017, p. 1, Tradução Livre).

5 A aplicação da Teoria Geral dos Sistemas à Climatologia constituiu o fundamento para a elaboração do novo paradigma dessa ciência, o do 'estado do sistema climático' (DOUGUEDROIT, 2005, p. 17, Tradução Livre)

defendido de forma crescente a aproximação e a interação das variáveis ambientais com o ser humano (RHOADS, 2004).

Assim, ao valorizar a noção de sistema climático, reconhecem-se as escalas e os níveis de hierarquia organizacional do clima, de modo que a própria dinâmica de circulação dos sistemas atmosféricos contribui para a organização espacial das unidades climáticas regionais e para sua relação com a sociedade. Essa perspectiva mais recente permite apreender a variabilidade climática, bem como anomalias e tendências. Entre as definições mais utilizadas na atualidade, destaca-se a da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2025), ao definir:

> *Climate is determined by the long-term pattern of oceanic and atmospheric conditions at a location. Climate is described by statistics, such as means and extremes of temperature, precipitation, and other variables, and by the intensity, frequency, and duration of weather events. Over Earth's history, indications of climate change have been recorded in fossils and ice core samples. At one extreme, climate change can result in extended periods of heat and drought; at the other, extensive glaciation. Currently, our planet's global surface temperature is rising. This change is linked to human activities that increase the amount of greenhouse gases (e.g., carbon dioxide and methane) in the atmosphere. It is important to understand climatic processes because they have the potential to affect environmental conditions*.[6]

A variabilidade climática, relacionada às oscilações naturais dos elementos meteorológicos, pode provocar tipos de tempo habituais ou excepcionais. Na maior parte do tempo, predominam as condições habituais, caracterizadas por situações atmosféricas geralmente esperadas pela população. Contudo, as condições excepcionais, em geral associadas a eventos extremos, podem ocasionar inúmeros transtornos em diferentes localidades ou mesmo desencadear tragédias de grandes proporções, resultantes de chuvas intensas, ventos fortes, secas meteorológicas, entre outros fenômenos. Ghil e Lucarini (2020) ressaltam que o sistema climático exibe

6 "O clima é determinado pelo padrão de longo prazo das condições oceânicas e atmosféricas em um determinado local. O clima é descrito por estatísticas, como médias e extremos de temperatura, precipitação e outras variáveis, bem como pela intensidade, frequência e duração dos eventos meteorológicos. Ao longo da história da Terra, indícios de mudanças climáticas foram registrados em fósseis e em amostras de núcleos de gelo. Em um extremo, as mudanças climáticas podem resultar em períodos prolongados de calor e seca; em outro, em extensos processos de glaciação. Atualmente, a temperatura média da superfície global do planeta está em elevação. Essa mudança está associada às atividades humanas que aumentam a quantidade de gases de efeito estufa (por exemplo, dióxido de carbono e metano) na atmosfera. Compreender os processos climáticos é fundamental, pois eles têm o potencial de afetar as condições ambientais" (NOAA, 2025, Tradução Livre).

variabilidade natural em múltiplas escalas de movimento, tanto no tempo quanto no espaço, estando sujeito a diversas forçantes externas, de natureza natural e antropogênica.

Em meio às oscilações naturais do sistema climático, é possível identificar anomalias e tendências a partir de séries de dados, com base no tratamento estatístico-quantitativo das variáveis climáticas. De acordo com o Glossário do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2025), anomalia corresponde ao desvio de uma variável em relação ao seu valor médio durante um período de referência, podendo assumir valores positivos ou negativos, e constitui um dos principais fundamentos para a análise da variabilidade climática e dos eventos extremos. E tendência, por sua vez, vincula-se à identificação de padrões persistentes de comportamento em longas séries temporais de dados, sendo um parâmetro amplamente utilizado nos estudos sobre mudanças climáticas (ZAITCHIK *et al.*, 2023).

3 CONTRIBUIÇÕES DA CLIMATOLOGIA E DA METEOROLOGIA PARA A COMPREENSÃO DE FENÔMENOS CLIMÁTICOS.

A sessão precedente explorou de forma mais detalhada a definição de clima, destacando como, ao longo do tempo, esse conceito foi moldado pelas transformações e contribuições do conhecimento científico. No campo da Climatologia, embora persistam divergências já consolidadas entre meteorologistas e geógrafos (PAGNEY, 2012), ambas as áreas oferecem, dentro de suas especificidades teóricas e metodológicas, contribuições relevantes e significativas para a compreensão dos fenômenos climáticos. Cabe ressaltar que tais fenômenos apresentam uma escala de análise mais ampla e consistem em alterações significativas no padrão habitual do clima, geralmente associadas a eventos de grande impacto e à ocorrência de desastres. Nesse sentido, as contribuições da Climatologia e da Meteorologia para a compreensão dos fenômenos climáticos revelam-se complementares e indissociáveis, possibilitando sua aplicação na análise das dinâmicas ambientais e das interações sociedade–natureza.

3.1 DISTINÇÃO ENTRE CICLOS NATURAIS E IMPACTOS ANTRÓPICOS

Em primeiro lugar, é importante destacar que o sistema climático tem origem natural, e a interferência humana nesse sistema é relativamente recente, sobretudo quando o planeta é analisado sob a perspectiva geológica. Os climas da Terra resultam das interações altamente complexas na atmosfera, envolvendo inúmeras variáveis e fatores. A principal fonte de energia desse sistema é o Sol, que sustenta a vida e os processos naturais, como o ciclo da água. Dessa forma, os ciclos solares assumem relevância nesse contexto, e o papel da variabilidade da atividade solar e dos ciclos a ela associados é essencial para a interpretação do clima, como exemplificado pelo ciclo das manchas solares, pelos ciclos de Milankovitch, em especial pelos componentes de excentricidade, obliquidade e precessão dos parâmetros orbitais da Terra, bem como por outros movimentos astronômicos fundamentais para a dinâmica climática e paleoclimática em escala geológica (HAIGH, 2011).

No entanto, embora existam ciclos naturais no planeta que fogem à alçada da ação humana, nos últimos séculos o desmatamento de florestas e biomas, o aumento progressivo e recorrente da queima e do uso de combustíveis fósseis, bem como as transformações no uso e na ocupação do solo, têm resultado em impactos antrópicos significativos. Nas cidades, onde reside atualmente a maior parcela da população mundial, a influência humana sobre as dinâmicas atmosféricas torna-se cada vez mais perceptível, com destaque para a escala do Sistema Clima Urbano (MONTEIRO, 2015), evidenciada por fenômenos como a poluição do ar e a formação de ilhas de calor. Trata-se de um campo de investigação consolidado há algumas décadas, com especial destaque para as contribuições e renovações teóricas propostas por Oke (1973) no âmbito do clima urbano. Cabe ainda destacar que os eventos climáticos e meteorológicos extremos resultam de interações complexas da dinâmica atmosférica e vêm adquirindo crescente relevância por afetarem o cotidiano das comunidades e impactarem diretamente a sociedade (RAYMOND *et al.*, 2020).

De forma particular, o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono, tem sido motivo de crescente preocupação para a comunidade científica internacional e constitui um dos temas centrais dos mais

recentes relatórios do IPCC (2021), a exemplo do *Sixth Assessment Report* (AR6). Estima-se que as emissões antropogênicas de GEE sejam a principal causa do aquecimento observado no planeta desde a era pré-industrial, resultando em impactos diretos sobre o clima global. Nesse sentido, considerando os ciclos naturais e os impactos antrópicos, Martín-Chivelet (2010, p. 44) ressalta que:

> *La época más reciente (excluyendo los últimos 150 años) ha estado caracterizada por una interesante estabilidad en el ciclo del carbono, sin grandes variaciones en los flujos entre los distintos almacenes del ciclo de corto plazo. No es de extrañar que esos milenios hayan estado también definidos por una notable homogeneidad climática, la cual ha permitido e incentivado, entre otros procesos, el desarrollo de nuestra civilización. Esa estabilidad climática ha estado sin embargo modulada por pequeños cambios a escala de siglos que, por sus afinidades históricas, reciben nombres tales como Pequeña Edad de Hielo (siglos XVII a XIX), Mínimo Medieval (siglos XIV a XV), Máximo Térmico Medieval (siglos IX a XII), Periodo frío de las Edades Oscuras (siglos IV a VI), Óptimo Romano (siglos III a de C. a II d. de C), etc. (p.ej.: Martín-Chivelet et al., en prensa). Los cambios térmicos e hidrológicos de esas épocas fueron pequeños, aunque su repercusión social en muchos casos fue grande. Su origen hay que buscarlo en fluctuaciones seculares de la actividad electromagnética del sol y de la circulación oceánica global. A partir del siglo XVIII (y muy especialmente del siglo XX) a esos mecanismos debemos añadirles la perturbación del ciclo del carbono que supone la actividad humana de la era moderna: talas a escala global, quema masiva de combustibles fósiles y otros procesos industriales y sociales que inducen flujos acelerados de carbono hacia la atmósfera y el océano. Esta perturbación parece ser responsable de un calentamiento anómalo para los últimos milenios, que es el que ha tenido lugar en el siglo XX*.7

Em vista disso, os impactos, cada vez mais graves, já observados sobre os grupos humanos vêm afetando setores como a agricultura, a saúde e a economia,

7 O período mais recente (excluindo os últimos 150 anos) caracterizou-se por uma notável estabilidade do ciclo do carbono, sem grandes variações nos fluxos entre os diferentes reservatórios do ciclo de curto prazo. Não é surpreendente que esses milênios tenham sido também marcados por uma significativa homogeneidade climática, a qual permitiu e incentivou, entre outros processos, o desenvolvimento da civilização humana. Essa estabilidade climática foi, no entanto, modulada por pequenas variações em escala secular que, em função de suas afinidades históricas, recebem denominações como Pequena Idade do Gelo (séculos XVII a XIX), Mínimo Medieval (séculos XIV a XV), Máximo Térmico Medieval (séculos IX a XII), Período Frio das Idades das Trevas (séculos IV a VI), Ótimo Romano (séculos III a.C. a II d.C.), entre outros (por exemplo, Martín-Chivelet *et al.*, no prelo). As mudanças térmicas e hidrológicas desses períodos foram relativamente modestas, embora suas repercussões sociais tenham sido, em muitos casos, significativas. A origem dessas variações deve ser buscada em flutuações seculares da atividade eletromagnética solar e da circulação oceânica global. A partir do século XVIII, e de forma mais intensa no século XX, a esses mecanismos soma-se a perturbação do ciclo do carbono decorrente das atividades humanas da era moderna, como o desmatamento em escala global, a queima massiva de combustíveis fósseis e outros processos industriais e sociais que induzem fluxos acelerados de carbono em direção à atmosfera e aos oceanos. Essa perturbação parece ser responsável por um aquecimento anômalo nos últimos milênios, observado de forma mais evidente ao longo do século XX (Martín-Chivelet, 2010, p. 44).

demandando a adoção de medidas urgentes, a ponto de uma parcela significativa da comunidade científica já caracterizar o momento atual como uma condição de emergência climática (RIPPLE *et al.*, 2022). No contexto contemporâneo das mudanças climáticas, as projeções e os cenários indicam que, no futuro, os eventos extremos tendem a se tornar mais frequentes e intensos (IPCC, 2021). Soma-se a isso o fato de que a maior recorrência, intensidade e magnitude dos impactos desses processos são registradas, sobretudo, em países cuja configuração geográfica é marcada por climas chuvosos, relevo mais suscetível e grandes contingentes populacionais vivendo em condições de pobreza ou extrema pobreza, isto é, países do Sul Global, em razão da elevada vulnerabilidade socioambiental de suas populações (NGCAMU, 2023).

Dessa forma, evidencia-se a necessidade crescente e concreta de o ser humano reconhecer e valorizar os aspectos naturais do planeta, compreendendo a importância da educação, do planejamento, da gestão e do manejo desses recursos e dinâmicas na organização do espaço geográfico, com vistas à melhoria da qualidade de vida e à própria sobrevivência. Os ciclos naturais devem ser investigados e monitorados; contudo, é igualmente fundamental considerar os impactos antrópicos e suas consequências diretas sobre o planeta, nas diferentes escalas do clima. Por fim, Leonardo Boff (2015) apresenta uma reflexão pertinente sobre essa questão, ao afirmar que o mito do progresso e do crescimento ininterrupto e ilimitado precisa ser questionado, em favor de uma nova ordem ecológica e de uma sociedade mais justa e igualitária.

4 INTERAÇÕES ENTRE ATMOSFERA, HIDROSFERA E BIOSFERA NO SISTEMA CLIMÁTICO GLOBAL E REGIONAL

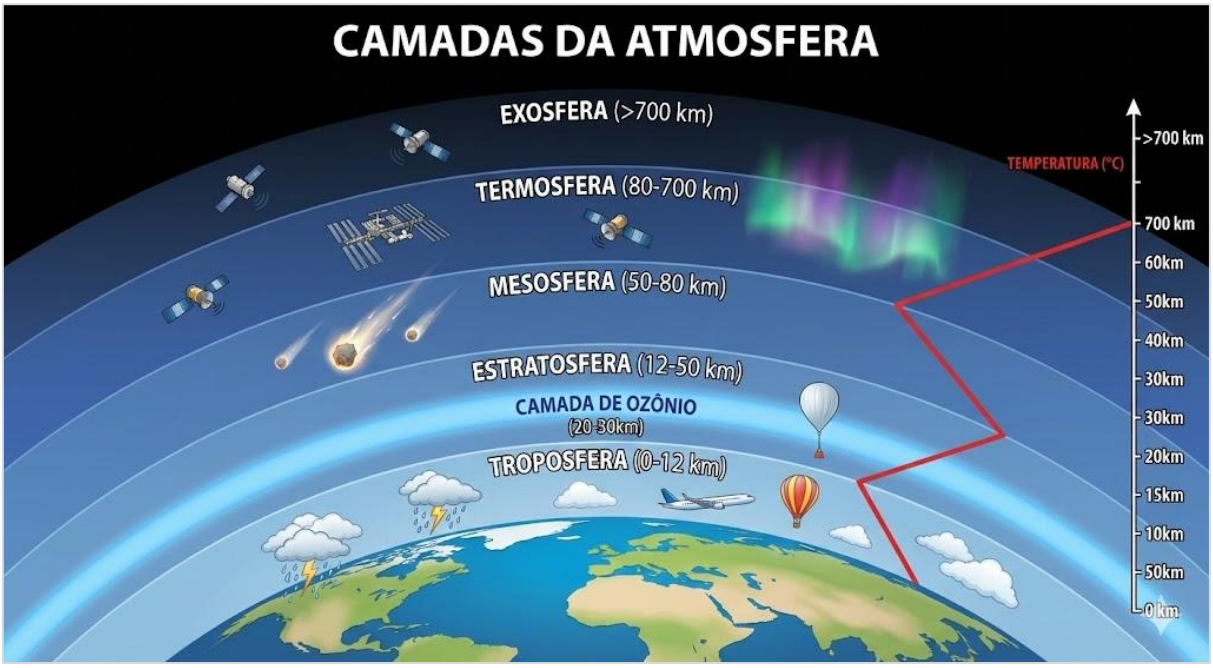
A compreensão contemporânea do clima e das mudanças climáticas exigem uma análise integrada do Sistema Terrestre, entendido não apenas como a soma de componentes físicos, mas como uma complexa rede de processos biogeoquímicos interdependentes. Entre os subsistemas que compõem essa arquitetura, destacam-se a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera, cuja interação contínua sustenta e modula o clima em escalas globais e regionais (STEFFEN *et al.*, 2020; IPCC, 2025). Esses

três componentes mantêm fluxos dinâmicos de energia, matéria e *momentum*, operando em um regime de acoplamento onde perturbações em um deles, como a alteração na composição química do ar, reverberam imediatamente na estabilidade dos demais (AHRENS; HENSON, 2021).

4.1 A ATMOSFERA: ESTRUTURA E DINÂMICA

A atmosfera, camada gasosa que envolve o planeta, constitui o meio onde se desenvolve a maior parte dos processos climáticos observáveis. Composta majoritariamente por nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), além de vapor d'água, aerossóis e gases traço fundamentais para o efeito estufa, ela atua como um fluido em constante movimento, redistribuindo calor do equador para os polos (VAREJÃO-SILVA, 2006). Sua organização não é homogênea e a atmosfera estrutura-se verticalmente em camadas distintas, definidas principalmente pelo gradiente vertical de temperatura (Figura 1). Essa compartimentação térmica é fundamental, pois define a estabilidade do ar e o modo como a energia e a massa são distribuídas.

Figura 1 – Camadas da atmosfera



Fonte: DIAS *et al.*, 2007. Organização: Autores, 2025.

4.1.1 Troposfera

A troposfera, camada adjacente à superfície, concentra entre 80% e 90% de toda a massa atmosférica e a quase totalidade do vapor d'água. Devido à expansão térmica e à rotação terrestre, sua espessura varia de 16 km no equador a menos de 8 km nos polos. Nesta camada, a temperatura decresce com a altitude cerca de 6,5 °C/km, conforme o gradiente térmico vertical. A dinâmica troposférica é regida pela convecção: o aquecimento da superfície gera correntes verticais que transportam calor latente, processo fundamental para o ciclo hidrológico (Vallero, 2014).

4.1.2 Estratosfera e a Camada de Ozônio

Acima da tropopausa, estende-se a estratosfera (até cerca de 50 km). Diferente da camada inferior, aqui a temperatura aumenta com a altitude e ocorre uma inversão térmica devido à absorção da radiação ultravioleta (UV) pelo ozônio (O_3). A "Camada de Ozônio" atua como filtro biológico e regulador térmico. A formação de nuvens é rara, exceto em condições extremas nos polos (WMO, 2022).

4.1.3 A Alta Atmosfera

Nas camadas superiores da atmosfera (Mesosfera, Termosfera e Exosfera), a densidade do ar é ínfima. A mesosfera caracteriza-se pelo mínimo absoluto de temperatura, que pode atingir cerca de −90 °C, enquanto a termosfera apresenta elevadas temperaturas cinéticas em decorrência da absorção de radiação solar de alta energia. Essa complexa arquitetura vertical não atua apenas como um meio físico estático, mas configura-se como um sistema termodinâmico ativo. A composição química e a densidade dessas camadas, conforme descrito anteriormente, determinam a permeabilidade da atmosfera à radiação solar incidente e à radiação terrestre emitida (Varejão-Silva, 2006). É essa interação seletiva entre os gases atmosféricos e os fluxos de energia que estabelece as condições necessárias à habitabilidade do planeta, regulando a temperatura por meio de mecanismos de balanço radiativo, os quais serão detalhados a seguir.

4.2 O EFEITO ESTUFA E O BALANÇO RADIATIVO

A atmosfera regula a temperatura planetária por meio do efeito estufa. Determinados gases são transparentes à radiação solar de ondas curtas, mas apresentam opacidade à radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Ao reterem parte dessa energia, esses gases mantêm a temperatura média global em torno de 15 °C. O balanço energético atual, contudo, evidencia um desequilíbrio positivo, estimado entre +0,5 e +1,0 W/m², indicando uma retenção excessiva de calor associada ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2021; 2025). Embora o nitrogênio e o oxigênio sejam os componentes mais abundantes da atmosfera, a regulação climática depende fundamentalmente dos gases traço (Tabela 1). O aumento histórico das concentrações de dióxido de carbono, principal vetor do aquecimento global, e de metano tem intensificado o efeito estufa, promovendo alterações nos padrões globais de temperatura e precipitação (FORSTER *et al.*, 2023).

Tabela 1 – Composição da atmosfera e gases traço relevantes

Componente	Símbolo	Concentração por Volume (%)	Concentração (ppm)
Nitrogênio	N_2	78,08%	780.800
Oxigênio	O_2	20,95%	209.500
Argônio	Ar	0,93%	9.300
Dióxido de Carbono	CO_2	0,04%	422 (Média 2024)*
Neônio	Ne	0,00%	18,2
Hélio	He	0,00%	5,2
Metano	CH_4	0,00%	1,9

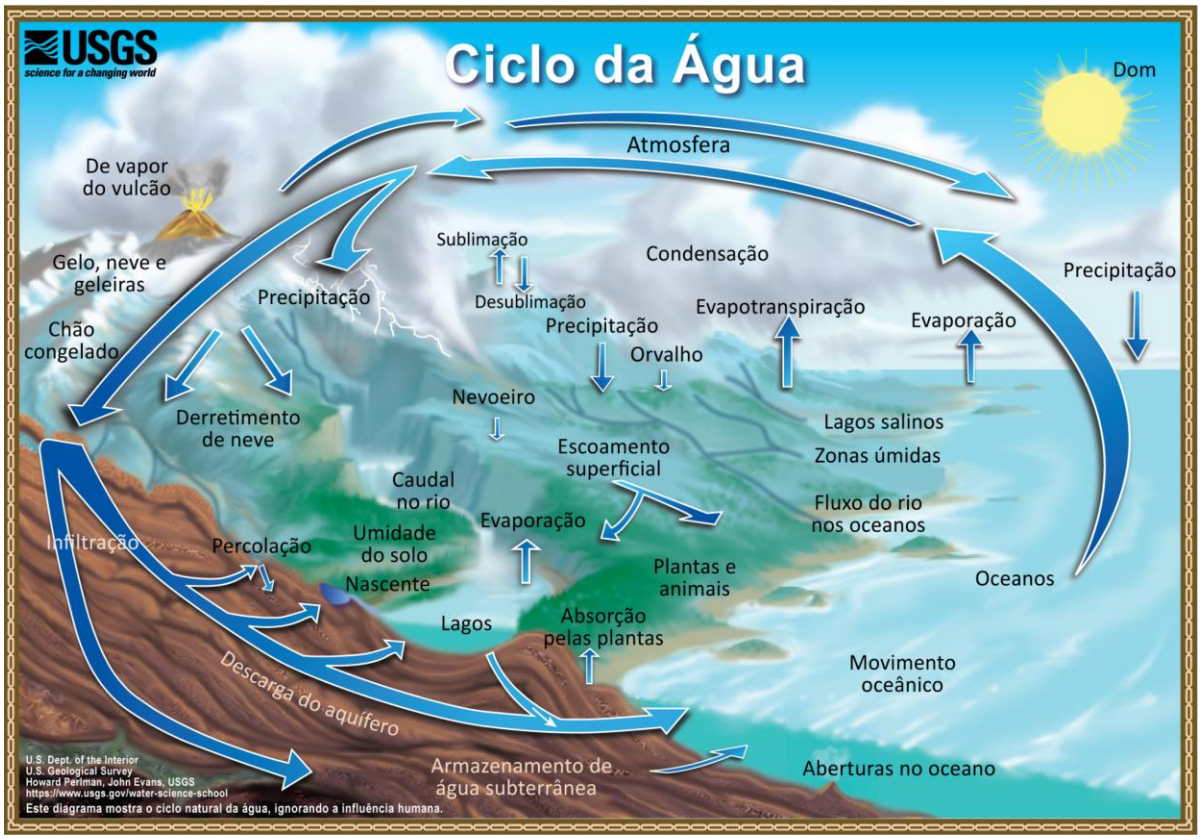
Fonte: Adaptado de IPCC (2021; 2025); NOAA (2025). Elaborado pelos autores.

4.3 A HIDROSFERA: RESERVATÓRIO DE ENERGIA

A hidrosfera compreende toda a água presente no sistema terrestre, incluindo oceanos, geleiras e corpos hídricos continentais. Embora cubra cerca de 71% da superfície do planeta, aproximadamente 97,5% desse volume corresponde à água salgada. Os oceanos atuam como o principal “volante térmico” da Terra, em razão de sua elevada inércia térmica, tendo absorvido cerca de 90% do excesso de calor acumulado no sistema terrestre nas últimas décadas (VON SCHUCKMANN *et al.*, 2023). Nessa perspectiva, destaca-se que a interação oceano–atmosfera constitui um dos pilares do balanço de energia do sistema climático, pois envolve a troca contínua de calor e umidade, desempenhando papel fundamental na regulação da temperatura global e, consequentemente, influenciando diretamente a dinâmica e a circulação atmosférica.

O ciclo hidrológico conecta a hidrosfera à atmosfera, promovendo o transporte de energia por meio do calor latente. Além disso, os oceanos funcionam como importantes sumidouros de carbono, absorvendo aproximadamente 25% das emissões antropogênicas de dióxido de carbono (CO_2), o que, por outro lado, resulta no processo de acidificação oceânica, com implicações diretas para os ecossistemas marinhos. O ciclo hidrológico (Figura 2) expressa, portanto, a integração dinâmica entre hidrosfera e atmosfera. Processos como evaporação, condensação e precipitação não apenas redistribuem massa na forma de água, mas também transportam energia na forma de calor latente. A evaporação oceânica transfere energia da superfície para a atmosfera; quando o vapor d’água se condensa e forma nuvens, esse calor é liberado, impulsionando tempestades e a circulação geral da atmosfera. Variações na temperatura da superfície do mar (TSM) modificam essa injeção de energia no sistema climático, influenciando diretamente a frequência e a severidade de eventos extremos, como secas e inundações (TRENBERTH *et al.*, 2009; IPCC, 2025).

Figura 2 – Ciclo da Água e fluxos entre reservatórios



Fonte: U.S. Geological Survey (USGS).

4.4 A BIOSFERA: COMPLEXIDADE E EVOLUÇÃO

A biosfera não se define apenas como o espaço físico habitado pelos seres vivos, mas como um sistema termodinâmico global onde a vida interage com a litosfera, a hidrosfera e a atmosfera, trocando continuamente energia e matéria. Para Moreira e Sene (2015), ela funciona como um "ecossistema global" autotrófico e heterotrófico, integrando processos biológicos essenciais, fotossíntese, respiração e decomposição, que regulam a química planetária. Por ser dinâmica, a biosfera responde a ciclos sazonais e de longo prazo, modulando a produtividade primária e os fluxos biogeoquímicos que sustentam a habitabilidade da Terra.

A história da biosfera confunde-se com a história da atmosfera. Sua evolução teve início há cerca de 3,5 bilhões de anos, com o surgimento de organismos unicelulares (cianobactérias). A atividade fotossintética desses seres primitivos desencadeou o "Grande Evento de Oxigenação", modificando radicalmente a atmosfera redutora primitiva. A liberação progressiva de oxigênio molecular (O_2)

permitiu a formação da camada de ozônio (O_3) na estratosfera, um filtro de radiação ultravioleta indispensável para que a vida pudesse colonizar os continentes (Smil, 2003; Lenton, 2016). Portanto, a relação biosfera-atmosfera é de coevolução: a vida alterou o ambiente que, por sua vez, permitiu a diversificação da vida.

Epistemologicamente, o entendimento dessa esfera passou por diversas fases:

- **1866**: Ernst Haeckel cunha o termo "ecologia", focando nas relações entre organismos e ambiente.
- **1875**: Eduard Suess introduz o termo "biosfera" em um contexto geológico.
- **1926**: Vladimir Vernadsky, em sua obra seminal *A Biosfera*, revoluciona a ciência ao propor que a vida é uma força geológica ativa, capaz de transformar a crosta terrestre.
- **1935**: Tansley consolida a visão funcional com o conceito de "ecossistema", antecipando a abordagem sistêmica atual.

A partir da década de 1980, o sensoriamento remoto transformou nossa capacidade de observação. Satélites modernos permitem monitorar não apenas a cobertura vegetal, mas a "respiração" do planeta: hoje é possível quantificar a Fluorescência Induzida pelo Sol (SIF) para estimar a fotossíntese global e rastrear as concentrações de CO_2 com alta precisão. Segundo Moreira e Sene (2015), e relatórios recentes do Global Carbon Project (2023), essas ferramentas são cruciais para distinguir os fluxos naturais de carbono daqueles emitidos pela combustão de fósseis e queimadas.

4.5 DINÂMICA INTEGRADA: DO GLOBAL AO REGIONAL

A compartimentação didática entre as esferas terrestres, embora útil para o ensino, revela-se insuficiente frente à complexidade da Climatologia contemporânea. Sob a ótica da Ciência do Sistema Terrestre, entende-se que o clima opera através de fluxos termodinâmicos acoplados, onde a estabilidade planetária emerge da contínua troca de energia e matéria entre esses reservatórios.

4.5.1 Mecanismos Globais

A interação oceano-atmosfera é o motor da variabilidade climática. A hidrosfera armazena calor e o libera gradualmente via evaporação, impulsionando a Circulação Geral da Atmosfera (TRENBERTH, 2022). Simultaneamente, a biosfera atua como regulador químico. A ruptura desses processos compromete a estabilidade do sistema. Essa energia armazenada na hidrosfera é liberada gradualmente para a atmosfera através da evaporação. Quando o vapor d'água se condensa para formar nuvens, o calor latente é liberado, aquecendo a troposfera e impulsionando a Circulação Geral da Atmosfera. Portanto, a hidrosfera não apenas responde ao clima, mas fornece a energia térmica que movimenta os sistemas meteorológicos (BARRY; CHORLEY, 2010).

Simultaneamente, a biosfera atua como um regulador químico da atmosfera. O ciclo do carbono global depende da capacidade da vegetação terrestre e do fitoplâncton marinho de sequestrar CO_2. Estimativas do *Global Carbon Budget* indicam que a biosfera terrestre absorve cerca de 31% das emissões antropogênicas anuais, enquanto os oceanos absorvem cerca de 25% (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2023). A ruptura desses processos, seja pelo aquecimento dos oceanos (que reduz a solubilidade do gás) ou pelo desmatamento, compromete a capacidade do sistema de amortecer o efeito estufa (IPCC, 2021).

4.5.2 América do Sul: Bomba Biótica e Rios Voadores

Na América do Sul, a configuração geográfica favorece uma interação singular entre a biosfera equatorial e a hidrosfera atmosférica. A Floresta Amazônica desempenha um papel ativo na termodinâmica continental, funcionando muito além de uma simples cobertura do solo. Através da evapotranspiração, a floresta transfere para a atmosfera um volume colossal de água, estimado em 20 trilhões de litros por dia (NOBRE, 2014). Segundo a teoria da Bomba Biótica, proposta por Makarieva e Gorshkov (2007), essa intensa taxa de transpiração mantém a pressão atmosférica baixa sobre a floresta, atraindo continuamente os ventos úmidos (Alísios) do Oceano Atlântico para o interior do continente. Sem a presença da floresta, o fluxo de umidade

penetraria menos no continente, tornando o clima interiorano significativamente mais seco.

Essa umidade reciclada pela biosfera interage com a topografia da Cordilheira dos Andes. A barreira orográfica desvia o fluxo de vapor para o sul, alimentando os Jatos de Baixos Níveis (JBN), popularmente conhecidos como "Rios Voadores" (MARENGO *et al.*, 2004). Este mecanismo de teleconexão continental transporta a umidade equatorial para as latitudes subtropicais, sendo vital para a manutenção dos regimes pluviométricos na Bacia do Prata e no Centro-Sul do Brasil.

4.6 BRASIL E AS TELECONEXÕES: O PAPEL DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO

O clima brasileiro é fortemente modulado pelas condições da hidrosfera oceânica adjacente e remota, por meio de padrões de teleconexão oceano–atmosfera (REBOITA *et al.*, 2010). Existem diversos modos de variabilidade climática de grande escala que influenciam o planeta e, em particular, o Hemisfério Sul por meio de teleconexões atmosféricas, entre os quais se destacam: El Niño-Oscilação Sul (ENOS), Dipolo do Oceano Índico (IOD), Atlantic Meridional Mode (AMM), Oscilação Madden–Julian (MJO), Modo Anular do Sul ou Oscilação Antártica (SAM ou OA) e o padrão Pacífico-América do Sul (Pacific South American Pattern, ou PSA). Neste tópico, optou-se por destacar o ENOS, bem como mencionar a importância da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se configura predominantemente durante o período de primavera–verão no Brasil.

4.6.1 O Fenômeno *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS)

O ENOS representa o exemplo mais clássico de variabilidade interanual decorrente da interação oceano-atmosfera no Pacífico Equatorial. De forma geral, trata-se de um fenômeno natural e amplamente conhecido no planeta, e que altera de forma significativa os padrões de temperatura da superfície do mar, da circulação atmosférica e influencia diretamente diversas regiões, como é o caso da América do Sul (CANE, 2005). Seus padrões e as anomalias da temperatura da superfície do mar

são monitorados continuamente e, em função de suas oscilações, o sistema pode apresentar uma condição de equilíbrio, denominada fase neutra, ou manifestar-se nas fases El Niño, caracterizada pelo aquecimento anômalo, e La Niña, associada ao resfriamento anômalo das águas superficiais.

- ***El Niño:*** O aquecimento anômalo das águas do Pacífico central altera a Circulação de Walker, provocando movimentos subsidentes (descida de ar) sobre a Amazônia e o Nordeste, o que inibe a formação de nuvens e causa secas severas. Simultaneamente, o Jato Subtropical é intensificado e bloqueado sobre o Sul do Brasil, gerando excesso de precipitação e tempestades severas (GRIMM *et al.*, 2000).

- ***La Niña*****:** Gera o padrão inverso, frequentemente associado a estiagens prolongadas na Região Sul do Brasil e aumento da pluviosidade no Norte e Nordeste.

4.6.2 A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

No verão, a interação entre a umidade continental (proveniente da Amazônia) e a circulação do Atlântico Sul forma a ZCAS, um canal de nebulosidade persistente que se estende do Noroeste ao Sudeste do Brasil. A posição e a intensidade da ZCAS são moduladas pela Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico (AMBRIZZI; FERRAZ, 2015). Quando a ZCAS se estabelece, ela garante o abastecimento dos principais reservatórios hidrelétricos do país; sua falha ou deslocamento pode resultar em crises hídricas severas no Sudeste e Centro-Oeste.

4.7 O CASO DAS INTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO ESTADO DO PARANÁ

O estado do Paraná ocupa uma posição singular no sistema climático sul-americano, situada em uma zona de transição climática (latitude 22ºS a 26ºS), onde os sistemas tropicais e polares interagem frequentemente (NITSCHE *et al.*, 2019), repercutindo em um dinamismo característico da circulação atmosférica e na constante alternância de sistemas atuantes na área (massas de ar e frentes). Esta localização torna o estado altamente sensível às flutuações da atmosfera, da hidrosfera e da biosfera.

4.7.1 Dinâmica Atmosférica: A Zona de Transição

Segundo a classificação climática adaptada por Nitsche *et al.* (2016), o Paraná é o palco do confronto entre a Massa Polar Atlântica (fria e seca) e a Massa Tropical Atlântica/Continental (quente e úmida).

- **No verão:** Predomina a influência da hidrosfera tropical, com a umidade trazida da Amazônia pelos Jatos de Baixos Níveis e a atuação eventual da ZCAS, provocando chuvas convectivas volumosas.

- **No inverno:** O sistema é dominado pela dinâmica extratropical, com a passagem frequente de frentes frias e a formação de geadas, fenômenos condicionados pela interação entre a atmosfera fria e o relevo (orografia) do planalto paranaense.

4.7.2 Impactos da Variabilidade Oceânica na Agricultura Paranaense e nos Recursos Hídricos

É importante destacar que o Paraná apresenta elevada biodiversidade, potencial agrícola e uma rede hidrográfica rica e diversificada (MAACK, 2017), com destaque para seu expressivo potencial energético e para extensas drenagens, como o rio Paraná e seus principais tributários na região (rios Paranapanema, Ivaí, Piquiri e Iguaçu). No entanto, para fins de planejamento, o estado encontra-se sujeito às variabilidades atmosféricas, cuja dinâmica excepcional tem potencial para repercutir na ocorrência de enchentes, inundações, alagamentos, deslizamentos de terra e, em alguns casos, secas intensas, provocadas por eventos extremos hidroclimáticos. A tendência de aumento das chuvas intensas e da ocorrência de eventos potencialmente impactantes, que inclusive já vem sendo observada (QUADROS *et al.*, 2019), configura um importante sinal de alerta no atual contexto de emergência climática.

A agricultura do Paraná, base econômica do estado, é profundamente dependente das teleconexões oceânicas e da variabilidade das chuvas. Estudos regionais demonstram que a produtividade das safras de verão (soja e milho) está correlacionada às fases do ENOS (GRIMM, 2009). Anos de *El Niño* tendem a trazer

chuvas abundantes e bem distribuídas para o estado, embora aumentem o risco de erosão do solo e doenças fúngicas devido ao excesso de umidade. Por outro lado, anos de *La Niña* representam o maior risco climático para o Paraná, historicamente associados a secas severas e irregulares que quebram a produção agrícola e ameaçam o abastecimento urbano, como observado na crise hídrica de 2020-2021 (ANA, 2021).

Ademais, é importante ressaltar que o Paraná abriga grandes corpos hídricos artificiais, como o reservatório de Itaipu e as represas do Rio Iguaçu. A interação entre essas massas de água e a atmosfera local pode gerar microclimas específicos, alterando a umidade relativa e a amplitude térmica nas áreas adjacentes (CARVALHO; STIPP, 2004). Além disso, a vazão dos rios paranaenses depende da preservação da biosfera (Mata Atlântica e Cerrado) nas bacias a montante, evidenciando que a segurança energética do estado está conectada à integridade dos ecossistemas em escalas interestaduais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo buscou evidenciar a importância dos conceitos de tempo e clima, cuja trajetória acompanha os avanços do conhecimento científico e das discussões ambientais contemporâneas. A variabilidade climática e os eventos extremos assumem papel de destaque no cenário atual, no qual a sociedade demanda, de forma crescente, estratégias de adaptação, mitigação e resiliência diante dos problemas cuja gênese se encontra no dinamismo da atmosfera, mas cujos efeitos são intensificados pelos processos urbanos e sociais. Os impactos antrópicos e o atual contexto de emergência climática configuram-se como um alerta às populações e impõem desafios crescentes à Climatologia, exigindo abordagens cada vez mais aprofundadas para a compreensão dos fenômenos climáticos e de suas repercussões espaciais.

Ademais, a análise integrada do sistema climático demonstra que atmosfera, hidrosfera e biosfera não atuam isoladamente, mas como uma rede de fluxos interdependentes de energia e matéria. Na América do Sul, essa conexão revela-se vital: a segurança hídrica do Centro-Sul depende diretamente do acoplamento entre a umidade amazônica ("rios voadores") e a circulação atmosférica, modulada por

teleconexões oceânicas como o ENOS. Para o Paraná, situado em uma zona de transição climática, essa interdependência possui implicações econômicas imediatas. A produtividade agrícola e a geração de energia no estado estão subordinadas tanto a fenômenos globais quanto à preservação dos ecossistemas locais e distantes. Conclui-se, assim, que a resiliência socioeconômica frente às mudanças climáticas exige uma gestão territorial sistêmica, onde a conservação ambiental constitui um imperativo estratégico para a manutenção dos serviços essenciais à sociedade.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D.; HENSON, R. **Meteorology Today:** An Introduction to Weather, Climate, and the Environment. 12. ed. Boston: Cengage Learning, 2021.

ALMEIDA, Hermes Alves de. **Climatologia aplicada à Geografia**. Campina Grande-PB: EdUEPB, 2016.

AMBRIZZI, T.; FERRAZ, S. E. T. Uma visão sobre a precipitação na América do Sul e no Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, p. 77-88, 2015. Edição Especial.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2021.

AYOADE, Johnson Olaniyi. **Introdução à Climatologia para os trópicos**. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

BARROS, Juliana Ramalho; ZAVATTINI, João Afonso. Bases conceituais em Climatologia Geográfica. **Mercator**, v. 8, n. 16, p. 255-261, 2009.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosphere, Weather and Climate**. 9. ed. London: Routledge, 2010.

BERTALANFFY, L. **Teoria geral dos sistemas**. Tradução brasileira de Francisco M. Guimarães. Petrópolis-RJ: Vozes, 1973.

BJERKNES, Jakob; SOLBERG, Halvor. **Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation**. Grondahl, 1922.

BOFF, Leonardo. **Ecologia, grito da Terra, grito dos pobres**: dignidade e direitos da Mãe Terra. Petrópolis: Vozes, 2015.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: Ministério da Educação, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/mec/pt-br/bncc. Acesso em: 03 nov. 2025.

CANE, Mark A. The evolution of El Niño, past and future. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 230, n. 3-4, p. 227-240, 2005.

CARVALHO, Silvia Méri; STIPP, Nilza Aparecida Freres. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: uma proposta de classificação qualitativa. **Geografia**, Londrina, v. 13, n. 1, p. 57-72, jan./jun. 2004.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Análise de sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, Editora da Universidade de São Paulo, 1979.

CUNHA, Euclides. da. **Os sertões**: campanha de Canudos. 3ª edição. Rio de Janeiro; São Paulo: Editora Laemmert C., 1905.

DE MARTONNE, E. **Traité de géographie physique**. Paris: Armand Colin, 1909.

DIAS, M. A. F. S. *et al.* Interações entre Biosfera, Atmosfera e o Clima. *In*: **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.

DOUGUEDROIT, A. La 'révolution scientifique' de la Climatologie pendant la seconde moitie du XXéme siecle: le paradigme de l'état du 'systeme climatique'. **Annales de l'Association Internationale de Climatologie**, v. 2, 2005. p. 11-25

EDWARDS, N. Um planeta Habitável. In: COCKELL, C. (org). **Sistema Terra-Vida, uma introdução**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FONTÃO, Pedro Augusto Breda. A Escola Brasileira de Climatologia Geográfica: perspectivas atuais e futuras no paradigma do ritmo climático. In: GUIMARÃES, A. R.; FONSECA, R. G.; FERNANDES, S. (Org.). **Perspectivas geográficas**. 1ed. Ituiutaba - MG: Editora Barlavento, 2021, v. 1, p. 10-28.

FORSTER, P. M. *et al.* Indicators of Global Climate Change 2022. **Earth System Science Data**, v. 15, p. 2295–2327, 2023.

FRIEDLINGSTEIN, P. *et al.* Global Carbon Budget 2023. **Earth System Science Data**, v. 15, p. 5301-5369, 2023.

GHIL, Michael; LUCARINI, Valerio. The physics of climate variability and climate change. **Reviews of Modern Physics**, v. 92, n. 3, p. 035002, 2020.

GLOBAL CARBON PROJECT. **Global Carbon Project**: Homepage. [S.l.], 2025. Disponível em: https://www.globalcarbonproject.org/. Acesso em: 02 dez. 2025.

GRIMM, A. M. *et al.* Climate Variability in South America Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 13, p. 35-58, 2000.

GRIMM, A. M. Clima da Região Sul do Brasil. *In*: CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

HAIGH, Joanna. Solar influences on climate. In: Grantham Institute for Climate Change. **Briefing papers and notes**. p. 606-610, 2011. Disponível em:

https://www.imperial.ac.uk/grantham/publications/briefing-papers/. Acesso em: 10 nov. 2025.

HANN, J. F. **Handbuch der Klimatologie**. Stuttgart: J. Engelhorn, 1883.

HEYMANN, M. The Evolution of Climate Ideas and Knowledge. **Wiley Interdisciplinary Reviews**: Climate Change, v. 1, n. 1, p. 581-597, jul. 2010.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/. Acesso em: 20 nov. 2025.

KÖPPEN, W. P. **Die klimate der erde**: Grundriss der klimakunde. Walter de Gruyter, 1923.

LENTON, T. M. **Earth System Science:** A Very Short Introduction. Oxford: Oxford University Press, 2016.

MAACK, R. **Geografia Física do estado do Paraná**. Ponta Grossa-PR: Editora UEPG, 4.ed., 2017.

MAKARIEVA, A. M.; GORSHKOV, V. G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1013–1033, 2007.

MARENGO, J. A. *et al.* Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2261-2280, 2004.

MOREIRA, J. C.; SENE, E. de. **Geografia Geral e do Brasil**. 3. ed. São Paulo: Scipione, 2015.

MARTÍN-CHIVELET, Javier. Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. **Enseñanza de las ciencias de la Tierra**, v. 18, p. 33-46, 2010.

MONTEIRO, C. A. F. A análise rítmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho. Climatologia, n. 1, p. 1-21, 1971.

MONTEIRO, C. A. F. O estudo geográfico do clima. **Cadernos Geográficos**, v. 1, n. 1, p. 7-72, 1999.

MONTEIRO, C. A. F. De tempos e ritmos: entre o cronológico e o meteorológico para a compreensão geográfica dos climas. **Geografia**, v. 26, n. 3, p. 131-154, 2001.

MONTEIRO, C. A. F. (Org.). **A construção da Climatologia Geográfica no Brasil**. 1ª Edição. Campinas, SP: Editora Alínea, 2015.

NGCAMU, Bethuel Sibongiseni. Climate change effects on vulnerable populations in the Global South: a systematic review. **Natural Hazards**, v. 118, n. 2, p. 977-991, 2023.

NITSCHE, P. R. *et al.* **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2019.

NOAA. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. Global Monitoring Laboratory, 2024. Disponível em: https://gml.noaa.gov. Acesso em: 01 dez. 2025.

NOBRE, A. D. **O Futuro Climático da Amazônia:** Relatório de Avaliação Científica. São José dos Campos: ARA/CCST-INPE/INPA, 2014.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, n. 8, p. 769-779, 1973.

PAGNEY, P. La climatologie française, la modélisation des climats et le réchauffement climatique: la climatologie en question. **EchoGéo**, n. 22, 2012.

PÉDELABORDE, P. **Introduction a l'étude scientifique du climat**. Paris: Société d'Édition d'Enseignement Supérieur, 1991.

PEIXOTO, A. **Clima e saúde**: introdução bio-geográfica à civilização brasileira. São Paulo: Brasiliana, 1938.

QUADROS, Luciana Espindula de. *et al.* Rainfall trends for the State of Paraná: present and future climate. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 2, p. e2258, 2019.

RAYMOND, Colin *et al.* Understanding and managing connected extreme events. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 7, p. 611-621, 2020.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

RHOADS, B. L. Whither physical geography?. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 94, n. 4, p. 748-755, 2004.

RIBEIRO, C. M. O desenvolvimento da climatologia dinâmica no Brasil. **Revista Geografia e Ensino**, Belo Horizonte, v. 1, n. 2, p. 48-59, 1982.

RIPPLE, W. J. *et al.* World scientists' warning of a climate emergency 2022. **BioScience**, v. 72, n. 12, p. 1149-1155, 2022

ROSSBY, C. G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. **Journal of Marine Research**, v. 2, p. 38-55, 1939.

SANT'ANNA NETO, Joao Lima. A Gênese da climatologia no Brasil: O despertar de uma ciência. **Geografia**, v. 28, n. 1, p. 5-27, 2003.

SANT'ANNA NETO, J. L. Medir o tempo, ler, interpretar e sentir o clima: uma climatologia a serviço do entendimento das relações entre os homens e seus lugares, entre as sociedades e seus territórios. In: SILVA, C. A.; FIALHO, E. S.; STEINKE, E. T. **Experimentos em Climatologia Geográfica**. Dourados-MS: UFGD, 2014. p. 23-32.

SMIL, V. **The Earth's Biosphere**: evolution, dynamics, and change. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2003.

SORRE, M. Les fondements de la Géographie Humaine. Tome: I- Lês foundements biologiques Essai d'une écologie de l'homme. **Livre I - Le climat et l'homme. Chp Ier Le Climat**. Paris: Librairie Armand Colin, 1951. p. 13-43.

SORRE, M. Objeto e método da climatologia. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 18, p. 89-94, 2006.

STEFFEN, W. *et al.* The emergence and evolution of Earth System Science. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 54–63, 2020.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 3, p. 311-324, 2009.

TRENBERTH, K. E. The Changing Flow of Energy Through the Climate System. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

USGS – U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **The Water Cycle**. Reston, VA: U.S. Department of the Interior, 2019. Disponível em: https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-cycle-adults-advanced. Acesso em: dez. 2025.

VALLERO, D. A. **Fundamentals of Air Pollution**. 5. ed. New York: Academic Press, 2014.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Recife: Versão Digital, 2006.

VON SCHUCKMANN, K. *et al.* Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go? **Earth System Science Data**, v. 15, p. 1675–1709, 2023.

WMO. **Statement on the State of the Global Climate in 2017**. Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 2017.

WMO. **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022**. Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 2022.

ZAITCHIK, Benjamin F. *et al.* Wetting and drying trends under climate change. **Nature Water**, v. 1, n. 6, p. 502-513, 2023.

ZAVATTINI, J. A. A Climatologia Geográfica Brasileira, o Enfoque Dinâmico e a Noção de Ritmo Climático. **Geografia** (Rio Claro), v. 23, n. 3, p. 5-24, 1998.

ZAVATTINI, J. A. **Estudos do Clima no Brasil**. Campinas-SP: Editora Alínea, 2004.

PEDOLOGIA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: GÊNESE, DEGRADAÇÃO E IMPACTOS ECONÔMICOS NA AGRICULTURA BRASILEIRA

Anderson Roberto Benedetti – Centro Universitário Internacional Uninter[1]
Paloma Estefane Santana Ferreira – Universidade Federal do Paraná[2]
Thalia Alves Ferreira – Universidade Federal do Paraná[3]

1 INTRODUÇÃO

A Pedologia, termo derivado do grego *pedon* (solo ou terra), constitui o ramo das Ciências Agrárias dedicado ao estudo do solo em seu ambiente natural, investigando sua gênese, evolução, morfologia e classificação. Embora a percepção sobre a fertilidade das terras remonte aos primórdios da agricultura no Crescente Fértil, a compreensão do solo como um corpo natural, dinâmico e organizado consolidou-se apenas no final do século XIX. O grande divisor de águas científico foi o paradigma estabelecido por Vasily Dokuchaev (1883) ao propor que o solo é o resultado da interação complexa de fatores naturais ao longo do tempo, o processo de pedogênese, Dokuchaev revolucionou o pensamento acadêmico, conferindo ao solo uma identidade própria e essencial na paisagem.

Historicamente, a relação humana com esse recurso foi transformada pela Revolução Verde a partir da década de 1960. Impulsionado pela necessidade de alimentar uma população em crescimento acelerado, esse movimento elevou drasticamente a produtividade agrícola global por meio de novas tecnologias.

[1] Biólogo, Mestre em Agronomia – abenedetti.ro@gmail.com
[2] Engenheira Agrônoma – paloomasanttana@gmail.com
[3] Mestre em Ciências do Solo – ferreira.thalia0513@gmail.com

Contudo, essa intensificação gerou impactos ambientais severos, resultando no uso excessivo do solo e na supressão de ecossistemas nativos. Atualmente, reconhece-se que o solo desempenha funções vitais para a manutenção da vida: ele é o alicerce da biodiversidade, atua como um regulador do ciclo hidrológico, funciona como um estratégico estoque de carbono e serve de base para a purificação da água. A degradação dessas funções, seja pelo manejo químico inadequado ou pela remoção da cobertura vegetal, compromete a segurança alimentar e gera prejuízos econômicos que ecoam por toda a sociedade.

Para enfrentar esse cenário, o estudo do solo ultrapassou a observação morfológica tradicional, incorporando ferramentas de fronteira como a inteligência artificial, o sensoriamento remoto e o uso de drones. Essas tecnologias de agricultura de precisão permitem o monitoramento em tempo real de atributos físicos, químicos e biológicos, sendo aliadas fundamentais das práticas de manejo conservacionista. Estratégias como o Sistema de Plantio Direto (SPD), a rotação de culturas, a adubação verde e o terraceamento deixaram de ser meras opções técnicas para se tornarem imperativos éticos e operacionais, essenciais para restaurar solos devastados e garantir a resiliência produtiva frente à instabilidade sistêmica imposta pelas mudanças climáticas globais.

Este capítulo propõe uma análise técnica integrada, partindo da gênese do recurso solo sob pressão climática até as estratégias de monitoramento de precisão e avaliação dos custos econômicos da inação. Através de uma abordagem que transita entre o âmbito macroestrutural dos biomas brasileiros e a microdinâmica dos horizontes diagnósticos, busca-se fundamentar porque a conservação do solo é a estratégia de mitigação mais eficaz disponível para a agricultura contemporânea.

2 O SOLO EM SEU AMBIENTE NATURAL: GÊNESE, PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO

O solo constitui um sistema natural dinâmico, formado pela interação entre materiais minerais, matéria orgânica, água, ar e organismos ao longo do tempo. Sua formação e evolução estão associadas a processos de intemperismo e pedogênese, que determinam suas propriedades e características morfológicas.

2.1 MINERALOGIA E INTEMPERISMO

O solo é constituído por minerais primários e secundários. Os minerais primários são herdados diretamente da rocha matriz, como quartzo, feldspatos e micas. Já os minerais secundários são formados pela alteração dos primários na superfície terrestre, como argilominerais e óxidos de ferro.

As rochas podem ser classificadas em:

- Ígneas (ex.: basalto e granito);
- Sedimentares (ex.: arenito);
- Metamórficas (ex.: gnaisse e mármore).

Sendo assim, o intemperismo é o conjunto de processos que promovem a alteração das rochas.

- Intemperismo Físico: promove a desintegração mecânica da rocha sem alterar sua composição química. Pode ocorrer por variação térmica, congelamento da água em fraturas ou ação do vento. Seu principal efeito é aumentar a área superficial específica.
- Intemperismo Químico: envolve reações que transformam os minerais originais. A hidrólise é a reação mais importante, promovendo a formação de argilominerais. Outras reações incluem oxidação e hidratação. Em climas tropicais úmidos, a intensa hidrólise promove dessilicação, com remoção de sílica e acúmulo de hematita, goethita e gibbsita, conferindo coloração avermelhada aos solos.
- Intemperismo Biológico: também chamado de erosão biológica, corresponde à fragilização e desagregação das rochas pela ação de plantas, animais e microrganismos. O crescimento das raízes exerce pressão sobre o substrato rochoso, promovendo sua fragmentação, ao mesmo tempo em que raízes e microrganismos liberam ácidos orgânicos que contribuem para a dissolução dos minerais.

2.2 PEDOGÊNESE: FATORES E PROCESSOS DE FORMAÇÃO

A pedogênese é o conjunto de processos responsáveis pela formação e evolução do solo (Figura 1). Segundo o modelo clássico proposto por Dokuchaev (1883), cinco fatores fundamentais atuam de forma interdependente.

- Clima;
- Organismos;
- Relevo;
- Material de origem;
- Tempo.

Os fatores clima, organismos e relevo são considerados fatores ativos, pois fornecem energia e dinâmica às transformações. Já o material de origem e o tempo são considerados fatores passivos, pois representam a base sobre a qual os processos atuam.

- Material de origem: refere-se à rocha ou sedimento que, por meio do intemperismo dará origem ao solo. Sua composição mineralógica e textura determinam a fertilidade inicial. Por exemplo, solos derivados de basalto no Paraná tendem a apresentar maior fertilidade natural quando comparados aos originados de arenitos quartzosos.

- Clima: exerce influência decisiva por meio da precipitação e da temperatura. Altos índices pluviométricos e temperaturas elevadas intensificam reações químicas como hidrólise, acelerando a formação de solos profundos e altamente intemperizados.

- Organismos: inclui microrganismos, fauna do solo, vegetação e o próprio ser humano, atuam na ciclagem de nutrientes, na decomposição da matéria orgânica e na bioturbação (mistura do solo por organismos). A ação antrópica pode tanto conservar quando degradar a funcionalidade do solo.

- Relevo: controla o fluxo da água. Em áreas planas, predomina a infiltração, favorecendo solos profundos. Em áreas declivosas, a erosão limita o desenvolvimento do perfil.

- Tempo: permite que os demais fatores interajam e promovam a diferenciação de horizontes. Solos muito evoluídos, como os Latossolos, demandam centenas de milhares de anos para se formar sob condições tropicais.

Figura 1 – Fundamentos da gênese e estrutura do solo



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

2.3 INFLUÊNCIA DO CLIMA NA VELOCIDADE DA PEDOGÊNESE

Altas temperaturas e precipitações superiores a 2.000 mm anuais intensificam o intemperismo químico e aceleram a formação de solos profundos. Já em climas semiáridos, a limitação hídrica reduz a intensidade das reações químicas.

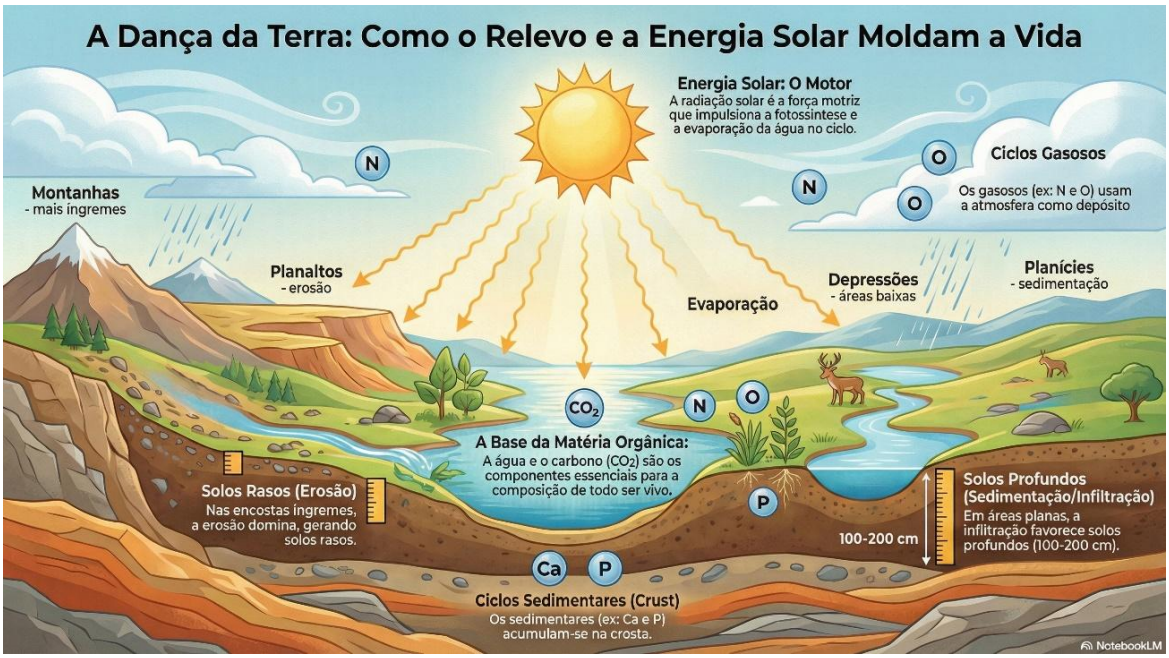
A temperatura também regula a decomposição da matéria orgânica. Em ambientes quentes, a atividade biológica é intensa, em climas frios, há maior acúmulo de material orgânico.

Assim, calor e umidade aceleram a evolução do solo, enquanto o frio ou seca tornam o processo mais lento.

2.4 RELEVO E PROFUNDIDADE DOS HORIZONTES

O relevo controla o balanço entre infiltração e erosão. Em interflúvios planos, predomina a infiltração, favorecendo solos profundos (100-200 cm ou mais). Em encostas íngremes, a erosão limita o desenvolvimento do perfil resultando em solos rasos. Áreas côncavas tendem a ser mais suscetíveis à remoção do material (Figura 2).

Figura 2 – Relevo e processos biogeoquímicos



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Além disso, a energia solar tem importante influência na dinâmica dos ecossistemas e na formação e transformação dos solos. A radiação solar constitui a principal fonte de energia para processos como a evaporação da água, a fotossíntese e, consequentemente, a produção de matéria orgânica. A evaporação promove a transferência de água da superfície para a atmosfera, contribuindo para a circulação da água no sistema solo–planta–atmosfera. Esse processo interfere diretamente no regime de umidade do solo, na disponibilidade hídrica para as plantas e na intensidade dos processos de intemperismo e de transporte de elementos químicos. Paralelamente, a incorporação de carbono por meio da fotossíntese e sua posterior deposição na forma de resíduos vegetais e matéria orgânica contribuem para a estruturação do solo, a retenção de água e nutrientes e a manutenção da atividade biológica. Dessa forma, a disponibilidade de energia solar e a dinâmica hídrica atuam conjuntamente na determinação das condições ambientais que sustentam a formação e o funcionamento dos ecossistemas.

Adicionalmente, existe uma interação entre ciclos gasosos, matéria orgânica e processos sedimentares, componentes fundamentais da dinâmica do sistema solo–atmosfera. Elementos como carbono, nitrogênio e oxigênio circulam continuamente entre a atmosfera, o solo, a água e os organismos, sendo incorporados e novamente disponibilizados por processos biológicos, químicos e físicos, chamados de Ciclos Biogeoquímicos. O carbono atmosférico, por exemplo, pode ser incorporado à biomassa vegetal e posteriormente retornar ao solo por meio da decomposição dos resíduos orgânicos, participando da formação da matéria orgânica. Em contrapartida, os processos de erosão, transporte e deposição promovem a redistribuição de partículas e minerais ao longo da paisagem, constituindo parte do ciclo sedimentar e contribuindo para a diferenciação dos materiais presentes no perfil do solo. A interação entre esses ciclos determina, portanto, a disponibilidade de nutrientes, a dinâmica da matéria orgânica e as propriedades físicas e químicas do solo, estabelecendo relações estreitas entre os processos pedogenéticos e o funcionamento dos ecossistemas.

2.5 PROCESSOS PEDOGENÉTICOS GERAIS

Os processos pedogenéticos são as ações que promovem a diferenciação do perfil do solo e podem ser agrupados em quatro categorias.

- Adições: incorporação de materiais ao solo, como deposição eólica, sedimentos aluviais ou acúmulo de matéria orgânica.

- Transformações: alterações químicas, físicas ou biológicas dos constituintes, como a transformação de minerais primários em minerais secundários (argilominerais).

- Translocações: movimentação de materiais dentro do perfil, sem que saiam dele, como a migração de argila do horizonte A para o horizonte B.

- Perdas: remoção de componentes do perfil, como a lixiviação de nutrientes ou a erosão superficial.

Além desses processos gerais, existem processos específicos que fundamentam a classificação dos solos no Brasil, como por exemplo:

- Ferralitização (Latolização): intensa dessilicação e acúmulo de óxidos de ferro e alumínio, típica de ambientes tropicais muito intemperizados.

- Argiluviação: migração e acúmulo de argila no horizonte B (diagnóstico), formando horizonte Bt.

- Gleização: ocorre em ambientes mal drenados, onde a saturação hídrica promove redução do ferro, resultando em cores acinzentadas.

2.6 PERFIL E MORFOLOGIA DO SOLO

O estudo do solo em campo é realizado por meio da análise do perfil, uma seção vertical que revela a sequência de horizontes. Os principais horizontes são:

- O ou H: orgânicos;
- A: mineral com húmus;
- E: eluviad, de cor clara;
- B: horizonte pedogenético com estrutura desenvolvida;
- C: material inconsolidade;
- R: rocha consolidada.

A descrição morfológica considera:

- Cor: determinada pela Carta de Munsell (matiz, valor e croma);
- Textura: proporção de areia, silte e argila;
- Consistência: comportamento do solo quando seco, úmido ou molhado;
- Estrutura: organização das partículas em agregados.

2.6.1 Estrutura do Solo

A estrutura refere-se ao arranjo das partículas em agregados separados por superfícies de fraqueza. Diferencia-se da textura, que é apenas a proporção granulométrica. A estrutura é classificada quanto a:

- Tipo: granular, blocos, prismática, laminar;
- Classe: tamanho dos agregados;
- Grau: intensidade de agregação.

Uma boa estrutura melhora a aeração em solos argilosos, aumenta a retenção de água em solos arenosos e reduz a suscetibilidade à erosão. A formação estrutural

á favorecida por raízes, microrganismos e fauna do solo, enquanto sua estabilidade depende de agentes cimentantes como matéria orgânica, argilas e óxidos de ferro e alumínio.

2.6.2 Propriedades Físicas e Relação com a Água

O solo é um sistema trifásico composto por fase sólida, líquida e gasosa. A densidade do solo (Ds) corresponde à massa seca por volume total, enquanto a densidade de partículas (Dp) considera apenas os sólidos. A porosidade é fundamental para a circulação de ar e água. A retenção hídrica é definida por dois limites importante:

- Capacidade de campo (CC);
- Ponto de murcha permanente (PMP).

A diferença entre esses valores corresponde à água disponível para as plantas. Solos argilosos geralmente apresentam maior retenção hídrica do que solos arenosos.

2.6.3 Atributos Químicos e de Fertilidade

A fertilidade do solo está relacionada à troca iônica nas superfícies coloidais. A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) representa o reservatório de nutrientes. A Soma de Bases (SB) inclui Ca2+, Mg2+, K+ e Na+. A saturação por Bases (V%) indica o grau de fertilidade. Solos tropicais tendem a ser naturalmente ácidos, podendo apresentar alumínio tóxico (Al3+), cuja correção é feita por calagem.

2.6.4 Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

No Brasil, a organização taxonômica é feita pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), desenvolvido pela Embrapa. O sistema é multicategórico e reconhece 13 ordens no primeiro nível (Tabela 1).

Tabela 1 - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)

Horizonte Diagnóstico Subsuperficial	Processo de Formação Predominante	Sequência Típica de Horizontes	Características Morfológicas e Físicas	Atributos Químicos e Fertilidade	Limitações de Uso e Manejo
B latossólico (Bw)	Ferralitização	A-Bw-C	Profundos a muito profundos; bem drenados; textura não arenosa; estrutura granular ou blocos subangulares fracos a moderados.	Ácidos; maioria distrófica; CTC (atividade da argila) < 17 cmolc/kg; relação Ki ≤ 2,2.	Baixa fertilidade natural (acidez e baixa soma de bases); relevo plano favorece a mecanização.
B textural (Bt)	Argiluviação (Lessivagem)	A-Bt-C	Solos intemperizados; cores e texturas variáveis; apresenta gradiente textural expressivo entre os horizontes A e B.	Tb (baixa atividade de argila), caráter alumínico ou Ta distrófico; predominância de caulinita; solos ácidos.	Alta suscetibilidade à erosão devido ao gradiente textural; deficiências químicas relacionadas à acidez.
B nítico	B nítico	Ferralitização	A-Bt-C	Bem drenados; textura argilosa ou muito argilosa; estrutura em blocos ou prismática; cerosidade comum a moderada; cores vermelhas a brunadas.	Tb (baixa atividade de argila) ou caráter alítico; solos ácidos.
B incipiente (Bi)	Transformação incipiente	A-Bi-C	Pouco evoluídos; espessura ≥ 10 cm; textura não arenosa; morfologia variada conforme o material de origem.	Variável (eutrófico a distrófico); saturação por bases (V%) dependente do material fonte.	Frequentemente em relevos declivosos; risco de erosão; profundidade limitada.
Ausente (sem B diagnóstico)	Inexpressivo (solos jovens)	A-R, A-C-R ou A-C	Rasos (Litólicos) ou arenosos (Quartzarênicos); estrutura fraca ou grãos simples.	Dependente do material de origem; variam de eutróficos a distróficos.	Rasos: restrição à mecanização e erosão; Arenosos: baixa retenção de água e de nutrientes.
Horizonte Glei (Bg ou Cg)	Gleização	A-Cg ou A-Bg-C	Hidromórficos; mal drenados; cores acinzentadas decorrentes da redução de ferro.	Podem ser distróficos, eutróficos ou tiomórficos (sulfídricos); baixa oxigenação.	Excesso de água; falta de oxigenação; restrição severa à mecanização e ao tráfego de máquinas.

B plânico	Desargilização / Eluviação	A-E-Bt-C ou A-Bt-C	Mal drenados; mudança textural abrupta; estrutura colunar ou prismática; cores acinzentadas.	Frequente caráter sódico (Planossolo Nátrico); alto grau de dispersão de argila.	Baixa permeabilidade; drenagem imperfeita; riscos de salinização e sodicidade.
Plíntico, Concrecionário ou Litoplíntico	Laterização (Plintitização)	A-Bf-C ou A-F	Mal drenados; presença de plintita (mosqueados vermelhos endurecidos) ou petroplintita.	Baixa fertilidade; ácidos; distróficos; baixa saturação por bases (V%).	Cimentação endurecida; drenagem deficiente; restrição física ao crescimento radicular.
Horizonte Vértico (Bv ou Cv)	Argiloturbação	A-Bv-C ou A-Cv	Fendas profundas quando secos; presença de slickensides; muito duros (secos) e muito pegajosos (molhados).	Alta CTC; alta saturação por bases (eutróficos); presença de minerais 2:1 expansivos; pH neutro a alcalino.	Dificuldades físicas extremas; drenagem lenta; tráfego de máquinas limitado.
B incipiente, B textural ou cálcico	Bissialitização	A(chernozêmico)-Bt/Bi-C	Horizonte A chernozêmico (escuro e rico em MO); estrutura forte; bem a imperfeitamente drenados.	Eutróficos (V% ≥ 50%); Ta (alta atividade de argila); alta fertilidade natural; ricos em Ca e Mg.	Geralmente apresentam pouca profundidade; risco de erosão em áreas declivosas.
B textural	Bissialitização / Desargilização	A-Bt-C	Pouco profundos; bem drenados; cores vivas (caráter crômico); estrutura desenvolvida.	Eutróficos (V% ≥ 50%); Ta (alta atividade de argila); moderadamente ácidos a alcalinos.	Suscetibilidade à erosão; profundidade limitada; associado a climas semiáridos.
B espódico (Bh, Bs, Bhs)	Podzolização	A-E-Bh/Bs	Textura arenosa; horizonte E claro (albúvico) acima do horizonte B escuro ou avermelhado; presença de cimentação (ortstein).	Muito pobres; ácidos; baixa CTC; saturação por Al alta; hidromórficos ou excessivamente drenados.	Extrema deficiência química; textura arenosa; baixa capacidade de retenção de água.
Hístico (O ou H)	Hístico (O ou H)	Paludização	O-R, H-C ou H-A-C	Material orgânico (C ≥ 80 g/kg); espessura ≥ 40 cm; cores escuras; muito mal drenados.	Alta acidez; alta CTC; frequentemente distróficos; caráter tiomórfico (presença de sulfetos).

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

3 CONSEQUÊNCIAS PARA AGRICULTURA NACIONAL: IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SOLO BRASILEIRO, EFEITOS NA PRODUTIVIDADE, MANEJO E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO

As mudanças climáticas interferem diretamente na dinâmica dos solos e nos sistemas produtivos, modificando condições de temperatura, disponibilidade hídrica e ocorrência de eventos extremos. No Brasil, essas alterações apresentam diferentes manifestações de acordo com as características ambientais e os padrões de uso e ocupação do território.

3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM SOLO BRASILEIRO

As mudanças climáticas configuram um dos maiores desafios socioambientais do século XXI, com efeitos intensos e heterogêneos sobre os sistemas naturais e humanos. No contexto brasileiro, país de dimensões continentais e grandes diversidade de biomas, as alterações no clima (em especial o aumento da temperatura, a alteração dos regimes de precipitação e a intensificação de eventos extremos) têm implicado transformações profundas nos solos, ecossistemas e na vulnerabilidade territorial dos biomas.

Tais impactos se expressam em diferentes escalas espaciais e temporais, demandando uma abordagem integrada que considere a composição físico-química dos solos, os processos geoambientais e as interações entre clima, uso do solo e dinâmica territorial (Figura 3). Entre os fatores que ameaçam aos biomas estão:

- Aquecimento Global e emissão de gases de efeito estufa: O aquecimento global tem sido atribuído ao excesso de emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, como o dióxido de carbono (CO2), metano (CH4) e o óxido nitroso (N2O). Eles elevam a temperatura fazendo com que seja retido mais calor, o que resulta no aumento da temperatura global, sendo impulsionados pela queima de combustíveis fósseis, atividades agrícolas e desflorestamento;

- Desmatamento: Com a remoção de áreas naturais como florestas para expansão da produtividade com cultivos agrícolas, pecuária e transformação de ambientes nativos em benefícios próprios, para exploração da madeira, mineração e construções humanas, dessa maneira influencia na destruição de habitats naturais e coloca em risco espécies da natureza, em que a retirada de árvores libera mais CO2 armazenado, provoca maior risco de enchentes e seca de nascentes;

- Queimadas: Utilizada como forma de “limpeza” da área de culturas anuais (temporárias) e das pastagens animal. Dessa forma o fogo pode se espalhar e avançar com indêncios até vegetações nativas, podendo dizimar florestas. As consequências incluem mudança no regime de chuvas, poluição severa do ar, emissão de gases de efeito estufa, destruição de lares aos animais, e consequências negativas para a saúde humana, em especial o sistema respiratório de crianças e idosos.

- Má utilização do solo: Utilização do plantio convencional demasiadamente, o qual necessita de revolvimento intensivo, trânsito de maquinários agrícolas, solo exposto, e demais outros fatores como cultivo sem curvas de nível em áreas íngremes, uso exagerado de defensivos agrícolas e pastoreio intensivo, tais práticas favorecem a contaminação, erosão e compactação dos solos, deixando-o mais empobrecido;

- Fenômenos climáticos naturais: Fenômenos como El Niño que provoca aquecimento e La Niña o resfriamento, são condições naturais responsável por modificar temporariamente o regime de chuva e a temperatura média global. Outros fatores englobam variações em padrões de ventos e chuvas, os quais resultam em períodos de seca ou com umidade prolongada.

Figura 3 – Impactos das mudanças climáticas nos Ecossistemas Brasileiros



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

3.2 A VULNERABILIDADE DOS BIOMAS BRASILEIROS E DO SOLO

3.2.1 Biomas e Sensibilidade Climática

Os principais biomas brasileiros (Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa) apresentam diferentes graus de vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas, devido às suas características climáticas, solos e histórico de uso da terra. Os estudos de Nobre (2016), Artaxo (2023) e ABC (2025), destacam que

os biomas sofrem alterações significativas nos padrões climáticos e operam sob maior estresse hídrico, com impactos sobre a resiliência ecológica e funcionalidade dos sistemas de solo-vegetação. Essa vulnerabilidade é expressa por fatores como:

- Declínio da umidade do solo (especialmente em regiões semiáridas como a Caatinga);
- Alteração estrutural dos solos devido à seca prolongada;
- Fragilização de processos de ciclagem de nutrientes e fluxos de carbono;
- Maior suscetibilidade à erosão e degradação;
- Risco de “savanização” (degradação) da Floresta Amazônica;
- Variações da distribuição geográfica de espécies;
- Aumento da temperatura média anual;
- Maior irregularidade nos regimes de chuvas;
- Eventos extremos como secas e chuvas concentradas intensificadas;
- Diminuição da resiliência do ecossistema;
- Impactos sobre o sistema aquático;
- Maior susceptibilidade a compactação pela redução da umidade do solo;
- Degradação da estrutura do solo.

3.2.2 Solos, Produtividade e Resposta aos Estresses Climáticos

O solo funciona como uma interface geoecológica estratégica entre a atmosfera (ar e clima), a biosfera (seres vivos) e a litosfera (rochas e minerais). Mudanças no clima influenciam diretamente nas:

- Propriedades físicas: estão altamente relacionadas com a erosão e o maior escoamento superficial, compactação pela redução da porosidade e solo mais duro e seco, menor infiltração de água mexendo com a estruturação do solo e na sua capacidade de retenção de água;

- Propriedades químicas: lixiviação de nutrientes como cálcio, magnésio e potássio, alteração do pH, por perder bases deixa o solo mais ácido e reduz a disponibilidade para as plantas, redução de matéria orgânica e diminuição da taxa de carbono devido a temperatura acelerarem a decomposição de resíduos orgânicos;

- Propriedades biológicas: Diminuição da atividade microbiana, mudanças na biodiversidade do solo e ciclagem de nutrientes com interferências. Especialmente em biomas afetados por uso mineral e mudanças na cobertura vegetal, que altera ciclos biogeoquímicos essenciais ao funcionamento dos ecossistemas.

Essas alterações podem intensificar problemas de degradação e compactação, reduzindo a fertilidade natural e comprometendo a produção agrícola no longo prazo.

3.2.3 Adaptações territoriais e perspectivas de mitigação

Diante dos impactos no solo e na vulnerabilidade dos biomas, as pesquisas mais recentes apontam para a necessidade um Manejo sustentável dos solos: Práticas conservacionistas e redução da degradação com adoção do plantio direto em que no solo não há revolvimento e a palhada da cultura anterior é usada como cobertura do solo, rotações de cultura com alternância de cultivos na mesma área em períodos distintos, adubação verde com plantio de gramíneas e leguminosas com o foco de ciclar nutrientes no solo, melhorar a fertilidade, bem como preservar o solo contra erosão.

Outras medidas que visam o melhor manejo do solo incluem uso de terraceamento, constituídos de terrenos inclinados em plataformas ou degraus para diminuir a velocidade da água das chuvas, aumentando a infiltração e a manutenção de matas ciliares com a preservação e restauração de áreas próximas aos cursos d'água, como:

- Políticas públicas de adaptação climática territorial: Especialmente em áreas rurais e ecossistemas frágeis. São constituídos de programas governamentais e estratégias para auxílio em determinadas regiões como preparo e ajustes para mudanças climáticas, podem incluir: restauração de áreas degradadas, seguro agrícola, sistemas de irrigação mais eficazes, incentivo ao manejo e conservação do solo e suporte técnico adequado.

- Integração entre planejamento geográfico e estratégias socioambientais: Organização do espaço seja meio urbano ou rural, matas nativas e corpos hídricos por meio do planejamento de uso das áreas com a finalidade da proteção ambiental e o bem-estar da sociedade através da cautela com uso do solo, monitoramento de indicadores ambientais e também a conscientização pela educação ambiental onde a população detém conhecimento sobre a importância proteger os recursos naturais,

Uma vez que são relacionados elementos naturais e humanos no espaço, é fornecido uma lente integradora que vincula a dinâmica física dos solos à dinâmica socioeconômica e política, ajudando a orientar estratégias territoriais mais eficientes diante das mudanças climáticas (Figura. 4).

Figura 4 – Impactos das mudanças climáticas no Brasil



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

4 IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AGRICULTURA BRASILEIRA

A agricultura brasileira apresenta forte dependência das condições climáticas, das características dos solos e da disponibilidade de recursos hídricos, de modo que alterações nesses componentes podem repercutir diretamente sobre o desempenho dos sistemas produtivos. O aumento das temperaturas, a maior irregularidade das precipitações e a ocorrência de períodos de seca ou de chuvas intensas modificam processos físicos, químicos e biológicos do solo, interferindo na disponibilidade de água, na ciclagem de nutrientes, na matéria orgânica, na estrutura e na capacidade de suporte às culturas. Esses efeitos não se restringem à produtividade, pois também podem aumentar a necessidade de insumos, alterar os custos operacionais e ampliar os riscos associados à produção agrícola.

Nesse contexto, o solo deve ser compreendido como um recurso natural finito e estratégico para a agricultura e para a manutenção das funções ambientais. A conservação de suas propriedades e a capacidade de adaptação dos sistemas produtivos tornam-se elementos fundamentais diante de cenários de maior instabilidade climática. Para compreender essa relação de forma integrada, esta seção aborda o papel do clima na pedogênese e na dinâmica do solo, a vulnerabilidade territorial associada ao sistema trifásico, os impactos diferenciados entre biomas e horizontes diagnósticos, as consequências econômicas para o agricultor e, por fim, as estratégias de manejo e as tecnologias destinadas ao monitoramento e à adaptação dos sistemas agrícolas.

4.1 O BRASIL E O SOLO COMO RECURSO FINITO SOB STRESS CLIMÁTICO

A compreensão dos impactos climáticos sobre a agricultura exige inicialmente considerar o solo como um recurso natural cuja formação ocorre em escalas temporais muito superiores àquelas observadas nos ciclos produtivos agrícolas. Sua capacidade de sustentar o crescimento vegetal está relacionada ao equilíbrio entre suas propriedades físicas, químicas e biológicas e às condições ambientais nas quais se desenvolve.

4.1.1 O Clima como Fator Ativo na Pedogênese

A trajetória da agricultura brasileira é marcada pela transição de um modelo extrativista para um sistema de alta tecnologia, impulsionado pela Revolução Verde na segunda metade do século XX. Esse período foi caracterizado pela mecanização intensiva e pelo uso massivo de corretivos e fertilizantes, permitindo a ocupação de biomas antes considerados marginais, como o Cerrado. No entanto, o paradigma atual evoluiu para o conceito de "intensificação sustentável", onde o solo não é apenas um suporte mecânico, mas um ecossistema vivo que deve ser preservado como um recurso finito sob pressão (DIAS; DOURADO NETO, 2023). O desafio atual reside em manter os níveis de produtividade alcançados enquanto se mitiga a pegada de carbono e a agricultura nacional se adapta às instabilidades climáticas severas que marcam a década de 2020 (COELHO, 2024).

4.1.2 Vulnerabilidade Territorial e o Sistema Trifásico

O solo é um sistema trifásico complexo, composto por uma fração sólida (minerais e matéria orgânica), líquida (solução do solo) e gasosa (ar do solo). O equilíbrio entre essas fases é fundamental para a vida das plantas. O estresse climático rompe essa dinâmica; períodos de seca extrema reduzem a fase líquida, aumentando a concentração de sais na solução e dificultando a absorção de nutrientes pelas raízes (CONAB, 2025). Por outro lado, chuvas torrenciais inundam a fase porosa, expulsando a fase gasosa e gerando condições de anoxia, o que prejudica a respiração radicular e a microbiota aeróbica. Essa desestabilização compromete a resiliência dos agroecossistemas brasileiros frente ao aquecimento global (COELHO, 2024).

4.2 IMPACTOS POR BIOMA E HORIZONTE DIAGNÓSTICO

Os impactos das mudanças climáticas sobre os solos brasileiros apresentam características distintas em função das condições ambientais e dos tipos de solo

predominantes em cada bioma. Características como mineralogia, textura, estrutura, drenagem e presença de horizontes diagnósticos condicionam a maneira como os solos respondem às alterações na temperatura e na disponibilidade hídrica a depender do bioma em análise.

4.2.1 Cerrado e Amazônia: O Domínio dos Latossolos e o Horizonte Bw

Nestes biomas, predominam os Latossolos, solos altamente intemperizados que apresentam o horizonte B latossólico (Bw). Esse horizonte é caracterizado por uma estrutura granular forte, mas com baixíssima Capacidade de Troca Catiônica (CTC) nativa e acidez elevada (BEATA; GIAMPAOLO, 2025). Com o aumento da temperatura e a irregularidade das chuvas, a lixiviação de bases (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) é intensificada, tornando esses solos ainda mais dependentes de manejo químico e calagem constante. O risco de savanização na Amazônia e o aumento do déficit hídrico no Cerrado colocam em xeque a sustentabilidade desse modelo, exigindo que o melhoramento genético foque em cultivares com sistemas radiculares mais profundos para explorar o volume do horizonte Bw, caminho que levam décadas de estudos.

4.2.2 Caatinga e Semiárido: Riscos de Salinização em Luvissolos

No semiárido brasileiro, a presença de solos pouco evoluídos, como os Luvissolos e Planossolos, com horizonte B textural (Bt) ou plânico, cria um cenário de alta vulnerabilidade. Estes solos possuem argila de atividade alta, mas a limitação hídrica severa impede a lavagem de sais (COELHO, 2024). O aumento da evapotranspiração decorrente das mudanças climáticas acelera a ascensão capilar da água salina, levando à salinização superficial e, em casos extremos, à desertificação. O caráter sódico de muitos desses solos agrava a dispersão das argilas, destruindo a estrutura do solo e impedindo a infiltração da pouca água disponível.

4.2.3 Mata Atlântica e Pampa: Erosão e Hidromorfismo

Em regiões de relevo declivoso da Mata Atlântica, a presença de solos com gradiente textural (onde o horizonte Bt acumula argila em relação ao horizonte A) favorece a erosão hídrica. A diferença de porosidade entre os horizontes facilita o selamento superficial e o escoamento laminar. Já no Pampa, o desafio é o hidromorfismo. Em anos de precipitação excessiva (comuns em eventos de El Niño), ocorre a gleização, processo de redução do ferro que confere cores acinzentadas ao solo e indica saturação hídrica permanente. Segundo Associação Brasileira do Agronegócio – ABAG (2025), esse excesso de água restringe severamente a mecanização e favorece a compactação do solo, dificultando o tráfego de máquinas agrícolas.

4.3 IMPACTO ECONÔMICO E GESTÃO DE RISCO PARA O AGRICULTOR

Os impactos das mudanças climáticas sobre o solo não se restringem às alterações ambientais e produtivas, mas podem também repercutir diretamente sobre os custos e os riscos associados à atividade agrícola. A degradação das propriedades químicas pode aumentar a necessidade de correção e reposição de nutrientes, enquanto a degradação física pode reduzir a infiltração de água, aumentar o escoamento superficial e dificultar as operações mecanizadas. Paralelamente, a maior frequência de eventos climáticos extremos amplia a incerteza relacionada à produção, exigindo maior capacidade de planejamento e gestão de riscos por parte dos agricultores.

Nesse aspecto, a análise econômica permite compreender que a conservação do solo e a adaptação às mudanças climáticas não constituem apenas medidas ambientais, mas também componentes da gestão produtiva. A adoção de práticas adequadas de manejo, o uso eficiente de recursos e o planejamento diante dos riscos climáticos podem influenciar os custos de produção e a estabilidade econômica dos sistemas agrícolas.

4.3.1 Degradação das Propriedades Químicas e Custos de Produção

As mudanças climáticas impactam diretamente o bolso do agricultor através da degradação química do solo. O aumento da temperatura do solo acelera a oxidação da matéria orgânica (MOS), que é a principal fonte de carga elétrica (CTC) em solos tropicais. Sem a MOS, a retenção de nutrientes cai drasticamente, exigindo doses cada vez maiores de fertilizantes para manter o mesmo teto produtivo. Além disso, a lixiviação acentuada por chuvas extremas remove o calcário aplicado, aumentando a frequência necessária de calagem para corrigir o pH e neutralizar o alumínio tóxico.

4.3.2 Degradação Física, Operacional e Eficiência de Máquinas

Fisicamente, solos submetidos a ciclos extremos de umedecimento e secagem tendem a se tornar mais compactos. Um solo mais "duro" e seco exige maior torque das máquinas, elevando o consumo de combustível e o desgaste de implementos (DIAS; DOURADO NETO, 2023). A perda de estrutura reduz a taxa de infiltração de água, o que significa que, mesmo quando chove, a água não penetra no perfil para ser armazenada no horizonte Bw ou Bt, escorrendo superficialmente e levando consigo solo fértil e insumos caros.

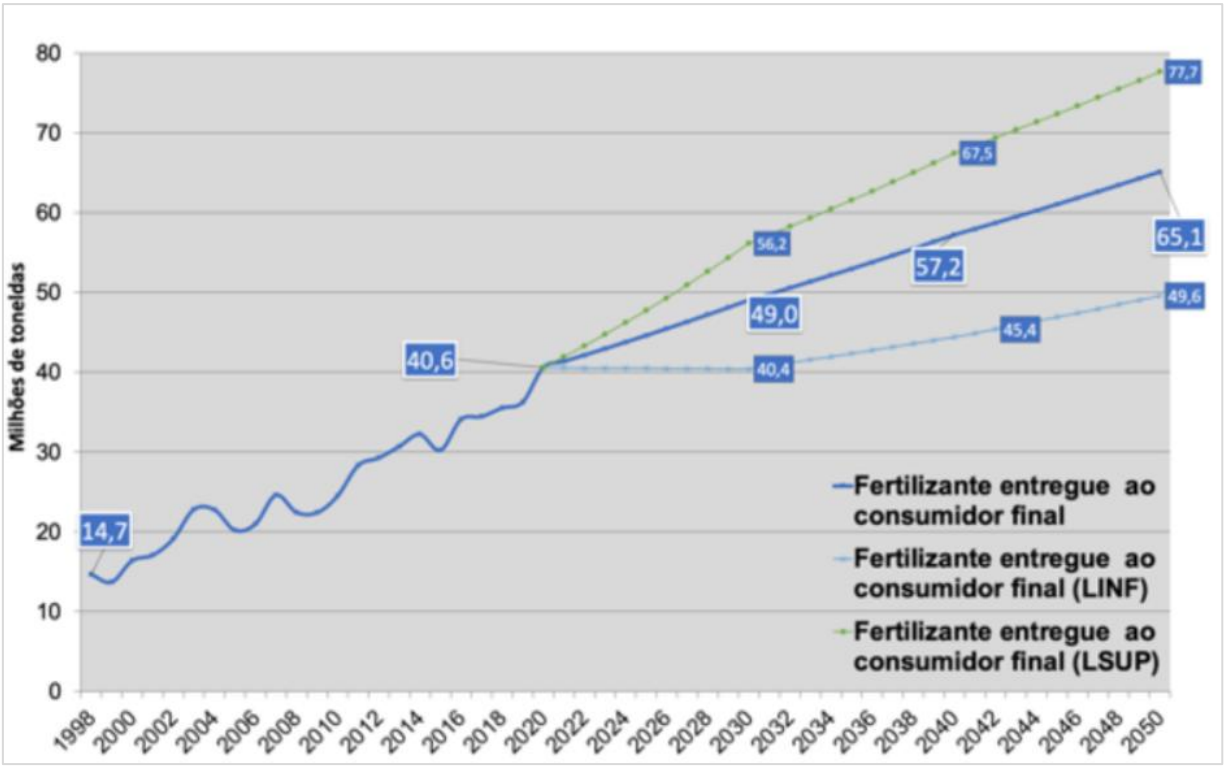
4.3.3 Insegurança e a Nova Geopolítica do Seguro Agrícola

A maior irregularidade climática tem tornado o seguro agrícola uma despesa obrigatória e onerosa. Instituições financeiras e seguradoras já utilizam modelos que penalizam regiões com maior histórico de quebra de safra por seca ou inundação. O investimento em sistemas de irrigação eficazes e de baixo consumo de energia torna-se uma estratégia de sobrevivência, mas exige alto capital inicial. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) torna-se, assim, a bússola para o crédito rural no Brasil.

Um exemplo desse aspecto já é observado nacionalmente e vem havendo um crescimento do consumo de insumos agrícolas utilizada na mesma área plantada. O Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) do Brasil, estima que o consumo de

fertilizantes pode chegar a 77,7 milhões de toneladas em 2050, contra 40,6 milhões de toneladas de fertilizantes agrícolas usadas 2022 para mesma área plantada (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Possível cenário de demanda de fertilizantes no Brasil (2030, 2040 e 2050)



Fonte: MAPA, 2022.

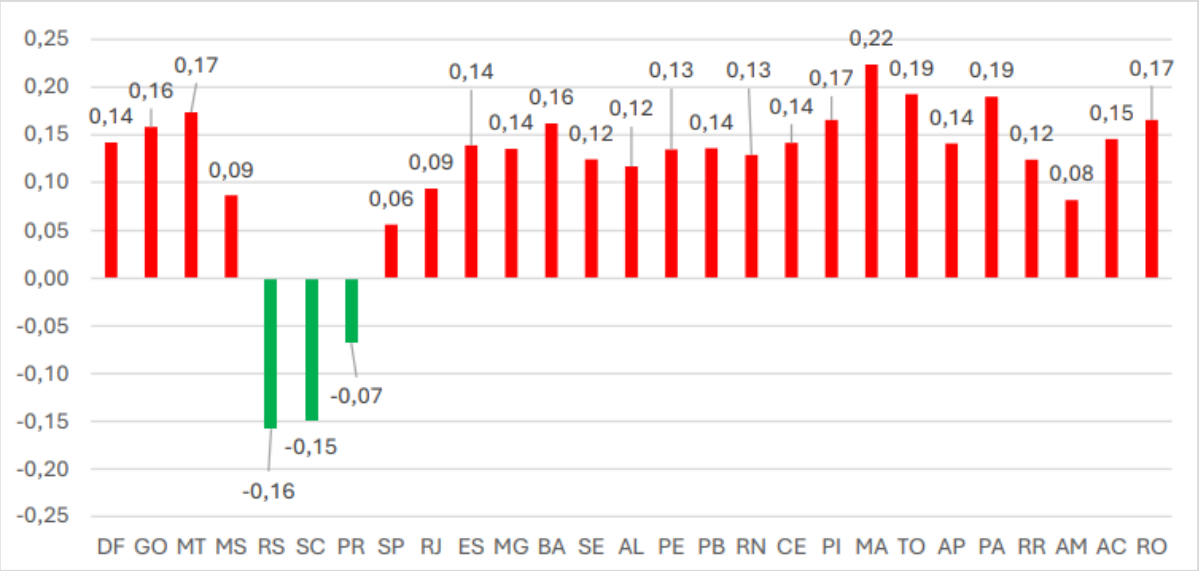
4.3.4 A inação climática e os custos agrícolas até 2050

A inação climática é definida como a manutenção das tendências técnicas, econômicas e sociais atuais, sem o avanço em metas de descarbonização ou medidas de baixo carbono em ritmo acelerado. Para o agricultor brasileiro, essa postura implica um cenário de custos crescentes já no curto prazo. Até 2030, estima-se que o setor enfrente uma pressão significativa sobre os custos de produção, impulsionada pela maior necessidade de insumos para compensar a perda de produtividade dos fatores e pela volatilidade nos preços relativos dos alimentos.

O aumento da temperatura e a irregularidade hídrica elevam o custo de acesso à água, que em um cenário de aquecimento de 4°C, deve ser, em média, 15% superior

em quase todas as Unidades Federativas até 2050, com exceção do Sul do Brasil (Gráfico 2).

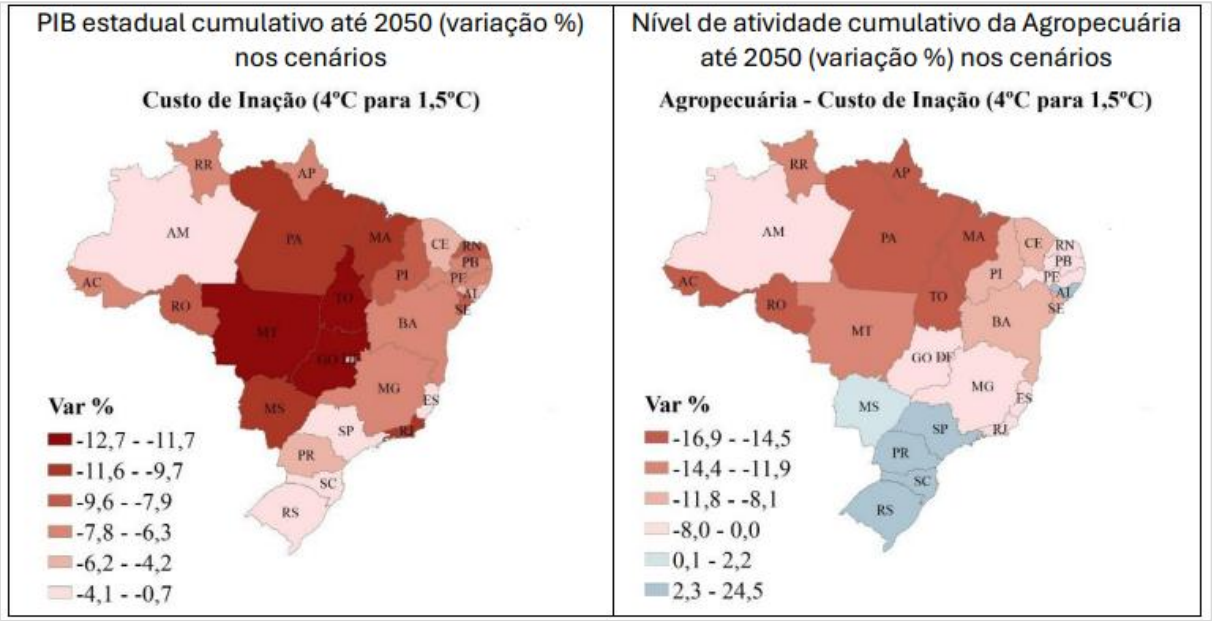
Gráfico 2 – Variação acumulada (%) até 2050 no custo de acesso à água nas unidades federativas no cenário 4°C.



Fonte: MAPA, 2022.

Em termos macroeconômicos, o custo acumulado da inação global para o Brasil entre 2025 e 2050 é estimado em R$ 17,1 trilhões na comparação entre o cenário de 4°C e o de 1,5°C. Esse valor representa uma perda massiva de riqueza, equivalente a quase 1,5 vezes o PIB total do país em 2024. O impacto no nível de atividade da agropecuária por Unidade da Federação é severo. Estados das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste apresentam os maiores custos de inação, com destaque para Mato Grosso (MT), Goiás (GO), Rondônia (RO), Pará (PA), Tocantins (TO) e Maranhão (MA). Nestas regiões, a falta de ação climática acentua as desigualdades de investimentos (FBCF) e reduz a competitividade setorial. Fatores ilustrados na imagem (5) a seguir:

Figura 5 – Custos de inação cumulativos até 2050 entre os cenários 4°C e 1,5ºC para PIB e nível de atividade da agropecuária por UF



Fonte: BRASIL, 2025.

No pior cenário, com um aquecimento global de 4°C, as perspectivas para a agropecuária nacional são de deterioração da segurança alimentar e hídrica. Haverá um aumento generalizado no preço dos alimentos, especialmente no Centro-Oeste, devido à representatividade da região na produção de commodities. A inação internacional perante a mudança do clima resultará na quebra de safras e na redução da produtividade da terra, que só cresceria conforme a média histórica (2,5% ao ano) em cenários de baixa emissão (1,5°C). Sem medidas de adaptação, o Brasil enfrentará um retrocesso no nível de atividade setorial, transformando o setor agropecuário, hoje motor da economia, em uma área de alta vulnerabilidade e risco sistêmico.

4.4 ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO E TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO

A adaptação da agricultura às mudanças climáticas depende da capacidade de conservar as propriedades do solo, utilizar os recursos naturais de maneira eficiente e identificar antecipadamente condições que possam comprometer o desenvolvimento das culturas. Nesse sentido, práticas conservacionistas contribuem para reduzir processos de erosão, preservar a estrutura e favorecer a manutenção da matéria

orgânica, enquanto ferramentas tecnológicas ampliam a capacidade de monitoramento das condições do solo e das culturas.

A integração entre manejo conservacionista, agricultura de precisão, sensoriamento remoto e inteligência artificial permite avançar de estratégias generalizadas para formas de manejo mais ajustadas à variabilidade espacial e temporal das áreas agrícolas. O conhecimento das características dos solos e de seus horizontes diagnósticos, associado à obtenção e interpretação de dados em diferentes escalas, pode subsidiar decisões relacionadas à irrigação, aplicação de insumos, conservação e uso da terra.

4.4.1 Manejo Conservacionista como Pilar de Sustentação

A principal defesa contra o estresse climático é o Sistema de Plantio Direto (SPD) consolidado. A manutenção da palhada sobre o solo protege o horizonte A contra o impacto direto da chuva e reduz a temperatura superficial em até 10°C em relação ao solo descoberto. A rotação de culturas e a adubação verde são essenciais para manter o aporte de carbono e a biodiversidade microbiana, essenciais para a ciclagem de nutrientes. O terraceamento e outras práticas mecânicas de controle de erosão precisam ser redimensionados para suportar volumes de chuva agora mais concentrados e violentos.

4.4.2 Agricultura de Precisão e Inteligência Artificial

A modernização do monitoramento do solo é o caminho para a eficiência. O uso de sensoriamento remoto e drones permite mapear a variabilidade espacial da umidade e do vigor vegetativo, permitindo aplicações de taxa variável que economizam recursos (DIAS; DOURADO NETO, 2023). Algoritmos de Inteligência Artificial processam dados de sensores de solo para prever momentos críticos de estresse hídrico, permitindo o acionamento preciso de sistemas de irrigação. A integração desses dados com o SiBCS permite uma gestão por "mancha de solo", tratando cada horizonte diagnóstico conforme sua necessidade específica de manejo.

5 CONCLUSÃO

A análise dos impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira revela que o solo é, simultaneamente, o recurso mais vulnerável e a ferramenta mais poderosa para a adaptação setorial. Como discutido ao longo deste capítulo, a transição de processos pedogenéticos naturais para um estado de degradação acelerada (evidenciada pela perda de matéria orgânica, redução da CTC e riscos de salinização) impõe um custo de inação que pode comprometer triliões de reais do PIB agropecuário até 2050. A ciência do solo, portanto, deixa de ser uma disciplina meramente descritiva para se tornar o pilar central da segurança alimentar e econômica do país.

A superação dos desafios impostos pelo aquecimento global exige a integração definitiva entre o conhecimento pedológico clássico e as tecnologias da Agricultura. O uso de inteligência artificial e sensoriamento remoto para o manejo preciso de horizontes como o B latossólico e o B textural permite uma resposta ágil ao estresse hídrico e térmico. No entanto, a tecnologia por si só não é suficiente; ela deve estar ancorada em práticas de manejo conservacionista, como o Plantio Direto e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, que transformam o agroecossistema em um dreno eficiente de carbono e um reservatório resiliente de água.

Em última análise, cuidar do solo é garantir a persistência da biodiversidade e a continuidade dos serviços ecológicos dos quais a humanidade depende. O Brasil, como detentor de uma das maiores fronteiras agrícolas do mundo, tem a responsabilidade e a oportunidade técnica de liderar uma agricultura regenerativa. Ao tratar o solo não como um insumo inesgotável, mas como um corpo natural vivo e finito, é possível converter a crise climática em um motor de inovação, assegurando que o setor produtivo nacional permaneça viável, sustentável e resiliente para as próximas gerações.

REFERÊNCIAS

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ABC). **Biomas brasileiros e as mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: ABC, 2023.

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ABC). **Documento sobre biodiversidade e impactos das mudanças climáticas na Amazônia**. Rio de Janeiro: ABC, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023**. Brasília, DF: ANA, 2023.

ALEXANDROVSKIY, A. L. Rates of soil-forming processes in three main models of pedogenesis. **Revista Mexicana de Ciências Geológicas**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 283-292, 2007.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.

ARTAXO, P. **Mudanças climáticas e biomas brasileiros**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2023.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. **Aquecer ou não aquecer?** Mudanças climáticas, agricultura e segurança alimentar no Brasil. Brasília, DF: Embrapa, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AGRONEGÓCIO (ABAG). **Agronegócio frente às mudanças climáticas**: rumo à COP30. São Paulo: ABAG, 2025.

AYER, J. E. B. *et al.* Pedogênese e taxonomia: retrospectiva histórica e cenários futuros. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 44, e212373, 2024. DOI: https://doi.org/10.11606/eissn.2236-2878.rdg.2024.212373.

BARROS, M. *et al.* Gênese e classificação dos solos de uma topossequência em área de carste na Serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1147-1158, 2013.

BEATA, A.; GIAMPAOLO, E. (ed.). **Ciência para o clima e soluções da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2014.

BLANK, D. M. P. O contexto das mudanças climáticas e as suas vítimas. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 157–172, maio 2015.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Inventário nacional de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. Brasília, DF: MCTI, 2022.

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento. Secretaria Nacional de Planejamento. **Estratégia Brasil 2050**: estudo estratégico dos impactos econômicos da mudança do clima no Brasil. Coordenador: Regis Rathmann. Brasília, DF: MPO/BID, 2025. 214 p.

BÖRNER, Katy; CHEN, Chaomei; BOYACK, Kevin W. Visualizing knowledge domains. **Annual Review of Information Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 179–255, 2003.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Agricultura e aquecimento global: impactos e estratégias de mitigação no Brasil. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2012.

CHERUBIN, M. Agricultura brasileira pode ser arma poderosa contra mudanças climáticas. **Jornal da USP**, São Paulo, 15 jan. 2025. Disponível em: https://jornal.usp.br/radio-usp/agricultura-brasileira-pode-ser-arma-poderosa-contra-mudancas-climaticas/. Acesso em: 8 mar. 2026.

COELHO, C. A. W. (org.). **Mudança do clima no Brasil**: síntese atualizada e perspectivas para decisões estratégicas. Brasília, DF: MCTI/Rede Clima, 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Perspectivas para a agropecuária**: impactos climáticos na produção agrícola. Brasília, DF: Conab, 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Mudanças climáticas e seus impactos na agricultura em 2026**: boletim de monitoramento agrícola. Brasília, DF: Conab, 2026.

CPTEC/INPE. **El Niño e La Niña**: impactos no clima e na agricultura brasileira. São José dos Campos: INPE, 2022.

DIAS, E. M.; DOURADO NETO, D. (org.). **Agro 4.0**: fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil. São Paulo: Blucher, 2023.

DOKUCHAEV, V. V. **Russian chernozem**. St. Petersburg: Imperial Free Economic Society, 1883.

EDITORES BRITÂNICOS. **Vasily Vasilievich Dokuchayev**. Enciclopédia Britânica, 4 nov. 2025. Disponível em: https://www.britannica.com/biography/vasily-vasilyevich-dokuchayev. Acesso em: 24 fev. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **O estado da arte da qualidade do solo no Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Plantio direto no Brasil**: fundamentos e avanços. Brasília, DF: Embrapa, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Boas práticas para conservação do solo e da água na agricultura brasileira**. Brasília, DF: FAO/Embrapa, 2017.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). **Mudanças climáticas e saúde no Brasil**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2022.

GOMES, J. B. V. *et al.* Solos de três áreas de restinga: I. Morfologia, caracterização e classificação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, n. 11, p. 1907-1919, nov. 1998.

GOMES, J. B. V. Podzolização em solos arenosos de restinga no estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, n. 11, p. 1907-1919, 1998.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Mudanças climáticas, uso da terra e desenvolvimento no Brasil**. Brasília, DF: Ipea, 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento do desmatamento da floresta amazônica brasileira por satélite (PRODES)**. São José dos Campos: INPE, 2023.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill, 1941.

JOHN, D. A.; BABU, G. R. Lessons from the aftermaths of green revolution on food system and health. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, art. 644559, 22 fev. 2021. DOI: 10.3389/fsufs.2021.644559.

JOHNSON, D. L.; KELLER, E. A.; ROCKWELL, T. K. Dynamic pedogenesis: new views on some key soil concepts, and a model for interpreting quaternary soils. **Quaternary Research**, v. 33, n. 3, p. 306–319, 1990. DOI: 10.1016/0033-5894(90)90058-s.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

MACHADO, P. L. O. A. **Carbono do solo e mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Estatísticas do setor**. Brasília, DF: MAPA, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor. Acesso em: 2 mar. 2026.

MAPBIOMAS. **Relatório anual do uso e cobertura da terra no Brasil 2023**. São Paulo: MapBiomas, 2023.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 25–36, 2014.

MASHA, M.; BOJAGO, E.; BELAYNEH, M. Assessing the impacts of soil and water conservation practices on soil physicochemical properties in contrasting slope

landscapes of southern Ethiopia. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 14, p. 100876, 2023. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100876.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Legal**. Brasília, DF: MMA, 2020.

NOBRE, C. A. **Mudanças climáticas e a biodiversidade brasileira**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil**: guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal: Funep, 1992.

OPOLOT, E.; YU, Y. Y.; FINKE, P. A. Modeling soil genesis at pedon and landscape scales: achievements and problems. **Quaternary International**, [s. l.], v. 376, p. 1-13, 2015. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.02.017.

ORTIZ, A. M. D. *et al.* A review of the interactions between biodiversity, agriculture, climate change and international trade: research and policy priorities. **One Earth**, v. 4, n. 1, p. 88–101, 2021. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.12.008.

O'RIORDAN, R. *et al.* The ecosystem services of urban soils: a review. **Geoderma**, v. 395, p. 115076, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115076.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: PBMC, 2014.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo**: a agricultura em regiões tropicais. São Paulo: Nobel, 2002.

PSCH, R. *et al.* Nature's laws of declining soil productivity and conservation agriculture. **Soil Security**, v. 14, p. 100127, 2024. DOI: 10.1016/soisec.2024.100127.

PWC BRASIL. **A reinvenção do agronegócio brasileiro**: riscos climáticos e resiliência financeira. São Paulo: PwC, 2025.

REATTO, A. *et al.* Caracterização dos solos e sua associação com las fitofisionomias em uma bacia hidrográfica: aspectos pedológicos e químicos. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Planaltina: Embrapa Cerrados, n. 8, p. 1-23, dez. 1999.

SADIQ, F. K. Conservation agriculture for sustainable soil health: benefits of cover crops and residue retention. **Soil Systems**, v. 9, n. 3, 2025. DOI: 10.3390/soilsystems9030103.

SAHA, A. K. Impact of no-tillage, crop rotation, cover crops, and drainage on soil organic matter and water infiltration. **Soil & Tillage Research**, 2024. DOI: 10.1002/saj2.20614.

SILVA, A. C. Processos hidromórficos e ferrólise em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2025.

SILVA, A. de O. Agroecologia no Brasil: uma alternativa contra o modelo hegemônico na agricultura. **Serviço Social & Sociedade**, n. 148, n. 2, p. e–6628445, 2025.

SILVA, L. F. da *et al.* Pedogenesis and the study of lithological discontinuity in a Planosol in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 49, e0240221, 2025. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240221.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (SBCS). **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS – Núcleo Estadual Paraná (NEPAR), 2019. 325 p. ISBN 978-85-69146-08-7.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (SBCS). **O solo e as mudanças climáticas**. Viçosa: SBCS, 2019.

SUN, X. *et al.* Harnessing soil biodiversity to promote human health in cities. **Npj Urban Sustainability**, v. 3, art. 5, 2023. DOI: 10.1038/s42949-023-00086-0.

TELLES, T. S. *et al.* Práticas de manejo do solo adotadas pelos agricultores e como eles percebem a agricultura de conservação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0210151, 2022. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210151.

TOTSCHE, K. U.; RAY, N. Structure–function co-evolution during pedogenesis—microaggregate development and turnover in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [s. l.], v. 187, n. 1, p. 5-7, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/jpln.202400012.

VALLADARES, G. S.; ROCHA JÚNIOR, A. F.; AQUINO, C. M. S. de. Caracterização de solos no núcleo de desertificação de Gilbués, Piauí, Brasil, e sua relação com os processos de degradação. **Physis Terrae**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 115-135, 2020.

VEIGA, J. E. da. **Desenvolvimento sustentável**: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Garamond, 2010.

WROBLESCKI, F. A. *et al.* Assessed impact of anthropization on water and soil quality in a drainage basin in southern Brazil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 20, n. 1, p. 074–085, 2021. DOI: 10.5965/223811712012021074.

SINERGIA DE CRISES: IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BIODIVERSIDADE DA MATA ATLÂNTICA FRAGMENTADA

Liliani Marilia Tiepolo – Laboratório de Análise e Monitoramento da Mata Atlântica – UFPR[1]
Isabela de Sá Leal – Laboratório de Análise e Monitoramento da Mata Atlântica – UFPR[2]

1 INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica, quarto *hotspot* mundial de biodiversidade, é um bioma de extrema riqueza e elevado grau de endemismos (Myers et al, 2000). No entanto, sua história de ocupação humana resultou em uma paisagem profundamente alterada (Dean, 1996), onde restam aproximadamente 14% de sua cobertura original, majoritariamente composta por fragmentos florestais pequenos (< 50 ha) e isolados entre si em uma matriz antropizada (Ribeiro *et al.*, 2009; Rezende *et al.*, 2018). Esta configuração fragmentada, por si só, impõe uma série de pressões à biota, conforme previsto pela Teoria Biogeográfica de Ilhas (Mac Arthur & Wilson, 1967). Contudo, um novo e avassalador vetor de pressão agrava exponencialmente este cenário: as mudanças climáticas antropogênicas.

O problema de pesquisa central aqui exposto, portanto, não reside na análise isolada de qualquer um desses fatores, mas em trazer evidências de seus efeitos sinérgicos. A fragmentação do habitat não é apenas um legado do passado; é um condicionante crítico que modulará as respostas da biodiversidade às alterações do clima. Enquanto as mudanças climáticas ameaçam deslocar os nichos climáticos das

[1] Bióloga, Mestre em Ciências Florestais, Doutora em Ciências Biológicas (Zoologia) – liliani@ufpr.br
[2] Bacharela em Ciências Ambientais, Mestranda em Desenvolvimento Territorial Sustentável – Universidade Federal do Paraná, Laboratório de Análise e Monitoramento da Mata Atlântica – isabela.leal@ufpr.br

espécies, a paisagem fragmentada da Mata Atlântica ergue barreiras para a migração, adaptação e persistência dessas espécies. Esta sinergia entre uma paisagem fragmentada em intensa antropização e um clima em transformação representa uma ameaça existencial para a integridade biótica do bioma.

Nesta perspectiva assentam-se três pilares interligados: a) a iminente perda de biodiversidade única em escala global (Rockström *et al.*, 2009; Richardson *et al.*, 2023); b) o colapso potencial de serviços ecossistêmicos críticos para uma das regiões mais populosas do Hemisfério Sul; e c) a urgência em gerar conhecimento para orientar estratégias de conservação proativas e não apenas reativas.

Diante de uma problemática multifacetada, emerge a possibilidade de estruturar a problemática em categorias teóricas interconectadas capazes de dissecar e trazer luz à dimensão dos impactos sinérgicos, quais sejam: I - a partir da Teoria de Ilhas e Metapopulações, podemos compreender a vulnerabilidade inerente dos pequenos fragmentos, onde populações reduzidas enfrentam maior risco de extinção demográfica e genética, exacerbado pelo Efeito de Borda, que amplifica localmente os estresses climáticos (e.g., aumento de temperatura, redução de umidade). Neste caso, os fragmentos de floresta são microcenários de colapso acelerado. II - as Respostas das Espécies e Modelagem de Nicho Climático nos ajudam a projetar geograficamente as alterações na distribuição potencial de espécies-chave (endêmicas, ameaçadas ou espécies indicadoras), identificando áreas de estabilidade climática futura (refúgios) e áreas de extinção iminente. III – as Alterações nas Interações Biológicas nos permitem investigar o ponto de ruptura do sistema, ou seja, o desacoplamento de interações mutualísticas (ex., polinização, dispersão de sementes) devido a respostas assíncronas das espécies às mudanças climáticas, um processo que pode levar a florestas "vazias" e funcionalmente comprometidas. IV - a Teoria da Vulnerabilidade Integrada, nos proporciona um *framework* de síntese, para avaliar sistematicamente a Exposição (magnitude da mudança climática local), a Sensibilidade (características biológicas que tornam as espécies vulneráveis) e a Capacidade Adaptativa (potencial de persistência via resiliência, dispersão ou adaptação) da biodiversidade no bioma.

A Mata Atlântica enfrenta a crise da fragmentação, herdada do passado, agora fundindo-se com a crise climática do presente, criando um desafio de escala e

complexidade inéditas. Ignorar esta sinergia é condenar o bioma a um futuro de degradação irreversível e perda massiva de biodiversidade. A presente proposta busca apresentar alguns aspectos à luz das categorias propostas que já são conhecidos, mas que a partir do olhar interdisciplinar das ciências ambientais, buscam compreender os mecanismos que o regem. Busca-se traduzir o conhecimento ecológico orientando para a ação que objetive assegurar que os fragmentos remanescentes do hotspot global não sejam meros epitáfios de uma floresta outrora vasta, mas os núcleos resilientes de sua persistência e regeneração futura.

A partir do exposto, objetivamos construir um quadro teórico integrado que sintetize e articule os principais conceitos e evidências científicas sobre os impactos sinérgicos das mudanças climáticas e da fragmentação do habitat na biodiversidade da Mata Atlântica. A partir das categorias de análise centrais para o tema, nomeadamente: a Teoria de Ilhas e Metapopulações, a Modelagem de Nicho Climático, a Ecologia de Interações e a Teoria da Vulnerabilidade Integrada, iremos aportar exemplos, a partir de literatura revisada, dos mecanismos teóricos pelos quais a fragmentação existente atua como um filtro ecológico, ampliando a vulnerabilidade da biota aos estresses climáticos, com foco nos efeitos de borda, no isolamento e na perda de conectividade. Tais exercícios de inferência lógica baseado em evidências científicas, podem nos ajudar a visualizar as consequências potenciais dessas sinergias de pressões para a estrutura, composição e funcionamento do bioma, em especial no que tange ao colapso de interações ecológicas mutualísticas.

A ideia em teoria é iluminar os caminhos críticos pelos quais a crise climática se concretiza. Ao organizar o conhecimento em um quadro conceitual coerente, evidencia-se que a crise na Mata Atlântica é dupla e com auto poder de ampliação: a fragmentação espacial impõe uma barreira física à necessária resposta biológica às mudanças climáticas. A conclusão inevitável é que estratégias de conservação baseadas apenas na proteção (considerada precária) de fragmentos são insuficientes. O trabalho conclui defendendo a urgência de uma mudança de paradigma na conservação do bioma, que incorpore explicitamente a dinâmica climática atual e futura, priorizando o delineamento de paisagens funcionais, conectadas e resilientes Para além da proteção, se faz necessário um olhar que incorpore a dimensão humana da biodiversidade e de áreas protegidas que estão além de unidades de conservação

– além da preemente necessidade de restauração florestal. A persistência da excepcional biodiversidade da Mata Atlântica dependerá, em última análise, de capacidade humana de traduzir as bases científicas já existentes em ação estratégica e imediata, considerando ainda a dimensão humana e suas dinâmicas na paisagem.

1.1 A MATA ATLÂNTICA: DISTRIBUIÇÃO, ESTADO ATUAL E CONTEXTO SOCIOECOLÓGICO

A Mata Atlântica é um bioma de caráter predominantemente florestal que originalmente estendia-se de forma contínua por mais de 1.3 milhão de km² ao longo da costa brasileira, com penetrações significativas no interior, especialmente na região sul e sudeste. Sua abrangência cobria total ou parcialmente 17 estados brasileiros, do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul, fazendo fronteira com outros importantes biomas, como o Cerrado, a Caatinga e o Pampa, bem como adentrando as fronteiras da Argentina e do Paraguai (SOS Mata Atlântica & INPE, 2023).

A paisagem atual, no entanto, é drasticamente diferente. Dados do mais recente Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica indicam que restam apenas 12,4% da cobertura original de floresta nativa em fragmentos acima de 3 hectares (SOS Mata Atlântica & INPE, 2023). Mas, quando se consideram os fragmentos menores e a vegetação natural de restingas, manguezais e campos de altitude, o índice sobe para 21,8% (Rezende *et al.*, 2018). É fundamental destacar que esta cobertura remanescente está extremamente fragmentada. Cerca de 80% dos fragmentos têm menos de 50 hectares, e estão imersos em uma matriz predominantemente agrícola e urbana, o que os torna altamente vulneráveis a efeitos de borda e ao isolamento (Ribeiro *et al.*, 2009).

A Mata Atlântica não é apenas um bioma; é o coração socioeconômico do Brasil. Em seu domínio territorial original, que hoje corresponde a apenas 28% do território nacional, reside aproximadamente 72% da população brasileira, o que equivale a mais de 145 milhões de pessoas (IBGE, 2022). O bioma abriga as três maiores regiões metropolitanas do país (São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte) e 9 das 10 maiores cidades brasileiras.

Economicamente, o bioma responde por mais de 70% do PIB nacional (Fundação SOS Mata Atlântica, 2019), concentrando os principais polos industriais, financeiros, comerciais e de serviços, além de ser a base para extensas áreas de agricultura intensiva (cana-de-açúcar, soja, milho, café, laranja) e pecuária. Esta intensa pressão antrópica histórica e contemporânea é a causa direta do seu estado crítico de fragmentação, criando um conflito direto entre a conservação da biodiversidade e as atividades econômicas.

1.2 BIODIVERSIDADE: UM *HOTSPOT* AMEAÇADO

A designação da Mata Atlântica como um *hotspot* global de biodiversidade (Mittermeier *et al.*, 2011) reflete sua excepcional riqueza biológica e seu grau extremo de ameaça. Estima-se que o bioma abrigue entre 1% e 8% de toda a biodiversidade mundial em um território que representa menos de 0,8% da superfície terrestre (Myers *et al.*, 2000); mais de 20.000 espécies de plantas, das quais cerca de 8.000 são endêmicas (exclusivas do bioma). Em um único hectare de floresta podem ser encontradas mais espécies de árvores do que em todo o continente europeu (Stehmann *et al.*, 2009).

A fauna é igualmente notável, com 1.417 espécies de vertebrados terrestres conhecidos, sendo 567 endêmicos. Neste aspecto, destacam-se os mamíferos com 298 espécies, incluindo símbolos da conservação como o mico-leão-dourado (*Leontopithecus rosalia*), as últimas onças-pintadas (*Panthera onca*) e o muriqui-do-sul (*Brachyteles arachnoides*), o maior primata das Américas (Paglia *et al.*, 2012); as aves com mais de 900 espécies, possuindo cerca de 200 espécies endêmicas, como o papo-amarelo (*Carpornis melanocephala*) (BirdLife International, 2023); e anfíbios, com uma das maiores taxas de endemismo para este grupo, com inúmeras espécies de pererecas e sapos dependentes críticos da umidade e da estrutura florestal (Haddad *et al.*, 2013).

Esta imensa riqueza, no entanto, convive com múltiplas ameaças advindas dos fatores históricos de desenvolvimento do bioma, uma vez que cerca de 49% das espécies de plantas e 41% das espécies de vertebrados ameaçados de extinção no

Brasil são originários da Mata Atlântica (MMA, 2022), tornando-a um epicentro global da crise de biodiversidade.

2 A FRAGMENTAÇÃO COMO CRIADORA DE ILHAS TERRESTRES: A ESTRUTURA DE UMA CRISE ANUNCIADA

A Teoria da Biogeografia de Ilhas, proposta por MacArthur & Wilson (1967), postula que ilhas oceânicas possuem taxas de imigração e extinção balanceadas pela sua área e isolamento. Fragmentos florestais, circundados por uma "matriz oceânica" de pastagens, agricultura e áreas urbanas, comportam-se como ilhas terrestres, operando sob as mesmas regras fundamentais. Na Mata Atlântica, onde mais de 80% dos remanescentes possuem menos de 50 hectares (Ribeiro *et al.*, 2009), esta analogia não é meramente metafórica, mas uma realidade ecológica cruel que estrutura toda a crise de biodiversidade.

A aplicação desta teoria ao bioma revela três mecanismos interligados de vulnerabilidade, área, isolamento e efeito de borda, vejamos:

Efeito de área: Fragmentos menores suportam populações menores, que são intrinsecamente mais vulneráveis à extinção por fatores estocásticos (aleatórios), como eventos demográficos (ex.: nascimento apenas de filhotes de um sexo), genéticos (ex.: endogamia e deriva gênica) e ambientais (ex.: uma seca severa ou uma tempestade). O estudo de Pardini *et al.* (2010) demonstrou que a probabilidade de extinção de pequenos mamíferos em fragmentos da Mata Atlântica aumenta drasticamente com a redução da área, um efeito que será intensificado pela maior frequência de eventos climáticos extremos.

Efeito de isolamento: A distância entre os fragmentos impede ou reduz drasticamente o fluxo gênico e a recolonização. Espécies com baixa capacidade de dispersão, como muitos anfíbios e mamíferos de pequeno porte, ficam confinadas. Pesquisas com aves, como as do gênero *Pyriglena* (papa-taocas), mostraram que o isolamento leva à diferenciação genética entre populações, sinalizando a interrupção do fluxo gênico (Meyer *et al.*, 2017). Num contexto de mudança climática, onde as espécies precisam "migrar" para acompanhar o deslocamento de seu nicho climático, a matriz hostil e o isolamento tornam-se barreiras intransponíveis.

Efeito de borda: Este é o ponto onde a fragmentação e as mudanças climáticas interagem de forma mais direta e sinérgica. A criação de bordas expostas altera o microclima local: a incidência de vento e luz solar aumenta, enquanto a umidade do ar e do solo diminui (Laurance *et al.*, 2002). Este ambiente de borda é, por si só, um estressor climático localizado. Espécies do interior da floresta, adaptadas a condições estáveis de sombra e umidade, são substituídas por espécies generalistas e pioneiras tolerantes ao estresse. O trabalho de Tabarelli *et al.* (2010) documentou como o efeito de borda leva a um processo de biomassa e biodiversidade empobrecidas (*biomass and biodiversity erosion*) na Mata Atlântica, homogeneizando a floresta.

2.1 A SINERGIA COM AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: AMPLIFICANDO OS RISCOS

A crise climática global não substitui esses efeitos; ela os amplifica. O aumento da temperatura média e a alteração no regime de chuvas projetados pelos modelos climáticos (IPCC, 2022) atuam em sinergia com os mecanismos da fragmentação:

Amplificação do estresse de borda: o aumento da temperatura global potencializa o estresse térmico e hídrico já experimentado nas bordas dos fragmentos. O que era uma condição marginal pode se tornar letal, aprofundando o efeito de borda para o interior do fragmento, reduzindo ainda mais o habitat de interior de alta qualidade. Um fragmento de 50 hectares pode, efetivamente, comportar-se como um de 20. Ewers e Banks-Leite (2013) constataram que este efeito pode reduzir as temperaturas máximas externas em um terço ou mais no interior da floresta em um fragmento florestal da mata atlântica de São Paulo. Este "efeito tampão" é severamente reduzido próximo às bordas dos fragmentos. O estresse térmico e hídrico gerado pela borda, como a entrada de ventos mais quentes e secos, se estende por até 20 metros para o interior do fragmento.

Extinções em cascata: populações pequenas e isoladas, já debilitadas pela endogamia e pela escassez de recursos, possuem resiliência drasticamente reduzida para suportar secas prolongadas, incêndios, ondas de calor ou tempestades mais intensas. Um evento climático extremo, que em uma população grande e conectada

seria um revés, em um fragmento pequeno pode ser o gatilho para a extinção local (Wilson *et al.*, 2021; Tonetti *et al.*, 2022; Araújo *et al.*, 2025).

Bloqueio da resposta migratória: a necessidade mais premente frente às mudanças climáticas é a movimentação. As mais distintas espécies precisam se deslocar para latitudes ou altitudes mais adequadas (Chen *et al.*, 2011). No entanto, a paisagem fragmentada da Mata Atlântica, com seus fragmentos-ilhas isolados, funciona como uma prisão. A modelagem de distribuição de espécies feita por Colombo & Joly (2010) já alertava que as mudanças climáticas forçariam um deslocamento da biodiversidade, mas a matriz antrópica impede essa migração, criando um descompasso (*mismatch*) fatal entre as espécies e seu clima adequado.

3 PROJETANDO O FUTURO DA BIODIVERSIDADE: MODELAGEM DE NICHO CLIMÁTICO E A BUSCA POR REFÚGIOS

Se a Teoria de Ilhas explica a vulnerabilidade estrutural da Mata Atlântica, a Modelagem de Nicho Climático (MNC) procura prever suas consequências funcionais. Esta ferramenta computacional, fundamentada na teoria do nicho ecológico (Hutchinson, 1957), permite projetar geograficamente como a distribuição potencial das espécies pode se deslocar, expandir ou contrair em resposta às mudanças climáticas. A ideia central é que as espécies estão associadas a condições climáticas específicas (seu nicho fundamental), e a alteração dessas condições forçará um rearranjo biogeográfico em larga escala.

A MNC cruza dados de ocorrência conhecida de uma espécie com variáveis climáticas do presente (ex.: temperatura média, precipitação do trimestre mais seco) para gerar um modelo preditivo de sua distribuição potencial. Ao aplicar esse modelo a cenários climáticos futuros (projetados pelo IPCC), é possível mapear áreas que se tornarão climaticamente inadequadas (áreas de extinção), adequadas (áreas de ganho) ou que permanecerão estáveis (refúgios climáticos).

No contexto da Mata Atlântica fragmentada, no entanto, a MNC revela sua limitação mais crítica: ela modela onde o clima será adequado, mas não se a espécie conseguirá se adaptar, tornando explícita a sinergia da fragmentação. A MNC aponta para um quadro do "mundo possível" para as espécies, enquanto a realidade dos

fragmentos isolados define o "mundo acessível". Esta dissonância pode ser considerada um dos cernes da crise.

Os estudos aplicando MNC no bioma têm gerado previsões alarmantes, consistentes com o padrão de *hotspot*:

Redução geral de área adequada: uma análise pioneira de Colombo & Joly (2010) projetou que, mesmo em um cenário otimista de emissões, a Mata Atlântica poderia perder até 30% de sua área climaticamente adequada para a vegetação arbórea até 2100. Espécies com distribuição restrita (endêmicas) são as mais ameaçadas, pois suas opções de migração são naturalmente limitadas.

Vulnerabilidade de espécies-chave: Pesquisas focadas em espécies estruturantes do ecossistema, como o pau-brasil (*Paubrasilia echinata*) e o palmiteiro (*Euterpe edulis*), indicam severas contrações em suas áreas climaticamente adequadas. Um estudo sobre o palmiteiro, crucial para a fauna frugívora, projetou perdas superiores a 50% de sua área potencial, com o deslocamento dos refúgios para regiões de altitude no sul do bioma (Sousa-Baena *et al.*, 2018). A partir destes resultados podemos questionar: esses refúgios futuros ainda possuirão fragmentos florestais significativos para receber e sustentar essas populações? As pesquisas de Zwiener *et al.* (2017) concluem que a expansão de espécies generalistas e tolerantes a distúrbios, em vez da extinção ou retração de espécies endêmicas locais, pode levar à homogeneização de plantas lenhosas nos trópicos. Esta pesquisa revela que o conjunto de plantas lenhosas na Mata Atlântica está sujeito a uma reorganização estrutural devido às mudanças climáticas, ameaçando a conservação da biodiversidade e potencialmente levando a uma severa homogeneização biótica em larga escala num futuro próximo (Zwiener *et al.*, 2017).

Mudanças em grupos faunísticos: Para a fauna, os impactos são igualmente graves. Modelagens para anfíbios endêmicos, como as pererecas-de-bromélia do gênero *Crossodactylus*, preveem uma drástica redução na área de clima adequado, confinando-as a ilhas no topo das montanhas – que podem não existir fisicamente ou já estarem isoladas (Vancine *et al.*, 2021). Para as aves, um estudo com a saíra (*Nemosia rourei*), um dos pássaros mais ameaçados do mundo e restrito a poucos fragmentos no Espírito Santo, mostra que as mudanças climáticas podem eliminar o já exíguo clima adequado em sua atual área de ocorrência, sem indicar claramente

para onde a espécie poderia migrar (BirdLife International, 2023). Já os resultados de pesquisas com modelagem de nicho realizada com espécies polinizadas por beija-flores, sugerem que elas são propensas a mudanças em sua distribuição geográfica e floração sob diferentes cenários climáticos. Segundo Correa-Lima *et al.* (2019) tal variação poderá afetar a estrutura comunitária das redes ecológicas e o sucesso reprodutivo das plantas tropicais. A redistribuição das plantas estruturantes e das fenofases que regulam a produção de frutos e flores pode provocar um desacoplamento alimentar entre fauna e flora, desencadeando extinções secundárias, especialmente em espécies mutualistas estritas.

O lado "otimista" da MNC é a identificação de refúgios climáticos como áreas que, devido a características topográficas ou de resiliência ecológica, devem manter condições climáticas relativamente estáveis no futuro. Na Mata Atlântica, esses refúgios são frequentemente associados a regiões de maior altitude, como a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira (Rezende *et al.*, 2018).

No entanto, a existência teórica de um refúgio é apenas o primeiro passo. A pergunta crucial é: os refúgios climáticos identificados coincidem com os remanescentes florestais bem conservados e suficientemente conectados? Estão protegidos por Unidades de Conservação de Proteção Integral? Possuem tamanho suficiente para suportar populações selvagens e as pressões antrópicas do entorno? Se um refúgio climático futuro estiver localizado em uma região hoje intensamente desmatada, ele será uma "arca vazia", um porto seguro inacessível para a maioria das espécies. A sinergia de crises, portanto, atua em duas frentes: 1) torna inóspitas as áreas onde as espécies estão hoje confinadas, e 2) coloca barreiras, que podem ser intransponíveis, entre elas e as áreas que permanecerão habitáveis.

4 SILENCIAMENTO ECOLÓGICO: DESACOPLAMENTO DE INTERAÇÕES NA MATA ATLÂNTICA FRAGMENTADA

As espécies não existem de forma isolada; sua persistência é sustentada por uma complexa rede de interações ecológicas – como polinização e dispersão de sementes – que formam a arquitetura funcional do ecossistema. O ponto de ruptura mais crítico da sinergia entre fragmentação e mudanças climáticas ocorre justamente

nesse nível, através do desacoplamento fenológico (Sánches-Ochoa *et al.*, 2022). Este fenômeno refere-se à dessincronização temporal entre espécies que coevoluíram, causada por suas respostas distintas aos mesmos estressores ambientais (Cushing, 1969). O resultado potencial são florestas "vazias" – aparentemente verdes, mas funcionalmente comprometidas (ver Redford, 1992).

Estudos de ecologia de redes, pioneiros como os de Bascompte *et al.* (2003), demonstraram que as interações mutualísticas possuem uma arquitetura aninhada e modular que confere robustez a perturbações aleatórias. No entanto, esta robustez é vulnerável à perda de espécies-chave (*hubs*) ou à quebra de ligações específicas. O estudo nos leva a deduzir que a fragmentação e as mudanças climáticas atuam exatamente nesses pontos de fragilidade. A fragmentação elimina fisicamente as espécies, especialmente grandes vertebrados, enquanto as mudanças climáticas podem alterar o *timing* (ex. fenologia) dessas interações, desfazendo os elos da rede, ou seja, a arquitetura robusta das interações ecológicas evidencia a fragilidade das redes mutualísticas. Algumas pesquisas no bioma trazem evidências de dessincronização na Mata Atlântica, fornecendo indícios concretos de como essa crise se manifesta. Entre estes, de particular preocupação são as alterações na fenologia da floração, considerada um traço de aptidão e parte do nicho ecológico de espécies vegetais, com potenciais efeitos em cascata nas interações planta-polinizador (Correa-Lima *et al.*, 2019).

Polinização em risco: Muitas plantas da Mata Atlântica possuem interações específicas com polinizadores. Uma planta pode antecipar sua floração em resposta a um inverno mais quente, mas seu polinizador específico (como uma abelha solitária ou um beija-flor) pode basear seu ciclo reprodutivo na duração do dia, que é imutável. Esta assincronia pode levar a uma falha na polinização e, consequentemente, na produção de frutos. Embora mais estudos de longo prazo sejam necessários, algumas pesquisas com plantas já documentam essa dessincronização (Marquis *et al.*, 2019; Correa-Lima *et al.*, 2019).

Colapso da dispersão de sementes (defaunação): Este é o exemplo mais bem documentado do desacoplamento. A fragmentação do habitat leva à defaunação, que é a extinção local de grandes mamíferos e aves frugívoras, como antas, queixadas, tucanos e jacutingas (Redford, 1992; Galetti & Dirzo, 2013). Estes animais são os

principais dispersores de sementes de grandes árvores e de espécies arbóreas fundamentais para a biomassa florestal. O trabalho de Galetti *et al.* (2013) na Mata Atlântica demonstrou que a ausência desses dispersores está levando a uma "síndrome da dispersão limitada", onde apenas plantas com sementes pequenas, dispersas por animais generalistas que toleram a fragmentação, são capazes de se regenerar. Isto resulta em um empobrecimento funcional da floresta, com mudanças em sua composição e estrutura a longo prazo. As mudanças climáticas exacerbam este cenário, pois impõem estresse adicional sobre as árvores remanescentes e dificultam ainda mais a migração das espécies vegetais, que dependem dos dispersores para escapar de condições climáticas inadequadas.

Simplificação de redes tróficas: A perda de um predador de topo, como a onça-pintada (ver Galetti *et al.*, 2013), pode desencadear efeitos cascata (*mesopredator release*), aumentando desproporcionalmente a população de predadores médios (como gambás, cachorros-do-mato e quatis) (ver Kuhnen *et al.*, 2019), que podem predar mais intensamente ninhos de aves ou pequenos anfíbios. Esta simplificação da rede trófica reduz a resiliência do ecossistema como um todo, tornando-o mais vulnerável a invasões biológicas e a perturbações climáticas.

A sinergia pode conduzir ao colapso funcional, quando a interação entre fragmentação e mudanças climáticas acelera o desacoplamento de forma sinérgica, podemos utilizar dois exemplos para deixar mais clara a situação: (1) *o isolamento genético e a perda de plasticidade*: quando populações pequenas e isoladas em fragmentos perdem variabilidade genética. Esta diversidade genética reduzida limita sua capacidade de adaptação evolutiva rápida e sua plasticidade fenotípica (capacidade de um genótipo produzir diferentes fenótipos em resposta ao ambiente). Assim, quando o clima muda, essas populações têm menos "opções" para ajustar seu *timing* fenológico, aumentando o risco de dessincronização com seus mutualistas. (2) *Efeito de borda sobre a fenologia*: o microclima alterado nas bordas dos fragmentos – mais quente e seco – pode induzir mudanças fenológicas nas plantas que ali sobrevivem. Se uma planta na borda florescer em um período diferente da mesma espécie no interior do fragmento, pode perder a sincronia com seu polinizador, que pode estar mais associado ao microclima estável do interior.

5 SÍNTESE DA AMEAÇA: A VULNERABILIDADE INTEGRADA DA MATA ATLÂNTICA

Diante da complexidade dos impactos sinérgicos entre mudanças climáticas e fragmentação, faz-se necessária uma estrutura conceitual que permita uma avaliação sistemática e integrada dos riscos. A Teoria da Vulnerabilidade Integrada, amplamente adotada pelo IPCC, oferece este *framework* síntese, decompondo a vulnerabilidade total de um sistema socioecológico em três componentes inter-relacionados: Exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. A aplicação desta lógica à Mata Atlântica revela com clareza a magnitude da crise e aponta para os focos prioritários de ação. Abaixo segue uma síntese dos pilares da vulnerabilidade no bioma.

Exposição (a magnitude da perturbação climática): refere-se ao grau em que o sistema experimenta mudanças climáticas. A Mata Atlântica está exposta a projeções de aumento de temperatura, alteração no regime de chuvas (com intensificação de secas no Nordeste e chuvas intensas no Sudeste e Sul) e maior frequência de eventos climáticos extremos (IPCC, 2022). Esta exposição não é homogênea; regiões como o corredor central do bioma (ex.: sul da Bahia) podem enfrentar aumentos de temperatura mais acentuados do que as regiões serranas do sul, tornando-se, portanto, mais expostas.

Sensibilidade (a propensão a ser afetada): diz respeito às características intrínsecas que tornam o bioma ou suas espécies suscetíveis aos impactos. A Mata Atlântica possui sensibilidade extremamente alta devido à sua própria história evolutiva. Sua biota é composta por uma grande riqueza de espécies endêmicas, especialistas e com distribuição restrita. Espécies como o muriqui-do-sul (*Brachyteles arachnoides*), adaptado a florestas contínuas e com dieta especializada, ou anfíbios anuros de riachos preservados ou de cumes de montanhas, são inerentemente mais sensíveis do que espécies generalistas e cosmopolitas. A configuração fragmentada do habitat, com populações pequenas e isoladas, é o principal fator que amplifica a sensibilidade biológica à exposição climática.

Capacidade adaptativa (o potencial de ajuste): é a habilidade do sistema de lidar com os impactos, através de resiliência ecológica, dispersão, adaptação genética

ou intervenção humana. Este é o componente mais crítico e, na Mata Atlântica, também o mais comprometido. A capacidade adaptativa natural é baixa: a matriz hostil de pastagens, cidades, polos industriais em expansão impede a migração para acompanhar o deslocamento do nicho climático; a fragmentação reduz o fluxo gênico, limitando a adaptação evolutiva; e a defaunação compromete a regeneração florestal e a resiliência funcional (Tabarelli *et al.*, 2010). A capacidade adaptativa, portanto, não é uma propriedade intrínseca da biota, mas é determinada pela estrutura da paisagem.

A aplicação do *framework*, integra os tópicos anteriores, uma vez que a vulnerabilidade integrada surge da interação destes três componentes, e cada categoria de análise anterior se encaixa perfeitamente neste modelo: *A Teoria de Ilhas* (Tópico 2) explica a alta sensibilidade (populações pequenas) e a baixa capacidade adaptativa (isolamento) inerentes aos fragmentos. *A modelagem de nicho climático* (Tópico 3) quantifica a exposição geográfica das espécies e identifica onde a capacidade adaptativa via migração é mais crítica (os refúgios). As *alterações nas interações biológicas* (Tópico 4) representam a materialização da vulnerabilidade, onde a alta sensibilidade de interações especializadas e a baixa capacidade adaptativa das populações levam ao desacoplamento.

Um exemplo concreto pode ser visto em espécies de árvores de dossel com sementes grandes, como a jatobá (*Hymenaea courbaril*). Sua exposição é alta (são sensíveis a secas prolongadas); sua sensibilidade é alta (depende de dispersores de grande porte, como antas e queixadas, mamíferos que foram localmente extintos em muitos fragmentos e que são considerados criticamente ameaçados de extinção na maior parte da Mata Atlântica); e sua capacidade adaptativa é baixa (sem dispersores, não pode migrar para áreas climaticamente adequadas). Esta combinação a torna uma espécie de altíssima vulnerabilidade.

A vulnerabilidade integrada, portanto, aponta o caminho: as estratégias de conservação devem transcender a proteção de fragmentos individuais e focar na criação de uma paisagem funcionalmente conectada, como apontam as pesquisas de Oliveira-Junior *et al.* (2020), com corredores ecológicos que liguem os remanescentes atuais aos refúgios climáticos futuros. Mais do que isso é necessário conservar para além das unidades de conservação. Estas medidas podem vir de encontro às

recomendações de Hatfield *et al.* (2018), para o quais é necessário melhorar a conectividade funcional e a área de habitat ao redor das grandes redes remanescentes, permitindo que os organismos se dispersem em habitats anteriormente isolados, revertendo assim as extinções locais. Melhorar a conectividade funcional (incluindo restauração em larga escala) traz condições de manutenção a longo prazo para as comunidades de espécies nativas da Mata Atlântica, tornando possível conferir à biodiversidade do bioma a resiliência necessária para superar a crise climática do século XXI, diante de cenários de intensa antropização crônica.

6 APONTAMENTOS INQUIETANTES FINAIS

A Teoria de Ilhas e Metapopulações fornece a estrutura conceitual fundamental para entender o porquê da Mata Atlântica fragmentada ser tão vulnerável. Ela não é um bioma adoecido apenas pelo passado e presente de desmatamentos que nunca cessaram, mas um bioma estruturalmente preparado para sofrer colapsos em cascata quando submetido ao estresse adicional das mudanças climáticas. Os fragmentos não pequenos e isolados, tornando-se armadilhas ecológicas em um planeta em aquecimento.

A Modelagem de Nicho Climático traz luz aos pontos de conflito futuros entre o clima e a biodiversidade, destacando que a simples existência de refúgios climáticos não é suficiente. Sua utilidade máxima está em guiar, com urgência, ações de conservação – como a melhoria da conectividade e a restauração de corredores ecológicos que liguem os fragmentos atuais a esses refúgios futuros, que pode evitar a projeção de um colapso para sua evitação.

As alterações nas interações biológicas representam a materialização da crise em seu nível mais complexo. Não se trata da perda de espécies individuais, mas do colapso dos processos ecológicos que sustentam a regeneração, a resiliência e a própria identidade funcional da Mata Atlântica: o fim das contribuições da natureza para as pessoas. Uma floresta desacoplada é uma floresta condenada à simplificação e à lenta degradação, mesmo que suas árvores ainda permaneçam de pé. Este

"silenciamento ecológico" é talvez a consequência mais profunda e duradoura da sinergia de crises.

A avaliação integrada deixa claro que a vulnerabilidade da Mata Atlântica não é um destino inevitável, mas uma condição modulável pela ação de ações de conservação. Enquanto, por um lado, a exposição às mudanças climáticas só pode ser mitigada globalmente, por outro, a sensibilidade e, sobretudo, a capacidade adaptativa pode ser gerida local e regionalmente. Reduzir a sensibilidade significa combater os fatores de degradação local (caça, fogo, poluição, impactos ambientais de grandes projetos de investimento). Porém, o maior desafio é fortalecer a capacidade adaptativa do bioma, o que se traduz, essencialmente, em aumentar a conectividade funcional da paisagem (Oliveira-Júnior *et al.*, 2020).

A vulnerabilidade integrada aponta o caminho para que as estratégias de conservação integradas transcendam a proteção de fragmentos individuais e foque na criação de uma paisagem funcionalmente conectada, com corredores ecológicos que liguem os remanescentes atuais aos refúgios climáticos futuros. Este é um caminho possível para conferir à biodiversidade da Mata Atlântica a resiliência necessária para superar a crise climática do século XXI, diante de cenários de intensa antropização crônica.

Para que essa transformação da paisagem se concretize, é necessário avançar de uma visão conceitual para uma abordagem operacional, capaz de integrar dados ecológicos, geográficos e climáticos em ferramentas de planejamento territorial associados com a dimensão humana a partir de uma abordagem socioambiental. A conectividade, nesse sentido, deve ser compreendida como um processo dinâmico, complexo e integrado que leva em conta os deslocamentos potenciais das espécies frente às mudanças climáticas e os limites impostos pela fragmentação atual. Isso implica incorporar critérios de funcionalidade ecológica e de projeção climática na definição de áreas prioritárias para restauração, ampliando a conservação para além da manutenção de fragmentos e promovendo uma estratégia adaptativa de reorganização da paisagem. A abordagem inclui avaliar os impactos sinérgicos das mudanças climáticas e da fragmentação do habitat sobre a biodiversidade da Mata Atlântica, identificando os grupos taxonômicos, processos ecológicos e regiões do bioma mais vulneráveis, a fim de subsidiar estratégias prioritárias de conservação e

restauração. Outras possibilidades de pesquisa incluem: a) modelar a distribuição geográfica potencial futura de um conjunto de espécies representativas da Mata Atlântica (incluindo espécies endêmicas, de dossel, do sub-bosque e de topo de cadeia), sob diferentes cenários de mudanças climáticas, de acordo com os dados do IPCC; b) quantificar a sobreposição espacial entre os fragmentos florestais remanescentes (com diferentes classes de área e conectividade) e as áreas projetadas de adequação climática futura para as espécies-alvo, mapeando zonas de risco e potenciais refúgios climáticos; c) analisar, por meio de revisão sistemática e meta-análise, como a fragmentação existente pode impedir ou limitar a capacidade de dispersão das espécies necessária para acompanhar o deslocamento de seus nichos climáticos; d) investigar a vulnerabilidade de interações ecológicas chave (ex., uma rede planta-polinizador específica) à dessincronização fenológica induzida pelo clima, utilizando modelos de redes ecológicas; e) sintetizar os resultados em um mapa de vulnerabilidade integrada do bioma, propondo diretrizes espacialmente explícitas para a criação de corredores ecológicos, a restauração de paisagens e o manejo adaptativo, visando maximizar a resiliência da Mata Atlântica frente às mudanças climáticas.

Em síntese, a sinergia entre fragmentação paisagística e mudanças climáticas posiciona a Mata Atlântica em um limiar ecológico crítico, no qual a inércia significa amplificação do colapso, mas a ação orientada por ciência integrada pode reverter trajetórias de perda. A transição para uma conservação antecipatória — que integre conectividade ecológica, projeções climáticas e resiliência baseada em processos — representa não apenas uma estratégia possível, mas uma emergência para que a Mata Atlântica deixe de resistir fragmentada e possa, novamente, responder conectada.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, F. de C. *et al.* Post-fire trajectories in Atlantic forest regeneration: a case study in fragmented landscapes. **Forest Ecology *CERNE***, v. 31, e-103464, 2025.

BASCOMPTE, J., *et al.* The nested assembly of plant–animal mutualistic networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 100(16), 9383–9387, 2003.

BIRDLIFE INTERNATIONAL. **Endemic Bird Areas factsheet**: Atlantic Forest lowlands, 2023.

BIRDLIFE INTERNATIONAL. **Species factsheet**: *Nemosia rourei*, 2023.

CHEN, I. *et al.* Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 1024-1026, 2011.

COLOMBO, A. F., & JOLY, C. A. Brazilian Atlantic Forest lato sensu: the most ancient Brazilian forest, and a biodiversity hotspot, is highly threatened by climate change. **Brazilian Journal of Biology**, 70(3), 697-708, 2010.

CUSHING, D. H. The regularity of the spawning season of some fishes. **Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer**, v. 33, n. 1, p. 81-92, 1969.

DEAN, Warren. **A ferro e fogo**: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.

EWERS, R. M.; BANKS-LEITE, C. Fragmentation impairs the microclimate buffering effect of tropical forests. **PLoS ONE**, v. 8, n. 3, p. e58093, 2013.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Relatório Anual 2019**, 2019.

GALETTI, M., & DIRZO, R. Ecological and evolutionary consequences of living in a defaunated world. **Biological Conservation**, 163, 1-6., 2013.

GALETTI, M., *et al.* Functional extinction of birds drives rapid evolutionary changes in seed size. **Science**, v. 340, n. 6136, 1086-1090, 2013.

GALETTI, M. *et al.* Atlantic Rainforest's Jaguars in Decline. **Science**, v. 342, n. 6161, p. 930, 2013.

HADDAD, C. F. B., *et al.* **Guia dos Anfíbios da Mata Atlântica**: Diversidade e Biologia. São Paulo, 2013.

HATFIELD, J. H.; ORME, C. D. L.; BANKS-LEITE, C. Using functional connectivity to predict potential meta-population sizes in the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, 2018, p. 215-220.

HUTCHINSON, G. E. **Concluding remarks**. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 22, 415–427, 1957.

IBGE. **Censo Demográfico** 2022.

IPCC. Climate Change 2022: **Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.

KUHNEN, V. V. *et al.* Coupled population dynamics of two Neotropical marsupials driven by mesopredator's abundance. **Population Ecology**, v. 61, n. 4, p. 368-378, 2019.

LAURANCE, W. F., *et al.* Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. **Conservation Biology**, 16(3), 605-618, 2002.

MACARTHUR, R. H., & WILSON, E. O. **The Theory of Island Biogeography** (Rev-Revised). Princeton University Press., 1967.

MARQUIS, R. J., *et al.* Direct and indirect effects of climate on plants: the roles of insect pollinators and seed dispersers. **In**: Climate Change and Terrestrial Ecosystems in South America. Springer, 2019.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção**, 2022.

MITTERMEIER, R. A., *et al.* **Global Biodiversity Conservation**: The Critical Role of Hotspots, 2011.

MEYER, A. L. S., *et al.* Molecular data reveal complex hybridization and a cryptic species of Neotropical wild cat. **Current Biology**, 27(17), 2657-2661., 2017.

MYERS, N., *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 403(6772), 853–858, 2000.

OLIVEIRA-JUNIOR, N. D.; HERINGER, G.; BUENO, M. L.; PONTARA, V.; MEIRA-NETO, J. A. A. Prioritizing landscape connectivity of a tropical forest biodiversity hotspot in global change scenario. **Forest Ecology and Management**, v. 472, 118247, 2020.

PAGLIA, A. P., *et al.* Lista Anotada dos Mamíferos do Brasil. **Occasional Papers in Conservation Biology,** 2012.

PARDINI, R., *et al.* Beyond the fragmentation threshold hypothesis: regime shifts in biodiversity across fragmented landscapes. **PLoS One**, 5(10), e13666., 2010.

REDFORD, Kent H. The empty forest. **BioScience**, v. 42, n. 6, p. 412-422, 1992.

REZENDE, C. L., *et al.* From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation,** 16(4), 208-214, 2018.

RIBEIRO, M. C., *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, 142(6), 1141–1153, 2009.

RICHARDSON, K. *et al.* Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances,** v. 9, n. 37, eadh2458, 2023.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, p. 32, 2009.

SÁNCHEZ-OCHOA, A. *et al.* Phenological diversity in tropical forests: a case study in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 142, 109265, 2022.

SOS MATA ATLÂNTICA & INPE. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica** - Período 2021-2022. 2023.

SOUSA-BAENA, M. S., *et al.* Completing the puzzle: broad-scale modeling of a threatened palm tree in the Atlantic Forest. **Biodiversity and Conservation**, 27(3), 683-702, 2018.

STEHMANN, J. R., *et al.* **Plantas da Floresta Atlântica**. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2009.

TABARELLI, M., *et al.* Prospects for biodiversity conservation in the Atlantic Forest: Lessons from aging human-modified landscapes. **Biological Conservation,** 143(10), 2328-2340, 2010.

TONETTI, V. *et al.* Forest regeneration may reduce the negative impacts of climate change on the biodiversity of a tropical hotspot. **Diversity and Distributions**, v. 28, n. 12, p. 16, 2022.

VANCINE, M. H., *et al.* Atlantic Amphibians: a data set of amphibian communities from the Atlantic Forests of South America. **Ecology,** 102(3), e03234, 2021.

WILSON, O. J. *et al.* Floristic change in Brazil's southern Atlantic Forest biodiversity hotspot: From the Last Glacial Maximum to the late 21st Century. **Quaternary Science Reviews**, v. 264, 2021,107005.

ZWIENER, V.P.; LIRA-NORIEGA, A.; GRADY, C.J.; PADIAL, A.A.; VITULE, J.R.S. Climate change as a driver of biotic homogenization of woody plants in the Atlantic Forest. **Global Ecology and Biogeography**. 27: 298–309, 2018.



II
CLIMA, TERRITÓRIO E EXTREMOS

CLIMATOLOGIA URBANA E ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS: REVISÃO E APLICAÇÕES NO CONTEXTO BRASILEIRO

Martina Victoria Klein – PPGGEO/UFPR [1]
Wilson Flavio Feltrim Roseghini – PPGGEO/UFPR [2]
Francisco Jablinski Castelhano – PPGGEO/UFRN [3]

1 INTRODUÇÃO

O estudo do clima urbano consolidou-se como um dos ramos mais relevantes da climatologia geográfica, sobretudo diante da expansão acelerada das cidades e da intensificação das interações entre sociedade e natureza. A climatologia urbana dedica-se a compreender as alterações que o ambiente construído impõe à atmosfera, resultado do chamado *efeito urbano*, cujos grandes indutores foram a Revolução Industrial e a urbanização acelerada, conforme discutido por autores da climatologia urbana contemporânea.

Caracterizado por modificações locais do clima causadas por fatores como alta densidade de construções, ampla cobertura impermeável do solo e uso extensivo de materiais escuros (Emilsson, 2021), o clima urbano influencia diretamente o bem-estar das populações, interferindo em aspectos como a qualidade do ar, a

[1] Mestranda em Geografia – martinavklein@hotmail.com
[2] Doutor em Geografia – feltrim@ufpr.br
[3] Doutor em Geografia – francisco.castelhano@ufrn.br

disponibilidade de recursos hídricos e a sensação térmica vivenciada nos ambientes urbanos

Os estudos nesta área tornaram-se ainda mais importantes em um mundo cada vez mais urbanizado, no qual a atmosfera das cidades expressa processos simultaneamente físicos e sociais. Como argumenta Monteiro (1976), os fenômenos climáticos urbanos devem ser analisados não apenas como eventos meteorológicos, mas como também como expressões sociais, econômicas e políticas do espaço urbano.

O interesse científico pelas particularidades climáticas das cidades surgiu após o avanço da urbanização moderna. O marco inaugural desse campo costuma ser atribuído ao inglês Luke Howard, que entre 1818 e 1831 publicou *The Climate of London*, registrando diferenças sistemáticas de temperatura entre áreas centrais e rurais. Howard observou que a cidade apresentava valores médios mais elevados, especialmente à noite – um dos primeiros registros do fenômeno hoje chamado de ilha de calor urbana.

Depois de Howard, outros estudiosos ampliaram o campo. Renou, Kratzer, Sundborg e Chandler estão entre os nomes centrais da climatologia urbana do século XX.

No Brasil, a contribuição de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro é fundamental. Sua formulação do Sistema Clima Urbano (SCU) compreende o clima das cidades como um sistema alimentado pela energia solar, cujas repercussões afetam sobretudo o conforto térmico, as chuvas e a qualidade do ar (Monteiro, 1976). Monteiro situa a climatologia urbana dentro de uma perspectiva sistêmica, destacando a necessidade de entender a cidade como produtora de modificações climáticas internas.

Autores como Monteiro (1976) e Oke (1987) destacam que compreender o clima urbano é fundamental para o planejamento das cidades, pois a atmosfera urbana é produto direto da interação entre natureza e sociedade. Fenômenos como poluição do ar, enchentes, desconforto térmico, baixa ventilação e riscos socioambientais são expressão direta do modo como o espaço urbano é produzido.

Monteiro argumenta que incorporar estudos climáticos ao planejamento urbano é uma das formas mais eficazes de produzir cidades mais saudáveis e ambientalmente equilibradas. Em um contexto de mudanças climáticas globais, sua importância torna-se ainda maior, pois as cidades são territórios onde os efeitos do aquecimento global tendem a se intensificar.

Entre as manifestações mais estudadas do clima urbano está a ilha de calor urbana, fenômeno observado inicialmente por Howard e posteriormente aprofundado por autores como Chandler e Oke.

O conceito frequentemente utilizado para descrever a climatologia urbana apresenta uma dicotomia entre áreas urbanas e rurais em termos de diferença de temperatura, enfatizando as diferenças no comportamento da atmosfera entre esses dois espaços. Embora essa abordagem seja didática e explicativa, ela tende a simplificar excessivamente a complexidade dos ambientes urbanos e rurais, denotando condições homogêneas para cada um (urbano ou rural). Entretanto, para o estudo do clima urbano, é fundamental reconhecer a heterogeneidade dos espaços urbanos, bem como as diferentes características que influenciam o comportamento climático local.

A literatura clássica aponta uma série de elementos urbanos responsáveis por esse aumento térmico: impermeabilização do solo, geometria urbana, rugosidade, densidade construtiva, redução da vegetação e emissões antrópicas de calor (Oke, 1987). Essas condições aumentam a absorção e retenção de radiação, alteram o balanço energético e reduzem a ventilação. A mensuração dessas ilhas pode ser realizada por transectos móveis ou por estações fixas e imagens de satélite, mas sempre levando em conta que os distintos e complexos usos do solo urbano vão repercutir na temperatura da cidade.

As ilhas de calor têm implicações importantes, afetando conforto térmico, saúde, consumo energético e qualidade do ar, o que torna seu estudo central no planejamento urbano.

Diante da necessidade de melhor compreender a diversidade interna dos espaços urbanos e da complexidade de usos do solo observados nas cidades, surge

o conceito de Zonas Climáticas Locais (Local Climate Zones – LCZs), proposto por Stewart e Oke (2012). Esse sistema classifica os ambientes urbanos e não urbanos com base em características físicas e mensuráveis, como altura das edificações, densidade construtiva, tipo de cobertura do solo, albedo e presença de vegetação. Dessa forma, a compreensão do clima urbano se dá de maneira mais detalhada e completa.

Apesar da crescente utilização do sistema de Zonas Climáticas Locais (LCZs) em estudos internacionais, observa-se um número relativamente pequeno de trabalhos acadêmicos que adotam essa metodologia no Brasil.

Como as Zonas Climáticas Locais são consideradas uma ferramenta promissora para a construção de cidades sensíveis ao clima (Han *et al.*, 2024), essa lacuna na produção nacional pode limitar o avanço do planejamento urbano, tanto em nível nacional, quanto local.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo estudos anteriores de Stewart (2011), a grande maioria dos estudos de clima urbano não fornece metadados quantitativos dos lugares estudados ou do uso do solo no local. Para enfrentar esse problema, Stewart e Oke (2012) sugeriram um novo sistema de classificação que deve (1) ter nomes simples e lógicos e (2) facilitar a transferência de informações através de classes generalizadas. Através desses critérios, foram sugeridas as zonas climáticas locais (LCZs), que são definidas como “regiões de cobertura de superfície uniforme, estrutura, material e atividade humana que se estendem por centenas de metros a vários quilômetros em escala horizontal.” (STEWART e OKE, 2012, p. 1884, tradução livre). As categorias criadas permitem classificar paisagens com consistência, bem como fornecer descrições para locais de medição, no caso de serem instalados equipamentos.

Assim, o sistema das Zonas Climáticas Locais (LCZs) é composto por 17 classes consideradas homogêneas, separadas de acordo com suas características de cobertura, estrutura, material e atividade humana homogêneas em um determinado

recorte espacial. Esse sistema facilita a transferência de informações e a consistência na classificação das paisagens e na descrição dos locais de medição. Os autores esclarecem que ainda consideram as LCZs reducionistas, já que classificar o mundo em LCZs requer grandes generalizações. No entanto, o método permite um grande avanço para a caracterização do espaço em estudos de clima urbano.

As LCZs são divididas em dois grandes grupos - built types (tipos de área construída, em tradução livre) e land cover types (tipos de cobertura do solo, em tradução livre). O primeiro é subdividido em 10 categorias, classificadas de 1 a 10; o segundo é subdividido em 7 categorias, classificadas de A a G (Figura 1). Ainda, são estabelecidos tipos de cobertura do solo variáveis, ou seja, que podem mudar sazonalmente. As variáveis estabelecidas pelos autores para a categorização do espaço segundo as LCZs são apresentadas no Quadro 1.

Demuzere, Kittner e Bechtel (2021) destacam que, embora as cidades impulsionem o progresso econômico e social, elas representam fatores expressivos nas mudanças climáticas, o que pode desfazer os avanços por elas alcançados. A coleta de dados urbanos de alta qualidade é essencial para avaliar e gerenciar riscos de forma eficaz, processo facilitado pelo uso das LCZs.

Dada a complexidade de obtenção e aplicação dos parâmetros propostos por Stewart e Oke, buscando facilitar o uso desse sistema de classificação, Demuzere, Kittner e Bechtel (2021) desenvolveram o LCZ Generator, uma aplicação web que permite a criação de mapas LCZ através de procedimentos simplificados, em que os usuários fazem upload de áreas de treinamento (dado que certos parâmetros sejam cumpridos) e obtêm um mapa LCZ com resolução espacial de 100 metros como resultado, além de detalhes sobre a precisão da classificação realizada. O site também disponibiliza um mapa LCZ global, que pode servir como base para outras medições de dados climáticos.

Figura 1 – Tipologias LCZ



Fonte: Demuzere *et al.* (2020). Adaptado pelos autores.

Cardoso e Amorim (2018) destacaram que o método das Zonas Climáticas Locais já foi aplicado em diversas cidades ao redor do mundo (Pelotas/Brasil; Hamburgo/Alemanha; Mendoza/Argentina; Dublin/Irlanda; entre outras). Ainda assim, reforçam a necessidade de aplicação deste método em outros locais.

Quadro 1 – Variáveis para definição das tipologias LCZ

Variável	Descrição
Fator de Visão do Céu	Proporção da quantidade do hemisfério celeste visível a partir do nível do solo em relação a um hemisfério completamente desobstruído
Razão de aspecto	Proporção média entre altura e largura dos cânions urbanos, espaçamento entre edifícios e espaçamento entre árvores
Fração da superfície edificada	Proporção da área do plano dos edifícios em relação à área total do plano em porcentagem
Fração da superfície impermeável	Proporção da área do plano impermeável (pavimentada, rochosa) em relação à área total do plano em porcentagem
Fração da superfície permeável	Proporção da área do plano permeável (solo nu, vegetação, água) em relação à área total do plano, em porcentagem
Altura dos elementos de rugosidade	Média geométrica das alturas dos edifícios (LCZs 1–10) e alturas das árvores/plantas (LCZs A–F), em metros
Classe de rugosidade do terreno	Rugosidade efetiva do terreno para paisagens urbanas e rurais
Admitância da superfície	Capacidade da superfície de absorver ou liberar calor
Albedo da superfície	Proporção da quantidade de radiação solar refletida por uma superfície em relação à quantidade recebida por ela
Emissão de calor antropogênico	Densidade média anual de fluxo de calor proveniente da combustão de combustível e atividade humana

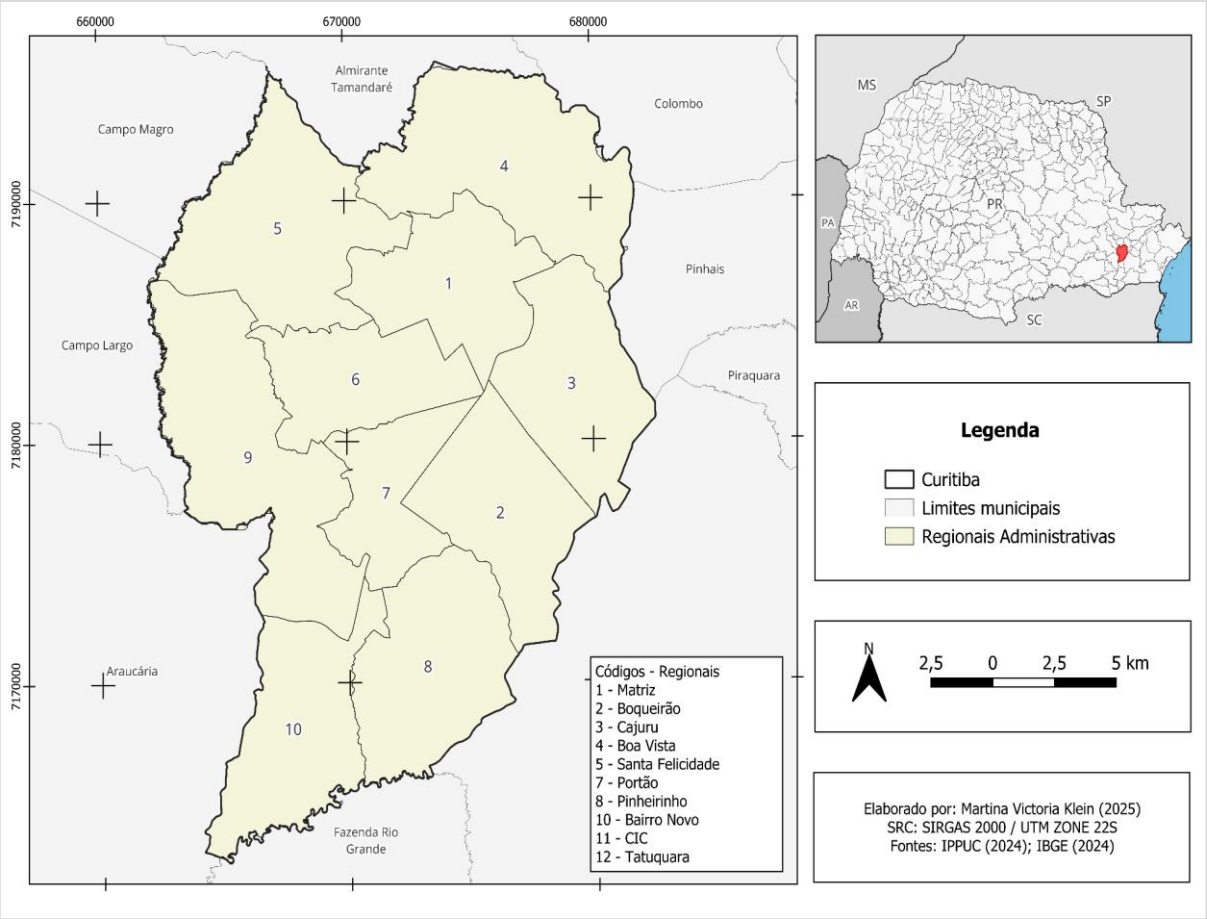
Fonte: Stewart e Oke (2012). Organizado pelos autores.

Para demonstrar um exemplo de aplicação das LCZs, aplicou-se tal técnica para modelar a Ilha de Calor na cidade de Curitiba, estado do Paraná, sul do Brasil. Curitiba apresenta um clima subtropical úmido, com estações bem definidas. O verão é quente e úmido, com temperaturas médias variando entre 19°C e 26°C, enquanto o inverno é frio e seco, com temperaturas médias em torno de 10°C a 15°C, podendo

chegar a valores abaixo de 0°C em algumas ocasiões. A cidade passou por um processo de urbanização planejada a partir da década de 1960, com destaque para a implementação de um sistema de transporte público eficiente e políticas de preservação ambiental, como a criação de parques urbanos

Além disso, considerando que Curitiba é organizada administrativamente em dez regionais (Figura 2) , que apresentam diferenças significativas em termos de uso e ocupação do solo e de morfologia urbana, uso e ocupação do solo, torna-se ainda mais relevante analisar as LCZs a partir desse recorte espacial. Essa abordagem permite compreender melhor as desigualdades ambientais entre diferentes partes da cidade e oferece subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas adaptadas às especificidades de cada região.

Figura 2 - Localização e Regionais Administrativas de Curitiba



Elaborado pelos autores.

As referidas administrações Regionais, apresentadas na Figura 2, têm como função a descentralização da gestão municipal. Estas buscam promover “a integração de serviços, o desenvolvimento local e a melhoria da qualidade de vida dos moradores” e atuam como uma “ponte entre os cidadãos e a Prefeitura (CURITIBA, 2025). Cada uma dessas áreas apresenta características distintas em termos de uso e ocupação do solo, densidade populacional, infraestrutura urbana e cobertura vegetal, refletindo diferentes padrões de urbanização e desenvolvimento socioeconômico.

Todas as Regionais contam com um respectivo Plano Regional que, segundo o Plano Diretor de Curitiba (Lei nº 14.771/2015), são “planos de ação desenvolvidos em cada uma das Administrações Regionais da cidade, conforme suas necessidades e peculiaridades [...]" (CURITIBA, 2015). Como o objetivo dos Planos Regionais é promover o desenvolvimento sustentável, considerando as especificidades de cada região da cidade (CURITIBA, 2021), a escolha desse recorte espacial mostrou-se adequada para esta pesquisa, pois permite uma análise mais alinhada à escala de planejamento urbano adotada pelo município. As diferentes aplicações deste sistema de classificação até a atualidade indicam sua validade nas análises sobre clima urbano. Pereira, Masiero e Bourscheidt (2021) destacaram, especificamente, a aplicação das LCZs no planejamento urbano, utilizando-as para defender a redistribuição de recursos ambientais, visando a equidade espacial urbana.

Uma das principais aplicações das LCZs está nos estudos sobre as ilhas de calor. Estas, sim, já foram estudadas em Curitiba (Mendonça e Dubreuil, 2005; Minella, Rossi e Krüger, 2011; Leal, Biondi e Batista, 2014; Krüger, 2016; Silva e Souza, 2017; por exemplo); no entanto, estes estudos não levaram em consideração as diferentes Zonas Climáticas Locais e como estas impactam as condições climáticas nessa escala. Além disso, tais estudos se encontram desatualizados frente às rápidas transformações urbanas e às atuais mudanças climáticas.

Assim, por mais que as discussões a partir do clima urbano em Curitiba sejam facilmente encontradas na literatura, diferentes métodos de análise ainda podem ser aplicados no contexto da metrópole.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para levantar e sistematizar a produção acadêmica brasileira que utiliza o sistema de Zonas Climáticas Locais (LCZs), foi realizada uma revisão bibliográfica criteriosa. Esse levantamento teve como foco a identificação dos trabalhos que aplicaram a metodologia no contexto nacional, com atenção aos métodos empregados, aos recortes espaciais adotados e aos principais resultados alcançados. Assim, foi consultado o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

O Portal de Periódicos da CAPES foi escolhido por proporcionar acesso gratuito e amplo a bases de dados nacionais e internacionais, por ser uma plataforma consolidada no meio científico e por disponibilizar uma interface de busca avançada, permitindo o refinamento e a organização da revisão bibliográfica.

Na presente pesquisa, foram selecionados exclusivamente artigos de autoria nacional, publicados em periódicos científicos com revisão por pares, que continham em seus títulos os termos “Local Climate Zones” ou “Zonas Climáticas Locais”. A escolha por essas designações justifica-se pela intenção de identificar trabalhos cuja temática central estivesse diretamente relacionada ao método LCZ. Assim, a partir dos resumos dos artigos encontrados, foram extraídas informações quanto à autoria, título, ano de publicação, escala (local, regional, global), área de estudo, abordagem metodológica e principais resultados. Com base nos resultados dessas buscas, foram removidos dois trabalhos aplicados fora do território brasileiro, a fim de manter o foco na identificação de como as LCZs têm sido utilizadas no contexto nacional.

Para mapear as Zonas Climáticas Locais, foi utilizado o mapa global das LCZs, disponibilizado por Demuzere *et al.* (2023), com resolução espacial de 100 metros. Esse mapa global seguiu o protocolo padrão da World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), proposto por Bechtel *et al.* (2015), considerando as 17 categorias das LCZs. Sua geração foi baseada em uma grande quantidade de áreas de treinamento rotuladas, utilizando imagens de sensoriamento remoto processadas por modelos *Random Forest*.

A qualidade desse mapa foi avaliada pelos desenvolvedores por meio de validação cruzada e uma comparação temática em 150 áreas urbanas selecionadas, utilizando dados independentes e de código aberto sobre cobertura superficial, impermeabilização do solo, altura das edificações e calor antropogênico.

Com o auxílio do software de geoprocessamento QGIS, a distribuição das tipologias LCZ nas Regionais Administrativas foi analisada a partir do cruzamento das categorias LCZ previamente mapeadas, com a camada de Regionais de Curitiba, disponibilizada pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC, 2024).

A partir disso, foi analisado, por exemplo, quanto de uma categoria de LCZ está presente em cada regional; assim, foi possível identificar padrões de ocupação urbana e uso do solo em cada regional, comparar a concentração de determinadas tipologias LCZ entre as regiões da cidade e levantar possíveis implicações socioambientais associadas, como maior suscetibilidade a ilhas de calor, desigualdade no acesso a áreas vegetadas ou vulnerabilidade climática.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 REVISÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS SOBRE LOCAL CLIMATE ZONES - ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS

Desde a publicação do artigo que deu origem ao método Local Climate Zones por Stewart e Oke em 2012, a abordagem ganhou expressão e se popularizou nos estudos sobre clima urbano em diversas partes do mundo. Assim, é pertinente conhecer as aplicações do método no cenário nacional, tanto para avaliar sua adaptação às particularidades brasileiras quanto para identificar lacunas na produção científica sobre o tema.

Assim, a revisão bibliográfica sobre o tema, realizada no dia 28 de abril de 2025, às 15h, encontrou 12 artigos para o termo em inglês e 10 artigos para o termo em português, totalizando 22 artigos segundo os filtros estabelecidos. O primeiro estudo encontrado foi publicado em 2015, e os mais recentes em 2024. No entanto,

há uma tendência clara de aumento de estudos sobre o tema – dos 22 artigos encontrados, 18 foram publicados desde 2020.

A produção científica nacional que utilizou o termo “Local Climate Zones” inclui diversos estudos com diferentes escalas e abordagens metodológicas. Cardoso e Amorim (2018) analisaram a ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP) por meio de medições móveis de temperatura do ar realizadas em diferentes LCZs durante cinco noites de inverno, entre junho e julho de 2014. Os resultados mostraram que as LCZs mais densamente construídas apresentaram as maiores temperaturas, enquanto áreas com vegetação baixa foram mais frescas, registrando diferença superior a 5 °C entre zonas com características físicas distintas (ΔT LCZ 24–D) e diferença média de 3,8 °C entre zonas (ΔT LCZ 3–D).

Franco, Andrade, Ynoue e Ching (2019) investigaram o efeito da classificação LCZ na simulação química de ozônio na Região Metropolitana de São Paulo (SP), utilizando modelagem WRF-Chem com parametrizações default e BEP (com dados WUDAPT nível “0”). O uso da parametrização BEP melhorou as simulações meteorológicas, especialmente a velocidade do vento, mas não melhorou significativamente as simulações de ozônio, revelando a complexidade da química atmosférica urbana.

Em 2021, Pereira, Masiero e Bourscheidt estudaram desigualdade socioespacial e conforto térmico em duas LCZs em uma cidade tropical costeira, com medições in loco de temperatura do ar e modelagem de temperatura média radiante pelo modelo SOLWEIG. Concluíram que a LCZ 1, de maior renda, manteve temperaturas mais confortáveis, enquanto a LCZ 3, de menor renda, apresentou estresse térmico, defendendo reformas públicas prioritárias em áreas mais quentes e redistribuição de recursos ambientais.

No mesmo ano, esses autores também analisaram a variação sazonal da intensidade da ilha de calor na camada do dossel urbano em duas LCZs da mesma cidade, com dados de dataloggers e estações meteorológicas. Notaram que, à noite, a anomalia térmica é maior em edifícios altos e compactos durante o inverno, enquanto de dia ela é maior em edifícios baixos e compactos no verão, embora com grande variabilidade dependente das condições meteorológicas.

Ainda em 2021, Sena, Paixão e França propuseram o uso de Homologia Persistente (PH) aplicada a imagens de satélite para identificar padrões de LCZ em escala global. Os métodos testados demonstraram robustez frente a dados faltantes e baixa sensibilidade a variações na amostragem, indicando potencial para pesquisas futuras.

Em 2022, Hoppe, Wollmann, Buss, Gobo e Shooshtarian investigaram LCZs, Sky View Factor (SVF) e magnitudes das ilhas de calor diurna e noturna em Balneário Camboriú (SC). A partir de coleta de temperaturas em sete pontos e uma estação oficial, além de mapeamento LCZ via WUDAPT, constataram grande variação de SVF, mapeamento diversificado de LCZs e magnitudes máximas de ilha de calor de 10,8 °C e de frescor de −4,5 °C.

Fernandes, Nascimento, Freitas e Ometto (2023) realizaram uma revisão sistemática sobre LCZs para identificar ilhas de calor de superfície, utilizando o método PRISMA. Observaram que os estudos são recentes (a partir de 2016), com tendência de crescimento, todos abordam UHI, mas mais da metade não descreve o método de cálculo da SUHI. Landsat e TERRA/AQUA foram os sensores mais empregados, e o método WUDAPT foi o mais utilizado.

Os autores concluíram que os métodos de mapeamento de LCZs são suficientemente precisos para estudos de SUHI. Também em 2023, Ferreira, Ferretto e Duarte aplicaram o método LCZ em diferentes escalas de projeto, tanto na avaliação de cobertura vegetal em uma região metropolitana quanto na análise da morfologia urbana de uma cidade média. Os autores destacam que o método LCZ é adequado, acessível, replicável e contribui para o monitoramento da morfologia urbana.

Em 2024, Rech, Moreira, Mello, Klouček e Komárek avaliaram ilhas de calor de superfície diurnas e noturnas em Florianópolis (SC) utilizando o Urban Thermal Field Variance Index com imagens Landsat 8. Observaram que tipologias urbanas abertas apresentaram temperaturas diurnas mais amenas, enquanto áreas compactas de baixa altura exibiram maior intensidade de SUHI durante o dia. À noite, edificações mais altas registraram SUHI mais intenso. Identificaram forte associação entre SUHI, estrutura urbana e vegetação, e concluíram que o método pode ser aplicado em outras regiões.

No mesmo ano, Cordovil, Brou, Guedi, Peres, Machado, Gaspar, Benchérif, Gonçalves e Carvalho aplicaram a classificação LCZ a Santarém (PA) utilizando WUDAPT nível 0, classificação supervisionada com LCZ Generator e cálculo de NDVI. Os autores identificaram sete classes principais de LCZ e demonstraram que o NDVI foi fundamental para avaliar a vegetação e evidenciar menor cobertura vegetal em áreas construídas. Ainda em 2024, Silva, Wollmann, Iensse, Hoppe, Baumhardt, Writzl, Costa, Gobo, Galvani e Matzarakis investigaram a relação entre ilhas de calor e LCZs em Balneário Camboriú (SC) durante o inverno, com dados meteorológicos de 11 pontos fixos, análise sinótica e mapeamento LCZ pelo método WUDAPT. Concluíram que a verticalização influencia fortemente a ocorrência de ilhas de calor e frescor; LCZs com edificações espaçadas e vegetação densa tiveram menores magnitudes; e LCZs 1 e 3 apresentaram as maiores magnitudes.

A análise sinótica confirmou a influência da estabilidade atmosférica nos fenômenos térmicos. Por fim, Nascimento, Borges, Gobo, Nunes e Monteiro (2024) mapearam LCZs em Rio Branco (AC), avaliando a eficácia do método. O mapeamento apresentou acurácia geral satisfatória, com menor acurácia nas classes de construções. Verificou-se que os eixos de expansão urbana estão principalmente nas LCZ A, D e G, e que classes com temperaturas mais baixas vêm sendo substituídas por classes mais quentes, indicando a utilidade da metodologia na classificação da cobertura da terra.

Nesse mesmo panorama, encontram-se também os estudos publicados utilizando o termo “Zonas Climáticas Locais”. Masiero e Souza (2015) estudaram a estabilidade atmosférica e o comportamento de LCZs em São José do Rio Preto (SP), com cinco sensores distribuídos em quatro LCZs. Constataram variação térmica inferior a 2 °C sob atmosfera instável e maior sob condições estáveis, além de diferenças marcantes entre áreas próximas a corpos d’água e bairros periféricos, destacando a importância do recorte espacial e temporal.

Em 2020, Souza, Paranhos Filho e Guaraldo realizaram estudo cienciométrico sobre UHI e LCZ, mapeando artigos e analisando a relevância dos termos nas pesquisas em climatologia urbana. No mesmo ano, Ferreira e Ugeda Júnior analisaram a temperatura da superfície em Cuiabá (MT) com imagens ASTER,

relacionando variações sazonais e horárias às LCZs. Ainda em 2020, Krüger e Gapski estudaram efeitos microclimáticos de diferentes LCZs em Londres, usando estações amadoras da Weather Underground e cálculos de graus-hora para climatização, verificando presença de ilhas de calor em áreas densas e diferenças significativas nas demandas energéticas entre as LCZs.

Em 2021, Cardoso e Amorim caracterizaram LCZs em Presidente Prudente (SP), construindo base de dados para modelagem no ENVI-met e identificando contrastes térmicos superiores a 6 °C entre LCZs, especialmente sob condições sinóticas estáveis.

Em 2022, Borges, Nascimento, Celuppi, Lúcio, Tejas e Gobo realizaram revisão sistemática sobre LCZs e ilhas de calor urbanas, apontando correlação positiva entre LCZs e ocorrência de ICUs, com diferenças metodológicas entre hemisférios. Também em 2022, Teixeira e Amorim analisaram a evolução diária da ilha de calor atmosférica em Presidente Venceslau e Santo Anastácio (SP), comparando LCZs urbanas e rurais em diferentes estações. Observaram anomalias térmicas distintas nas LCZs 3B, variação influenciada por características urbanas e elementos físicos, além de diferenças entre comportamentos de inverno (ICUs noturnas) e verão (ICUs diurnas).

Por fim, em 2023, Rodrigues, Quinto e Gomes Filho realizaram revisão sistemática sobre metodologias para classificar áreas urbanas em LCZs para aplicação em Itaperuna, oferecendo diretrizes sobre classificação e análise de dados meteorológicos.

As publicações, de modo geral, concentram-se em estudos empíricos que aplicam o método LCZ em cidades específicas, geralmente em escala local. Entre os estudos, também estão quatro revisões bibliográficas, que desenvolvem uma análise sobre a validade da aplicação do método LCZ no Brasil.

Com relação aos principais métodos adotados, foram identificados trabalhos baseados em dados primários, como medições móveis e estações meteorológicas fixas; outros que utilizaram dados secundários, como imagens de satélite e dados do WUDAPT; e também estudos que combinaram ambos os tipos de dados, por exemplo, integrando coletas com dataloggers a dados de estações meteorológicas oficiais ou

associando observações de campo à modelagem computacional. Assim, esses estudos combinam o sistema LCZ a indicadores climáticos como temperatura do ar e temperatura de superfície, demonstrando a associação frequente desse sistema a estudos sobre ilhas de calor urbanas. Ainda, também foram encontradas conexões das LCZs com conforto térmico, poluição atmosférica, desigualdades socioespaciais e planejamento urbano.

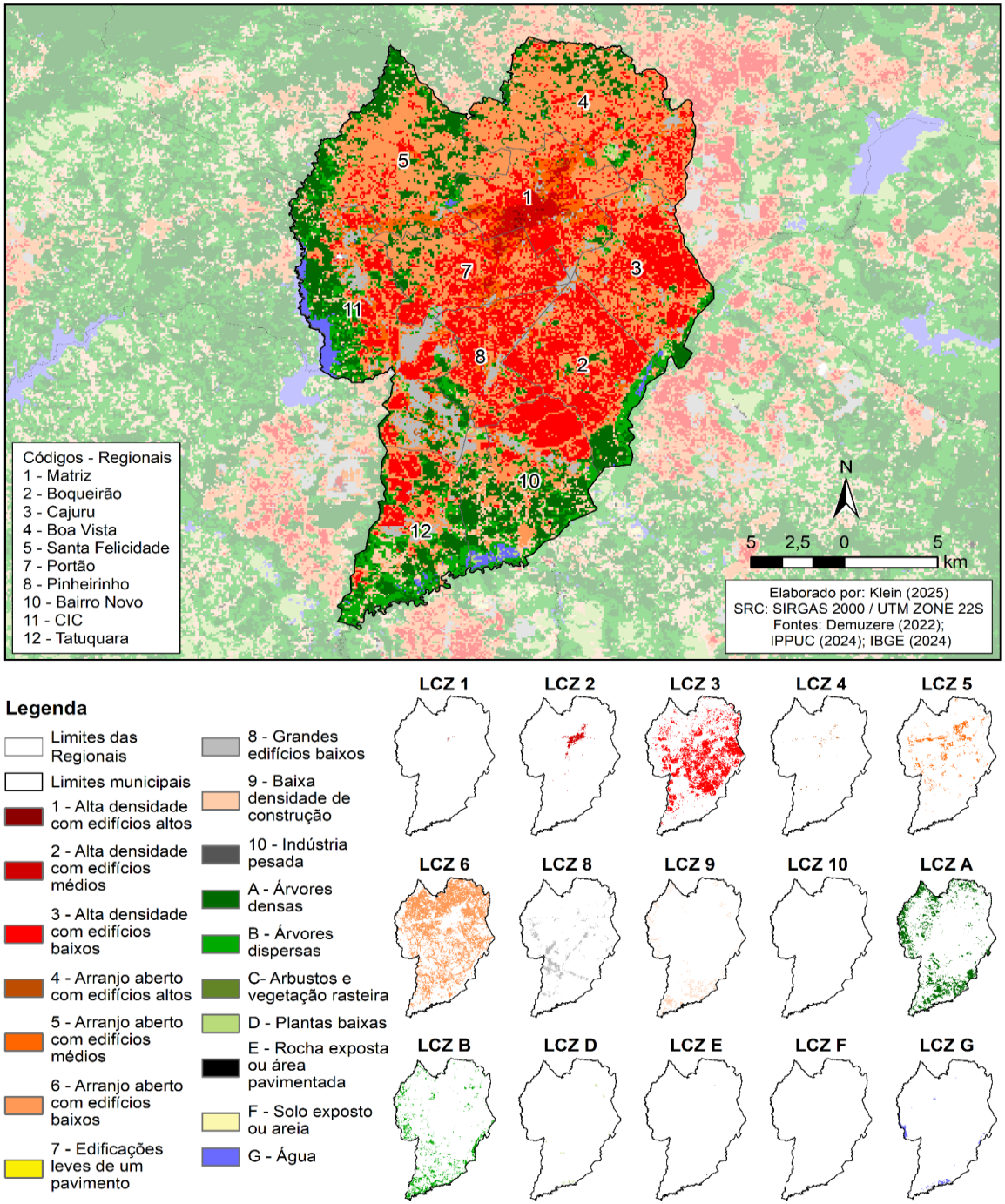
Entre os resultados recorrentes, destaca-se o fato que as áreas compactas e densamente construídas, associadas às LCZ 1, 2 e 3, tendem a apresentar maior intensidade de ilhas de calor urbanas (ICUs), enquanto as áreas verdes ou com vegetação densa, associadas às LCZs A, B e D, têm efeito mitigador, sendo mais frescas. Ainda, as ICUs foram mais intensas no período da noite, nos estudos que realizaram medições durante períodos diurnos e noturnos.

Esta análise permite concluir que o método LCZ tem se consolidado como ferramenta robusta, acessível e versátil para estudos de climatologia urbana, sendo útil tanto para pesquisas científicas quanto para o planejamento urbano.

4.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS (LCZS) NAS REGIONAIS ADMINISTRATIVAS DE CURITIBA

A compreensão da distribuição espacial das Zonas Climáticas Locais (LCZs) é fundamental para analisar as dinâmicas ambientais e urbanas de Curitiba-PR, pois permite visualizar como as diferentes formas de uso e ocupação do solo se organizam no território. Essa análise é essencial não apenas para caracterizar a morfologia urbana da cidade, mas também para entender os possíveis efeitos socioambientais associados a esses padrões, como a formação de ilhas de calor, a disponibilidade de áreas verdes e as desigualdades na qualidade ambiental entre diferentes regiões. A Figura 3 apresenta os principais resultados obtidos a partir da aplicação do método LCZ na escala intraurbana de Curitiba.

Figura 3 – Zonas Climáticas Locais (LCZs) e Regionais da cidade de Curitiba-PR



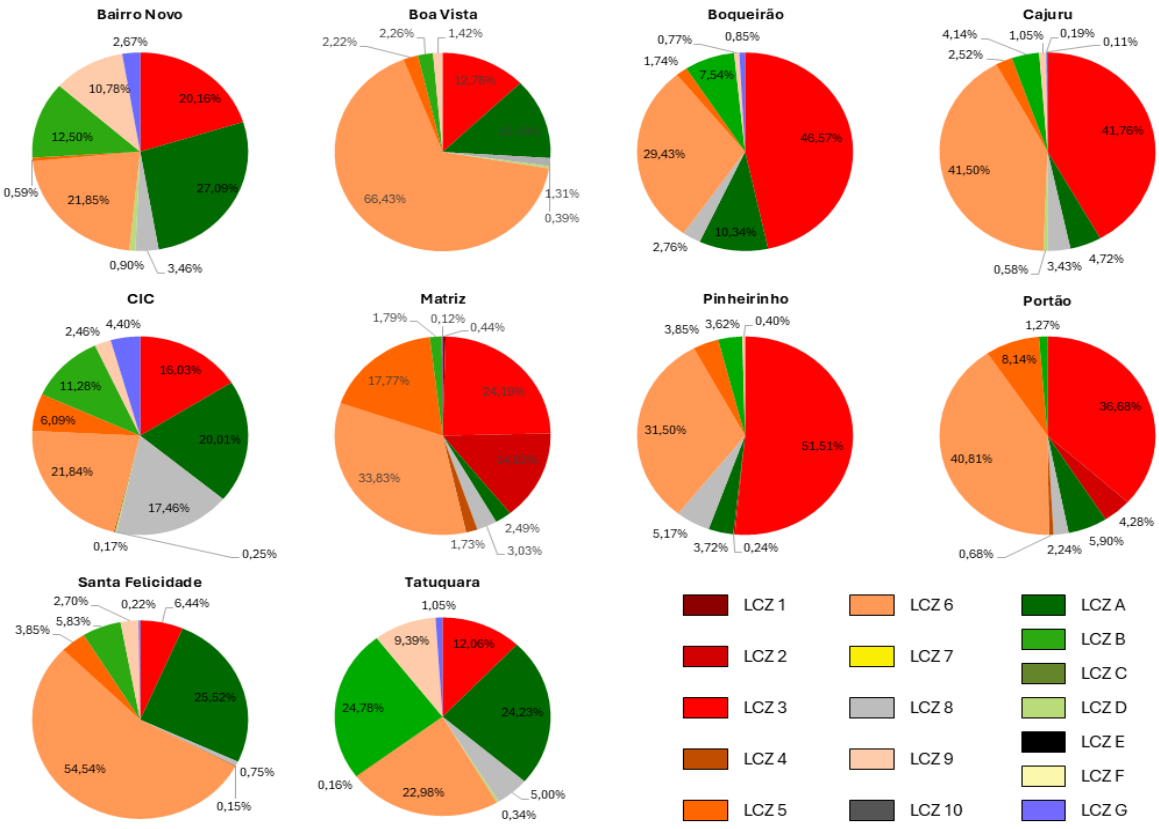
Fonte: Demuzere, M. (2022). Elaborado pelos autores.

A análise da distribuição geral das Zonas Climáticas Locais (LCZs) em Curitiba revela um predomínio das tipologias LCZ 6 (37,46%) e LCZ 3 (23,80%), que juntas correspondem a mais de 60% da área urbana mapeada. Essas classes representam, respectivamente, áreas com edificações baixas e espaçamento mais aberto, e áreas

com edificações baixas, porém mais adensadas. Outro destaque importante é a significativa presença de áreas com densa cobertura arbórea (LCZ A), que abrangem cerca de 15,20% da cidade, e com árvores dispersas (LCZ B), que abrangem cerca de 7,82% da área da cidade.

Em princípio, a presença marcante das tipologias LCZ 6, LCZ A e LCZ B são positivas para a cidade, pois permitem regulação térmica local, melhoria da qualidade do ar e redução dos impactos negativos típicos de áreas densamente urbanizadas. No entanto, é necessário observar a distribuição dessas LCZs pelas Regionais, constatando sua concentração em determinadas áreas em detrimento de outras. A Figura 4 apresenta a distribuição das LCZs por regional administrativa da cidade de Curitiba.

Figura 4 – Distribuição das LCZs por Regional da cidade de Curitiba-PR



Fonte: Elaborado pelos autores.

As LCZs 1, 2 e 3, caracterizadas pela alta densidade de edificações, podem apresentar uma série de riscos ambientais que afetam diretamente a qualidade de

vida nas cidades. A LCZ 1, composta por edifícios altos e com grande adensamento, favorece a intensificação das ilhas de calor urbanas (ICUs) devido à forte retenção de calor, à baixa ventilação entre as construções e à reduzida presença de vegetação. Essa configuração dificulta a dispersão de poluentes e contribui para o aumento das temperaturas, gerando desconforto térmico à população e maior consumo de energia com climatização artificial. Já a LCZ 2, formada por edifícios médios também dispostos de maneira compacta, apresenta riscos semelhantes, em escala um pouco menor.

A LCZ 3 é composta por edificações baixas, mas dispostas de forma igualmente densa, com pouca vegetação e elevada impermeabilização. Nessas áreas, os principais riscos ambientais incluem o aumento do escoamento superficial, que eleva o risco de alagamentos, além da maior exposição ao desconforto térmico e à pior qualidade do ar.

Em Curitiba, essas tipologias apresentam diferentes níveis de representatividade: a LCZ 1 é pouco expressiva, com apenas 0,44% da área da Regional Matriz e 0,03% na Regional Portão; a LCZ 2 aparece com mais frequência, especialmente na Regional Matriz, onde chega a 14,61%; já a LCZ 3 é amplamente predominante em diversas regiões da cidade, ocupando mais de 40% das áreas das Regionais Cajuru (41,76%), Boqueirão (46,51%) e Pinheirinho (51,51%).

A LCZ 8, correspondente a grandes edifícios baixos, geralmente associada a áreas industriais, logísticas ou comerciais, apresenta amplas superfícies impermeáveis e de baixa refletância térmica, como estacionamentos e telhados metálicos, que acumulam calor ao longo do dia. Essa configuração favorece a formação de ilhas de calor localizadas, além de aumentar o escoamento superficial e reduzir a infiltração de água no solo. A baixa presença de áreas verdes e a grande extensão de superfícies artificiais contribuem ainda para a deterioração da qualidade do ar e da regulação térmica. Esta LCZ está bastante presente na Regional CIC (17,45% da área da regional).

Nessas tipologias, a falta de áreas verdes e a predominância de superfícies artificiais tornam o ambiente urbano mais vulnerável a extremos climáticos. Esses processos se inserem em um contexto mais amplo de transformação do espaço urbano, no qual a urbanização acelerada, a impermeabilização do solo, o adensamento construtivo, a conservação de calor e a poluição atmosférica são

apontados como fatores determinantes para o aumento dos desastres ambientais nas cidades (Kobiyama *et al.*, 2006). Ainda, conforme apontado em diversos estudos da revisão realizada (Quadros 2 e 3), sabe-se que as ilhas de calor urbanas (ICUs) são mais intensas nas LCZs com maior adensamento urbano, menos vegetação e maior impermeabilização do solo (Cardoso e Amorim, 2018; Pereira, Masiero e Bourscheidt, 2021; Moreira *et al.*, 2024, entre outros).

As LCZs 4, 5 e 6, por apresentarem menor densidade construtiva e maior presença de espaços abertos em comparação às zonas mais compactas, tendem a apresentar menos riscos socioambientais. Nessas tipologias, a distância maior entre as edificações favorece a circulação de ar, reduzindo a intensidade de ilhas de calor e melhorando o conforto térmico local. Além disso, há maior presença de vegetação, o que contribui para a regulação da temperatura e para a melhora da qualidade do ar. Outro fator importante é a menor impermeabilização do solo quando comparada a zonas mais densas, o que favorece a infiltração da água da chuva e reduz o risco de alagamentos.

A LCZ 4 soma apenas 0,25% da área total de Curitiba, enquanto a LCZ 5 soma 4,42%. A LCZ 6, como apontado anteriormente, soma 37,46% da cidade. Esta categoria compõe mais de 20% da área em todas as Regionais de Curitiba, chegando a compor 66,37% da Regional Boa Vista. Mendonça e Leitão (2008) apontam para o fato que a maioria dos problemas socioambientais urbanos estão vinculados diretamente às formas de uso e ocupação do solo. Como essas LCZs (4, 5 e 6) apresentam, de certa forma, características opostas ao cenário descrito por Kobiyama *et al.* (2006), caracterizado por solo muito impermeabilizado e construções adensadas, pode-se concluir que nessas áreas os efeitos socioambientais negativos são atenuados pelas condições de ocupação do solo.

De maneira geral, a análise da distribuição espacial das LCZs nas Regionais administrativas de Curitiba evidencia como a morfologia urbana e o uso e ocupação do solo influenciam diretamente os riscos e as potencialidades ambientais em diferentes partes da cidade. A predominância de determinadas tipologias em algumas Regionais reflete processos históricos de urbanização, além de refletir desigualdades no acesso a infraestrutura verde e qualidade ambiental.

Os resultados obtidos reforçam a importância de considerar a heterogeneidade intraurbana na formulação de políticas públicas, especialmente aquelas voltadas ao planejamento urbano, à mitigação dos efeitos das ilhas de calor e à promoção da qualidade ambiental nas diversas regiões da cidade (Lin e Zhao, 2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises deste trabalho evidenciam a importância do sistema de Zonas Climáticas Locais (LCZs) como ferramenta para a compreensão da morfologia urbana e de suas implicações socioambientais em Curitiba-PR. A partir da revisão da literatura nacional e da aplicação prática do método na escala intraurbana da cidade, foi possível identificar padrões de uso e ocupação do solo que influenciam diretamente as dinâmicas climáticas locais. Além de buscar preencher uma lacuna existente nos estudos sobre LCZs na capital paranaense, os resultados obtidos reforçam a relevância de incorporar esse tipo de classificação nas estratégias de gestão urbana.

A revisão bibliográfica sobre o sistema encontrou 22 artigos nacionais com os termos “Zonas Climáticas Locais” ou “Local Climate Zones” no título. Estes estudos são majoritariamente empíricos, aplicados em escala local. Ainda, as publicações apresentam grande diversidade metodológica, e sugerema validade do método LCZ para utilização em estudos sobre o clima urbano.

Embora tenham sido encontrados artigos publicados no Brasil sobre a aplicação do sistema LCZ, não foram localizados estudos específicos voltados para a cidade de Curitiba. Dessa forma, o mapeamento global elaborado por Demuzere *et al.* (2023), viabilizou a investigação geográfica do arranjo das LCZs na capital paranaense. Adicionalmente a sobreposição destes dados com as Regionais administrativas da cidade permitiu uma análise mais detalhada da distribuição das LCZs e suas possíveis consequências socioambientais.

O resultado da análise indicou que as LCZs estão distribuídas de maneira desigual: a LCZ 3 (Alta densidade com edifícios baixos), por exemplo, está muito presente nas Regionais Cajuru, Boqueirão e Pinheirinho, enquanto a LCZ 6 está muito presente na Regional Boa Vista. Ainda, considerando a cidade de Curitiba, cerca de 23% da área é ocupada por cobertura arbórea contínua (LCZ A + LCZ B), no entanto,

essas áreas concentram-se intensamente nas áreas periféricas, próximas aos limites da cidade. Essa configuração espacial evidencia uma distribuição desigual não apenas das tipologias urbanas, mas também dos riscos socioambientais associados.

Como recomendações para futuros estudos sobre as LCZs em Curitiba, sugere-se: (a) validar o mapeamento das LCZs na cidade, por meio de verificação em campo e/ou imagens de satélite, comparando as paisagens às diferentes classes tipológicas mapeadas, (b) utilizar outros recortes espaciais para análise das LCZs (os bairros, por exemplo) e (c) integrar dados socioeconômicos às análises das LCZs, buscando relacionar as características morfológicas e ambientais com indicadores sociais, demográficos e de qualidade de vida da população residente em cada zona.

Apesar desses possíveis avanços futuros, o presente estudo representa uma contribuição relevante para o campo da climatologia urbana em Curitiba. Ao realizar a primeira análise das Zonas Climáticas Locais (LCZs) e considerar o recorte por Regionais Administrativas da cidade, a pesquisa oferece um diagnóstico inicial da morfologia urbana na cidade. Além disso, ao associar a distribuição das LCZs a possíveis riscos socioambientais, o trabalho amplia a compreensão das dinâmicas espaciais que influenciam o clima urbano local.

REFERÊNCIAS

ANJOS, M.; MEDEIROS, D.; CASTELHANO, F.; MEIER, F.; SILVA, T.; CORREIA, E.; LOPES, A. LCZ4r package R for local climate zones and urban heat islands. **Scientific Reports,** v. 15, p. 7710, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-92000-0. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-025-92000-0. Acesso em: 28 abr. 2025.

BECHTEL, B.; ALEXANDER, P. J.; BÖHNER, J.; CHING, J.; CONRAD, O.; FEDDEMA, J.; MILLS, G.; SEE, L.; STEWART, I. Mapping Local Climate Zones for a worldwide database of the form and function of cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information,** [S. l.], v. 4, n. 1, p. 199–219, 2015. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi4010199. Disponível em: https://www.mdpi.com/2220-9964/4/1/199. Acesso em: 28 abr. 2025.

CARDOSO, R.; AMORIM, M. C. de C. T. Urban heat island analysis using the ‘local climate zone’ scheme in Presidente Prudente, Brazil. **Investigaciones Geográficas,** Alicante, n. 69, p. 107-118, 13 jun. 2018. Disponível em: https://www.redalyc.org/journal/176/17656164007/html/. Acesso em: 8 ago. 2024.

CARDOSO, R. dos S.; AMORIM, M. C. de C. T. Propriedades da superfície e variáveis climáticas para modelagem de zonas climáticas locais em Presidente Prudente. **Revista Brasileira de Climatologia,** [S. l.], v. 28, 2021. DOI: 10.5380/rbclima.v28i0.77636. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/77636. Acesso em: 28 abr. 2025.

CORDOVIL, K. P. S. *et al.* Local Climate Zones Classification Applied to a Brazilian Amazon City. **Urban Science,** [S. l.], v. 8, n. 4, p. 253, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/urbansci8040253. Disponível em: https://www.mdpi.com/2413-8851/8/4/253. Acesso em: 28 abr. 2025.

CURITIBA. **Lei nº 14.771, de 17 de dezembro de 2015.** Dispõe sobre a revisão do Plano Diretor de Curitiba. Diário Oficial do Município, Curitiba, 2015. Disponível em: https://mid.curitiba.pr.gov.br/2015/00175701.pdf. Acesso em: 22 jun. 2025.

CURITIBA. **Plano Regional Bairro Novo.** Curitiba: IPPUC, 2021. Disponível em: https://ippuc.org.br/storage/uploads/659c790e-afec-4781-b6f2-741ab59bc14b/planoregional_bairronovo_2021.pdf. Acesso em: 22 jun. 2025.

DANNI-OLIVEIRA, I. M.; MENDONÇA, F. **Clima: noções básicas e climas do Brasil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

DEMUZERE, M.; KITTNER, J.; BECHTEL, B. LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 1-18, April 2021. DOI https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455. Disponível em: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.637455/full. Acesso em: 21 jun. 2023.

DEMUZERE, M.; KITTNER, J.; MARTILLI, A.; MILLS, G.; MOEDE, C.; STEWART, I. D.; VAN VLIET, J.; BECHTEL, B. **Global map of Local Climate Zones (3.0.0).** [Conjunto de dados]. Zenodo, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.8419340. Acesso em: 16 jun. 2025.

DEMUZERE, M. *et al.* Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US. **Scientific Data,** [S. l.], ano 2020, v. 7, n. 264, p. 1-13, 11 ago. 2020. DOI https://doi.org/10.1038/s41597-020-00605-z. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41597-020-00605-z#further-reading. Acesso em: 8 ago. 2024.

EMILSSON, T. **Urban life and climate change.** In: LETCHER, Trevor M. (ed.). The Impacts of Climate Change. 1. ed. Elsevier, 2021. p. 453-462. ISBN 9780128223734. DOI: 10.1016/B978-0-12-822373-4.00009-4. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128223734000094. Acesso em: 01 jun. 2025.

FERNANDES, R.; NASCIMENTO, V.; FREITAS, M.; OMETTO, J. Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review. **Remote Sensing,** [S. l.], v. 15, n. 4, p. 884, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15040884.

Disponível em: http://mtc-m21d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.13.16.11/doc/remotesensing-15-00884.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

FERREIRA, L. S.; FERRETTO, D.; DUARTE, D. H. S. Mapeando a morfologia urbana: aplicações do método Local Climate Zones (LCZ) em diferentes escalas do projeto. **PosFAUUSP,** São Paulo, v. 30, n. 56, p. e197563, 2023. DOI: 10.11606/issn.2317-2762.posfauusp.2023.197563. Disponível em: https://revistas.usp.br/posfau/article/view/197563. Acesso em: 28 abr. 2025.

FRANCO, D. M. P.; ANDRADE, M. de F.; YNOUE, R. Y.; CHING, J. Effect of Local Climate Zone (LCZ) classification on ozone chemical transport model simulations in Sao Paulo, Brazil. **Urban Climate,** [S. l.], v. 27, p. 293–313, mar. 2019. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.12.006. Disponível em: https://www-sciencedirect-com.ez22.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2212095518303742?via%3Dihub. Acesso em: 28 abr. 2025.

HAN, J. *et al.* Advancing the local climate zones framework: a critical review of methodological progress, persisting challenges, and future research prospects. **Humanities and Social Sciences Communications,** v. 11, n. 1, 27 abr. 2024. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41599-024-03072-8. Acesso em: 01 jun. 2025.

HOPPE, I. L.; WOLLMANN, C. A.; BUSS, A. S.; GOBO, J. P. A.; SHOOSHTARIAN, S. Local Climate Zones, Sky View Factor and Magnitude of Daytime/Nighttime Urban Heat Islands in Balneário Camboriú, SC, Brazil. **Climate,** [S. l.], v. 10, n. 12, p. 197, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/cli10120197. Disponível em: https://www.mdpi.com/2225-1154/10/12/197. Acesso em: 28 abr. 2025.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Curitiba: Organic Trading, 2006. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/prevencaodedesastresnaturaisconceitosbasicos.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

KRÜGER, E.; PEREIRA, N. H. G. Avaliação dos efeitos microclimáticos de diferentes zonas climáticas locais em cidade de clima temperado. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção,** Campinas, SP, v. 11, p. e020019, 2020. DOI: 10.20396/parc.v11i0.8658794. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8658794. Acesso em: 28 abr. 2025.

LIN, L.; ZHAO, Y. Optimizing local climate zones to mitigate urban heat risk: A multi-models coupled approach in the context of urban renewal. B**uilding and Environment,** v. 282, p. 113282, 21 jun. 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132325007620?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=9535c6de5f0602df. Acesso em: 21 jun. 2025.

MASIERO, É.; SOUZA, L. C. L. de. Estabilidade atmosférica e comportamento de zonas climáticas locais em São José do Rio Preto - SP. **Revista Brasileira de**

Climatologia, [S. l.], v. 15, 2015. DOI: 10.5380/abclima.v15i0.36455. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/36455. Acesso em: 28 abr. 2025.

MENDONÇA, F.; DUBREUIL, V. Termografia de superfície e temperatura do ar na RMC (Região Metropolitana de Curitiba/PR). Raega - O Espaço Geográfico em Análise, Curitiba, v. 9, p. 25–35, nov. 2005.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: Instituto de Geografia/USP, 1976.

NASCIMENTO, F. I. C.; BORGES, V. O.; GOBO, J. P. A.; NUNES, A. C. da S.; MONTEIRO, L. A. F. Identificação de zonas climáticas locais na cidade de Rio Branco. **E&S Engineering and Science,** [S. l.], v. 13, n. 4, p. 1–14, 2024. DOI: 10.18607/ES20241318398. Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/18398. Acesso em: 28 abr. 2025.

OLIVEIRA BORGES, V.; NASCIMENTO, G. C.; CELUPPI, M. C.; LÚCIO, P. S.; TEJAS, G. T.; GOBO, J. P. A. Zonas climáticas locais e as ilhas de calor urbanas: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Climatologia,** [S. l.], v. 31, n. 18, p. 98–127, 2022. DOI: https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15755. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/15755. Acesso em: 28 abr. 2025.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London: Methuen, 1987.

PEREIRA, C. T.; BOURSCHEIDT, V.; MASIERO, E. Seasonal Variation of Canopy Layer Heat Island at Distinct Local Climate Zones in a Tropical Coastal City. **Revista Brasileira de Climatologia,** [S. l.], v. 29, p. 205–227, 2021. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/15173. Acesso em: 28 abr. 2025.

PEREIRA, C. T.; MASIERO, E.; BOURSCHEIDT, V. Socio-spatial inequality and its relationship to thermal (dis)comfort in two major Local Climate Zones in a tropical coastal city. **International Journal of Biometeorology,** [S. l.], v. 65, p. 1177–1187, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-021-02099-9. Disponível em: https://doi-org.ez22.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00484-021-02099-9. Acesso em: 28 abr. 2025.

RAMÍREZ-AGUILAR, E. A.; SOUZA, L. C. L. Thermal properties based on air temperature observations in different local climate zones in Bogotá, Colombia. **Clim Res**, [S. l.], v. 82, p. 15–31, 2020. DOI: https://doi.org/10.3354/cr01619. Disponível em: https://www.int-res.com/abstracts/cr/v82/cr01619. Acesso em: 28 abr. 2025.

RECH, B.; MOREIRA, R. N.; MELLO, T. A. G.; KLOUČEK, T.; KOMÁREK, J. Assessment of daytime and nighttime surface urban heat islands across local climate zones – A case study in Florianópolis, Brazil. **Urban Climate,** [S. l.], v. 55, 101954, maio 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101954. Disponível em: https://www-sciencedirect-

com.ez22.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2212095524001500?via%3Dihub. Acesso em: 28 abr. 2025.

RODRIGUES, R. G.; QUINTO JUNIOR, L. P.; FILHO, H. G. Estudo da ilha de calor urbano para aplicação em Itaperuna: revisão sistemática das metodologias para classificação da área urbana em zonas climáticas locais. **Boletim do Observatório Ambiental - IFF,** [S. l.], v. 17, n. 1, p. 23–44, 2023. DOI: https://doi.org/10.19180/2177-4560.v17n12023p23-44. Disponível em: https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/18087. Acesso em: 28 abr. 2025.

SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R. do; SILVA, P. A. H. da; FIORI, C. O. Geomorfologia do Município de Curitiba-PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** [S. l.], v. 14, n. 4, 2014. DOI: 10.20502/rbg.v14i4.428. Disponível em: https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/428. Acesso em: 20 jun. 2025.

SENA, C. Á. P.; PAIXÃO, J. A. R. da; FRANÇA, J. R. de A. A Topological Data Analysis approach for retrieving Local Climate Zones patterns in satellite data. **Environmental Challenges,** [S. l.], v. 5, 100359, dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100359. Disponível em: https://www-sciencedirect-com.ez22.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2667010021003334?via%3Dihub. Acesso em: 28 abr. 2025.

SILVA, A. N. da; WOLLMANN, C. A.; IENSSE, A. C.; HOPPE, I. L.; BAUMHARDT, O. da F.; WRITZL, L.; COSTA, I. T.; GOBO, J. P. A.; GALVANI, E.; MATZARAKIS, A. Assessing the Relationship between Urban Heat Islands and Local Climate Zones during a Winter Period in the Coastal City of Balneário Camboriú/SC, Brazil. **Atmosphere,** [S. l.], v. 15, n. 10, p. 1171, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos15101171. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/15/10/1171. Acesso em: 28 abr. 2025.

SOUZA, C. A. de; PARANHOS FILHO, A. C.; GUARALDO, E. Estudo cienciométrico sobre ilhas de calor urbanas e zonas climáticas locais. **Revista Brasileira de Climatologia,** [S. l.], v. 26, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.66588. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/66588. Acesso em: 28 abr. 2025.
FERREIRA, H. V. L.; UGEDA JÚNIOR, J. C. Variação da temperatura da superfície através de imagens ASTER em zonas climáticas locais da cidade de Cuiabá, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia,** [S. l.], v. 26, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.67546. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/67546. Acesso em: 28 abr. 2025.

STEWART, I. D.; OKE, T. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 93, ed. 12, p. 1879–1900, 2012. DOI https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1. Disponível em: in: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/93/12/bams-d-11-00019.1.xml. Acesso em: 21 jun. 2023.

STEWART, I. D. **Redefining the urban heat island (T).** University of British Columbia. 2011. Disponível em: https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0072360. Acesso em: 08 ago. 2024.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. de C. T. Intensidade, magnitude e evolução diária da ilha de calor atmosférica em cidades de pequeno porte: análise simultânea a partir das Zonas Climáticas Locais (LCZs). **Revista Brasileira de Climatologia,** [S. l.], v. 30, n. 18, p. 377–401, 2022. DOI: https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.14882. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14882. Acesso em: 28 abr. 2025.

APÊNDICE I – RESULTADOS DA BUSCA PELO TERMO “LOCAL CLIMATE ZONES”

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Renata dos Santos Cardoso, Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim	Urban heat island analysis using the ‘local climate zone’ scheme in Presidente Prudente, Brazil	2018	Local	Presidente Prudente (SP)	Medições móveis de temperatura do ar realizadas em diferentes LCZs, em cinco noites de inverno, entre junho e julho de 2014.	-As LCZs mais densamente construídas apresentaram as maiores temperaturas, enquanto as áreas com vegetação baixa foram as mais frescas. -Foi registrada uma diferença de mais de 5 °C entre zonas com características físicas significativamente distintas (ΔT LCZ 24–D). -A diferença média entre zonas foi de 3,8 °C (ΔT LCZ 3–D).
Dirce Maria Pellegatti Franco, María de Fátima Andrade, Rita Yuri Ynoue, Jason Ching	Effect of Local Climate Zone (LCZ) classification on ozone chemical transport model simulations in Sao Paulo, Brazil	2019	Regional	Área Metropolitana de São Paulo (SP)	Modelagem numérica a partir do modelo WRF-Chem. Utilização de dois parâmetros de superfície urbana: *default* e multi-camada BEP (Building Environment Parameterization a partir de dados WUDAPT nível “0” LCZ). Comparação da modelagem com observações de estações de superfície e sondagens verticais de ozônio.	-A utilização da parametrização BEP com dados LCZ (WUDAPT nível “0”) melhorou a simulação das variáveis meteorológicas (principalmente velocidade do vento), ou seja, o detalhamento do ambiente urbano melhorou a previsão climática local. -A utilização da parametrização BEP com dados LCZ (WUDAPT nível “0”) não melhorou significativamente as simulações da concentração de ozônio. -Os modelos ainda enfrentam dificuldades para reproduzir com precisão níveis de poluição atmosférica (como o ozônio), mostrando a complexidade da química atmosférica urbana.

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Camila Tavares Pereira, Érico Masiero, Vandoir Bourscheidt	Socio-spatial inequality and its relationship to thermal (dis)comfort in two major Local Climate Zones in a tropical coastal city	2021	Local	N.I.*	Medições in loco (temperatura do ar em duas Zonas Climáticas Locais) e modelagem computacional (temperatura média radiante simulada a partir do modelo SOLWEIG)	-Na LCZ 1 (área de maior renda), a temperatura do ar permanece em uma faixa considerada confortável; na LCZ 3 (área de menor renda), os domicílios são expostos a estresse térmico (temperatura do ar e temperatura média radiante mais elevadas). -Áreas com maior concentração de renda recebem melhor planejamento urbano. -Reformas públicas devem priorizar áreas mais quentes (como a LCZ 3). -Defende-se a redistribuição de recursos ambientais para promover a equidade espacial urbana.
Camila Tavares Pereira, Vandoir Bourscheidt, Érico Masiero	Seasonal Variation of Canopy Layer Heat Island at Distinct Local Climate Zones in a Tropical Coastal City	2021	Local	N.I.*	Coleta de dados com dataloggers e duas estações meteorológicas (uma na área urbana e outra nas proximidades). Seleção de dias representativos segundo aspectos meteorológicos. Organização dos dados nas estações verão e inverno. Análise da intensidade da ilha de calor na camada do dossel urbano (UHI UCL), com base na diferença de temperatura entre diferentes LCZs.	-Durante o período da noite, a anomalia de temperatura é mais alta em edifícios altos e compactos e durante o inverno. -Durante o dia, a maior anomalia está em edifícios baixos e compactos e durante o verão (no entanto, foram encontradas grandes variações, sugerindo que a análise da intensidade das ilhas de calor urbanas durante o dia depende de informações meteorológicas completas).

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Caio Átila Pereira Sena, João Paixão, José Ricardo de Almeida França	A Topological Data Analysis approach for retrieving Local Climate Zones patterns in satellite data	2021	Global	N.I.*	Resumo e quantificação de características espaciais em imagens de satélite a partir da Homologia Persistente (PH). Utilização das LCZs para examinar os resultados da filtragem da PH e do algoritmo K-means para unir áreas da mesma LCZ.	-Os métodos propostos dão robustez a dados faltantes dos satélites. -Os métodos propostos foram pouco sensíveis a um certo nível de variação na amostragem espacial. -Os resultados demonstram o potencial de aplicação do método em pesquisas futuras.
Ismael Luiz Hoppe, Cássio Arthur Wollmann, André Schroder Buss, João Paulo Assis Gobo, Salman Shooshtarian	Local Climate Zones, Sky View Factor and Magnitude of Daytime/Nighttime Urban Heat Islands in Balneário Camboriú, SC, Brazil	2022	Local	Balneário Camboriú (SC)	Coleta da temperatura do ar em sete pontos fixos e em uma estação meteorológica oficial, em diferentes momentos do dia, em outubro de 2020. Medições do Fator de Visão do Céu (SVF) em cada ponto. Utilização do método WUDAPT para mapear as LCZs.	-Houve grande variação no Sky View Factor (SVF) entre os pontos de coleta. -Diversas LCZs foram mapeadas, o que contribuiu para a formação de ilhas de calor (magnitude máxima de 10,8 °C) e para a formação de ilhas de frescor (magnitude de até −4,5 °C).
Rodrigo Schmitt Fernandes, Víctor Fernandez Nascimento, Marcos Wellausen Dias de Freitas, Jean Pierre Ometto	Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review	2023	Global	N.A.**	Revisão bibliográfica sistemática utilizando o método PRISMA para investigar a classificação LCZ aplicada à compreensão da Temperatura de Superfície e da Ilhas de Calor de Superfície (SUHI)	-Foram encontrados artigos muito recentes, iniciando em 2016, com tendência de crescimento. -Todos abordam a Ilha de Calor Urbana (UHI), mas mais da metade não menciona o método de cálculo da SUHI. -Landsat e TERRA/AQUA foram os sensores mais utilizados. -World Urban Database: método

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
						mais utilizado para definir LCZs. -Os métodos de mapeamento de LCZs são suficientemente precisos para estudos de SUHI, considerando as mudanças climáticas atuais.
Luciana Schwandner Ferreira, Diego Ferretto, Denise Helena Silva Duarte	Mapeando a morfologia urbana: aplicações do método Local Climate Zones (LCZ) em diferentes escalas do projeto	2023	Local/Regional	N.I.*	Aplicação do mapeamento das LCZs em dois contextos distintos: estudo de alterações da cobertura vegetal urbana em uma Região Metropolitana e estudo da morfologia e estrutura urbana em uma cidade média.	-O método LCZ mostrou-se adequado para pesquisas urbanas com diferentes objetivos e escalas. -O método LCZ, por utilizar dados gratuitos e softwares livres, é acessível e replicável. -O método LCZ contribui efetivamente para o conhecimento e o monitoramento das características morfológicas urbanas.
Bruno Rech, Rodrigo Nehara Moreira, Tiago Augusto Gonçalves Mello, Tomáš Klouček, Jan Komárek	Assessment of daytime and nighttime surface urban heat islands across local climate zones – A case study in Florianópolis, Brazil	2024	Local	Florianópolis (SC)	Cálculo do Urban Thermal Field Variance Index para quantificar as Ilhas de Calor Urbanas de Superfície (SUHI), utilizando imagens diurna e noturna do Landsat 8. Análise da variação da SUHI entre diferentes tipos de LCZ, durante o dia e a noite. Análises estatísticas para examinar a diferença das SUHI entre LCZs.	-Tipologias urbanas abertas apresentaram temperaturas diurnas mais amenas (especialmente em áreas abertas com edificações mais altas), enquanto áreas compactas de baixa altura tiveram a maior intensidade de SUHI durante o dia. -Edificações mais altas registraram SUHI mais intenso à noite, enquanto áreas abertas e de baixa altura mantiveram temperaturas mais amenas nesse

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
						período. -Forte associação entre a dinâmica da SUHI, a estrutura urbana (morfologia e densidade das construções) e a presença de vegetação. -O arcabouço metodológico proposto se mostrou eficaz e pode ser aplicado em outras regiões.
Kely Prissila Saraiva Cordovil, Yao Télesphore Brou, Osman Abdillahi Guedi, Lucas Vaz Peres, Wilderclay Machado, Avner Brasileiro dos Santos Gaspar, Hassan Benchérif, Lucas Raphael Mourão Gonçalves, Luciana Gonçalves de Carvalho	Local Climate Zones Classification Applied to a Brazilian Amazon City	2024	Local	Santarém (PA)	Mapeamento digital das LCZs pelo protocolo WUDAPT (Nível 0). Classificação supervisionada com o LCZ Generator. Cálculo do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) para identificar variações nas áreas verdes em cada LCZ.	-Foram identificadas 7 das 17 classes principais de LCZ na cidade de Santarém (PA). -O uso do NDVI foi essencial para avaliar a vegetação presente em cada classe LCZ e para destacar que há menos vegetação em áreas construídas. -A aplicação do método aprimorou a compreensão da morfologia urbana da cidade.
Aline Nunes da Silva, Cássio Arthur Wollmann, Amanda Comassetto Iensse, Ismael Luiz Hoppe, Otávio de Freitas Baumhardt, Luana	Assessing the Relationship between Urban Heat Islands and Local Climate Zones during a Winter Period in the Coastal City of Balneário	2024	Local	Balneário Camboriú (SC)	Coleta de dados meteorológicos em 11 pontos fixos da região metropolitana de Balneário Camboriú durante o inverno. Análise sinótica das datas observadas (identificação dos sistemas atmosféricos atuantes na	-A crescente verticalização em Balneário Camboriú tem grande influência na ocorrência de ilhas de calor e de frescor. -As LCZs com edificações espaçadas e as LCZs com vegetação densa têm menores

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Writzl, Iago Turba Costa, João Paulo Assis Gobo, Emerson Galvani, Andreas Matzarakis	Camboriú/SC, Brazil				região). Elaboração de mapa das LCZs (utilizando método WUDAPT) para correlacionar os dados de ilhas de calor e de frescor com os diferentes tipos de uso e cobertura do solo.	magnitudes de calor e de frescor. -As maiores magnitudes de ilhas de calor e de frescor foram encontradas nas LCZs 1 e 3. -A análise sinóptica confirma estudos anteriores, demonstrando que a estabilidade atmosférica (domínio de anticiclones) favorece a emergência de ilhas de calor e de frescor.

LEGENDA: *N.I. = não informado; **N.A. = não aplicável.
FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

APÊNDICE II – RESULTADOS DA BUSCA PELO TERMO "ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS"

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Érico Masiero, Léa Cristina Lucas de Souza	Estabilidade Atmosférica e Comportamento de Zonas Climáticas Locais em São José Do Rio Preto - SP	2015	Local	São José do Rio Preto (SP)	Distribuição de cinco sensores termo-higrométricos em quatro LCZs diferentes. Monitoramento das variações de temperatura em condições de atmosfera instável e estável.	A variação de temperatura sob atmosfera instável foi menor que 2ºC; a diferença foi maior sob atmosfera estável. As maiores variações ocorreram entre a área próxima ao corpo d'água e o bairro periférico. A seleção cuidadosa do recorte temporal e espacial é essencial para analisar adequadamente os microclimas urbanos.
Camila Amaro de Souza, Antônio Conceição Paranhos Filho,	Estudo Cienciométrico sobre Ilhas de Calor Urbanas e Zonas Climáticas Locais	2020	Global	N.A.**	Levantamento de artigos com os termos "Urban Heat Island" ou "UHI". Levantamento de artigos com os	Interpretação do grau de relevância dos termos pesquisados para pesquisas em climatologia urbana. Possibilidade de uso dos artigos

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Eliane Guaraldo					termos “Urban Heat Island” ou “UHI" e “Local Climate Zones” ou “LCZ”. Contabilização e espacialização dos resultados.	levantados para pesquisas futuras.
Hugo Vilela Lemos Ferreira, José Carlos Ugeda Júnior	Variação da Temperatura da Superfície através de Imagens ASTER em Zonas Climáticas Locais da Cidade de Cuiabá, Brasil	2020	Local	Cuiabá (MT)	Obtenção de imagens ASTER de diferentes datas e horários para obtenção da temperatura de superfície (Ts). Comparação das LCZs com os valores de Ts em diferentes condições temporais, incluindo variações sazonais e horários (manhã e noite).	Variações na temperatura de superfície (Ts) em diferentes horas do dia. Variabilidade sazonal na Ts relacionada ao clima tropical com inverno seco. Variabilidade espacial e temporal da Ts paralela às LCZs analisadas.
Eduardo Leite Krüger, Natasha Hansen Gapski	Avaliação dos efeitos microclimáticos de diferentes zonas climáticas locais em cidade de clima temperado	2020	Local	Londres (Inglaterra)	Utilização de dez estações amadoras da rede Weather Underground, distribuídas em diferentes LCZs. Análise do perfil longitudinal das temperaturas. Cálculo do somatório de graus-hora de aquecimento e resfriamento, a fim de avaliar a demanda energética para climatização das edificações.	Presença de ilhas de calor nos locais com maior intensidade de uso e ocupação e menor cobertura vegetal. Quanto à necessidade de climatização artificial, houve diferenças significativas em função da LCZ de cada ponto.
Renata dos Santos Cardoso, Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim	Propriedades da Superfície e Variáveis Climáticas para Modelagem de Zonas Climáticas Locais em Presidente Prudente	2021	Local	Presidente Prudente (SP)	Caracterização das Zonas Climáticas Locais (LCZs) em Presidente Prudente (SP). Construção de uma base de dados com informações da superfície e climáticos para modelagem no software ENVI-met.	Contrastes térmicos superiores a 6 °C entre diferentes LCZs, especialmente entre aquelas com diferentes geometrias e coberturas da terra, em condições sinóticas estáveis. Esse diagnóstico permite avaliar os fatores que influenciam o campo térmico e simular cenários para reduzir a temperatura urbana.
Vanessa Oliveira Borges, Gean	Zonas climáticas locais e as ilhas de	2022	Global	N.A.**	Revisão sistemática de publicações científicas sobre o tema da Ilha de	Há correlação positiva entre as LCZs e a intensidade e ocorrência

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Carlos Nacimento, Maria Cristina Celuppi, Paulo Sérgio Lúcio, Graziela Tosini Tejas, João Paulo Assis Gobo	calor urbanas: uma revisão sistemática				Calor Urbana (ICU), com foco no período de 2012 a 2020 e no uso da ferramenta WUDAPT.	das ICUs, mas os resultados dependem dos métodos utilizados nos estudos analisados. No Hemisfério Norte, predominam estudos com coleta de dados in loco. No Hemisfério Sul, é mais comum o uso de dados secundários (imagens de satélite e transectos móveis).
Danielle Cardozo Frasca Teixeira, Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim	Intensidade, magnitude e evolução diária da ilha de calor atmosférica em cidades de pequeno porte: análise simultânea a partir das Zonas Climáticas Locais (LCZs)	2022	Local	Presidente Venceslau e Santo Anastácio (SP)	Comparação de feições urbanas similares entre duas cidades (com método LCZ). Mensuração da ICU na atmosfera inferior a partir da comparação das LCZs urbanas com as LCZs rurais das duas cidades. Análise em diferentes estações do ano (inverno e verão, julho e dezembro de 2017).	As LCZs 3B (compactas de baixa elevação com vegetação espaçada) apresentaram anomalias térmicas distintas. As ICUs são influenciadas por características urbanas e por elementos físicos do local. O pico das ICUs não coincidiu nos meses analisados, mesmo com feições urbanas semelhantes. Em julho, as ICUs foram noturnas com magnitudes fraca e moderada, em episódios isolados; em dezembro, o fenômeno foi diurno com magnitudes moderada, forte e muito forte.
Rílden Gomes Rodrigues, Luiz Pinedo Quinto, Hélio Gomes Filho	Estudo da ilha de calor urbano para aplicação em Itaperuna: revisão sistemática das metodologias para classificação da área urbana em zonas climáticas locais	2023	Global	N.A.**	Busca na plataforma Web of Science a partir de palavras-chave. Filtragem de artigos com base em critérios de seleção. Análise dos métodos e programas utilizados para classificar áreas em LCZ e para analisar dados meteorológicos.	Direcionamento sobre a melhor forma de classificar LCZs. Orientação quanto à obtenção e análise adequada dos dados meteorológicos.

Autor(es)	Título	Ano	Escala	Área de estudo	Abordagem metodológica	Principais resultados
Francisco Ivam Castro do Nascimento, Vanessa Oliveira Borges, João Paulo Assis Gobo, Adriana Cristina da Silva Nunes, Luiz Augusto Ferreira Monteiro	Identificação de zonas climáticas locais na cidade de Rio Branco	2024	Local	Rio Branco (AC)	Aplicação da metodologia LCZ e avaliação da eficácia do mapeamento. Análise das LCZs que abrangem os eixos de expansão urbana na cidade.	O mapeamento das LCZs apresentou uma acurácia geral satisfatória em comparação a outros estudos, mas as classes LCZ referentes a tipos de construções tiveram menor acurácia. Os eixos de expansão urbana estão principalmente nas classes LCZ A, LCZ D e LCZ G. As classes com menor temperatura estão sendo substituídas por classes com temperaturas mais elevadas. A metodologia foi mais eficiente em classificar as classes de cobertura da terra e aquelas com maior distribuição espacial na cidade.

LEGENDA: *N.I. = não informado; **N.A. = não aplicável.
FONTE: Elaborado pelos autores (2025).

INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DOS PADILHAS (CURITIBA/PR): ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE 2009–2022

Franciele Marilies Estevam – Centro Universitário Internacional Uninter[1]
Vera Cristina Scheller dos Santos Rocha – Centro Universitário Internacional Uninter[2]
Otacílio Lopes de Souza Paz – UNESPAR[3]
Janderson Ferreira Muniz – Centro Universitário Internacional Uninter[4]
Karina Scheffer Cordeiro e Silva – Centro Universitário Internacional Uninter[5]
Alexandre Germano Marciano – Centro Universitário Internacional Uninter[6]
Renata Adriana Garbossa Silva – Centro Universitário Internacional Uninter[7]

1 INTRODUÇÃO

Nas cidades, a água costuma revelar aquilo que o planejamento urbano prefere esconder. As ruas pavimentadas, as áreas impermeabilizadas e cada curso d'água retificado altera a forma como a chuva se desloca pela área. Com o avanço da urbanização, a água passa a escoar mais rápido e perde as áreas para infiltrar, assim encontra os sistemas de drenagem que normalmente não acompanham o ritmo das transformações urbanas. Com essas mudanças os alagamentos e inundações deixam

[1] Mestra em Geografia – franciele.e@uninter.com
[2] Mestra em Geografia – vera.r@uninter.com
[3] Doutor em Geografia – otacilio.paz@unespar.edu.br
[4] Graduando em Geografia – jandersonferreiramuniz@hotmail.com
[5] Graduanda em Geografia – scskrn@gmail.com
[6] Doutor em Meio Ambiente e Recursos Hídricos – agermano@unifei.edu.br
[7] Doutora em Geografia – renata.g@uninter.com

de ser eventos pontuais e passam a fazer parte do cotidiano dessa região, funcionando como sinal visível das tensões entre cidade e natureza.

Olhar para esses fenômenos a partir das bacias hidrográficas urbanas permite compreender a cidade e os percursos da água. A bacia reúne, em um mesmo recorte, relevo, clima, uso do solo, infraestrutura e práticas sociais, tornando-se uma unidade privilegiada para observar como as escolhas feitas ao longo do tempo se acumulam no espaço. É nesse território integrado que se evidenciam as áreas mais vulneráveis, os limites do sistema de drenagem e as desigualdades na forma como os impactos dos eventos hidrológicos são distribuídos na região.

Em Curitiba/PR, cidade frequentemente associada a experiências inovadoras de planejamento urbano, a bacia hidrográfica Ribeirão dos Padilhas expressa essas contradições. Inserida em uma área densamente urbanizada, a bacia apresenta um histórico recorrente de registros de alagamentos e inundações, que se repetem ao longo dos anos e atingem diferentes setores do território. Ao longo das últimas décadas, o Ribeirão dos Padilhas foi alvo de sucessivas intervenções públicas voltadas à mitigação de eventos hidrológicos extremos, incluindo obras de micro e macrodrenagem, desassoreamento, reconfiguração de canais e implantação de bacias de detenção.

Mesmo assim ainda ocorrem problemas na região, inclusive em dias com volumes reduzidos de precipitação, isso sugere que as explicações desses eventos não podem ser atribuídas apenas à intensidade da chuva. Aspectos como a impermeabilização do solo, a ocupação de fundos de vale, a capacidade do sistema de drenagem e a manutenção das infraestruturas exercem influência decisiva sobre a dinâmica dos eventos hidrológicos nessa região. Compreender esses processos exige, portanto, uma leitura que vá além do evento climático, sendo preciso analisar a forma como a cidade foi construída, adaptada e mantida ao longo do tempo.

O presente capítulo tem como objetivo analisar a distribuição temporal e espacial das ocorrências de alagamentos e inundações na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas, no município de Curitiba/PR, no período de 2009 a 2022, bem como examinar a relação entre a precipitação diária e a ocorrência desses eventos.

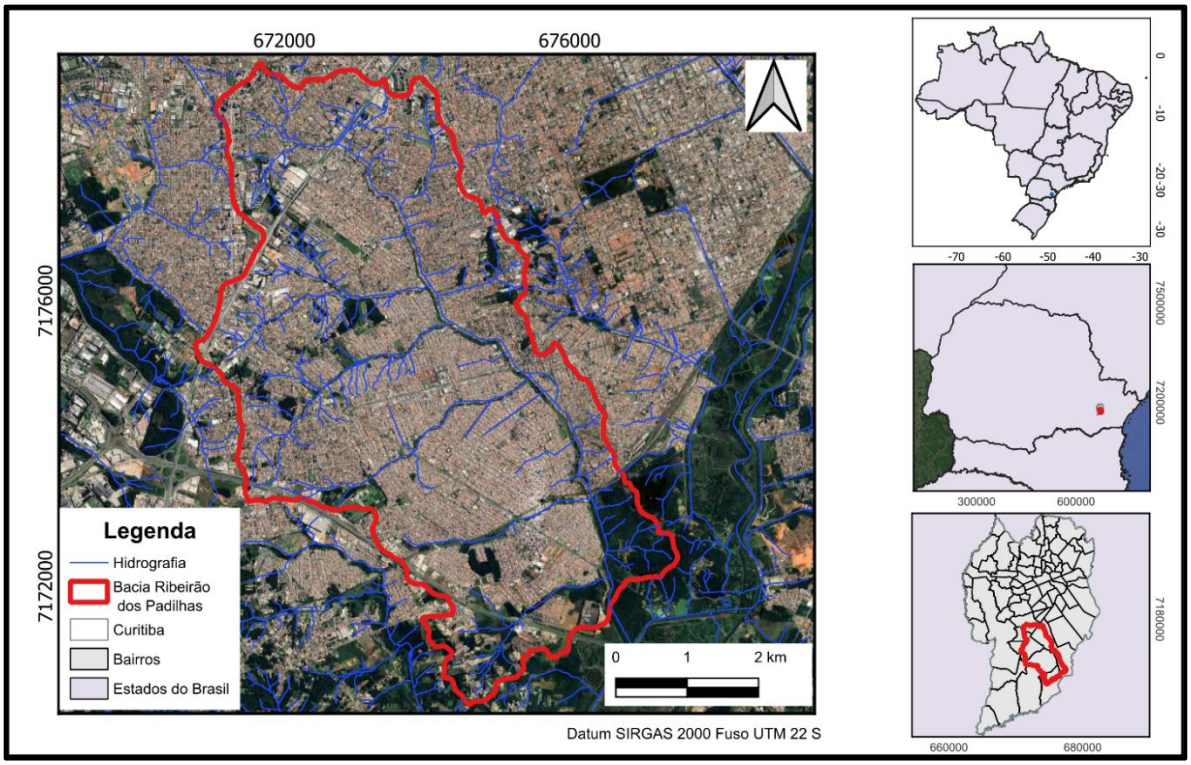
Ao articular dados pluviométricos, registros de ocorrências e análises geoespaciais, o estudo busca contribuir para uma compreensão integrada dos

processos que condicionam a recorrência de eventos hidrológicos urbanos e para o debate sobre os limites das estratégias tradicionais de drenagem em bacias urbanas densamente ocupadas.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas é uma das mais importantes do município de Curitiba/PR, abrangendo os bairros Pinheirinho, Capão Raso, Xaxim, Novo Mundo, Alto Boqueirão, Sítio Cercado, Tatuquara, Umbará e Ganchinho, até desaguar no Rio Iguaçu. Segundo Paz *et al.* (2023), a bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas apresentava, em 2023, cerca de 81% de sua superfície impermeabilizada, sendo assim considerada uma bacia densamente urbanizada. Conforme Bonato e Santos (2013), apresenta diversos usos e ocupação da terra, com predominância de uso residencial (64% da área da bacia), e apenas 8% da área apresenta remanescentes de vegetação ombrófila mista. A localização da bacia hidrográfica Ribeirão dos Padilhas é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas



Fonte: Os autores, 2026.

Com base nisso, a presente pesquisa se trata de um estudo de caso com finalidade aplicada. O roteiro metodológico utilizado em sua elaboração se constitui das seguintes etapas: pesquisa bibliográfica e documental realizada nas bases de dados; levantamento e organização dos dados; elaboração dos produtos gráficos e cartográficos; análise e interpretação dos dados obtidos.

2.1 LEVANTAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados referentes às ocorrências de alagamentos/ inundações foram obtidos a partir dos registros disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Curitiba no portal Dados Abertos. O portal reúne informações e dados governamentais de domínio público para a livre utilização.

Dessa forma, buscou-se no acervo da Secretaria Municipal de Defesa Social e Trânsito (SMDT) os dados referentes aos registros de inundação/ alagamento da Defesa Civil Municipal, abrangendo o período de 2009 a 2022. Destaca-se que até 2022 esse órgão pertencia a Secretaria mencionada.

Após aquisição das planilhas em arquivo em formato *Comma-Separated Values* (CSV), os eventos foram tratados, separados e exportados para arquivo de planilha eletrônica do *software* Microsoft Excel, utilizando o *software* Microsoft Power BI. Em seguida, no *software* Microsoft Excel os eventos foram tabulados com base na data de ocorrência e na localização. Convém enfatizar que devido às características da base de dados, não foi possível diferenciar os registros de alagamento e inundação, sendo ambos tratados e registrados conjuntamente como ocorrências de eventos hidrológicos urbanos na base de dados consultada.

Os endereços referentes aos registros de inundação/alagamento foram geocodificados por meio da API *Geocoding* do Google Maps, permitindo a obtenção de coordenadas geográficas aproximadas dos locais de ocorrência. Ressalta-se que, devido ao processo de geocodificação automática, as coordenadas representam posições aproximadas dos eventos, não correspondendo necessariamente ao ponto exato da ocorrência, já que os dados fornecem apenas os endereços e não as coordenadas geográficas do local. Após a geocodificação, foram feitas conferências

de forma amostral, e na sequência, utilizando-se o *software* QGIS, realizou-se o corte dos dados de acordo com os limites da bacia do Ribeirão dos Padilhas.

Os dados pluviométricos diário foram coletados para analisar a relação entre precipitação e ocorrência de eventos. Os dados foram obtidos do Banco de Dados Meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a estação automática de Curitiba/PR, presente no bairro Jardim das Américas.

Destaca-se que os dados diários que apresentaram erros, e não estavam disponíveis na planilha, foram complementados com os dados da estação meteorológica convencional, presente no mesmo local, e que foi desativada em 2024. Os dados referentes a precipitação diária foram associados às datas em que ocorreram registros de alagamento/inundação. Posteriormente, os valores foram integrados à base de dados de ocorrências, permitindo a construção de uma base única contendo: data do evento; localização e precipitação diária correspondente.

Foram coletados dados vetoriais e matriciais disponíveis no endereço eletrônico da Prefeitura Municipal de Curitiba, sendo esses estruturados em uma base de dados geoespaciais (BDG) (PAZ; DAL PAI; PAULA, 2020). Para operar as camadas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) foi utilizado o *software* QGIS 3.40.5.

Os arquivos vetoriais referentes ao limite da bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas e curvas de nível com equidistância de 1 metro e escala 1:1000 foram adquiridos no endereço eletrônico do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC), no portal Geodownloads. As imagens orbitais de alta resolução espacial foram adquiridas junto ao acervo do Google Earth Pro.

2.2 ELABORAÇÃO DOS PRODUTOS

A partir dos dados espaciais foram produzidos mapas temáticos que representam a distribuição espacial das ocorrências na bacia, e análises estatísticas para avaliar a relação entre precipitação e ocorrências. Antes de iniciar a elaboração dos mapas, classificou-se os tipos de chuva, com base *no International Meteorological Vocabulary* (WMO182, 1983*), Severe Weather Information Center* e Carmo et al (2019), estipulou-se as classes de precipitação da seguinte forma: inferior a 5mm/ dia

– chuva fraca; de 5 a 20 mm/dia – chuva moderada; de 20 a 60 mm/dia chuva forte e acima de 60 mm/dia – chuva intensa.

A partir dessa classificação, foi elaborado o primeiro mapa temático de classe de chuva por registro de inundação/ alagamento na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas. Tal produto foi elaborado no *software* QGIS utilizando-se a simbologia graduado, discretizado em 5 classes, correspondendo as classes mencionadas anteriormente. O mapa de registro de inundação/ alagamento na bacia Ribeirão dos Padilhas também foi realizado no *software* QGIS, utilizando a simbologia graduada para representação dos anos de ocorrência dos eventos.

Para identificar áreas com maior concentração de eventos, foi aplicada a Estimativa de Densidade de Kernel, permitindo identificar padrões espaciais de concentração de ocorrências. Para isso, utilizou-se o *software* QGIS, ferramenta Mapa de calor (Estimativa de Densidade de Kernel), o raio utilizado foi de 300 m, pois julgou-se mais adequado para áreas densamente urbanizadas.

A análise estatística ocorreu por meio da elaboração do gráfico de dispersão, relacionando a precipitação diária (mm) e o número de eventos por dia. A análise foi realizada utilizando o *software* Microsoft Excel, incluindo a aplicação de linha de tendência e cálculo do coeficiente de determinação (R^2).

Adicionalmente, os eventos foram classificados em: inferior a 5mm/ dia – chuva fraca; de 5 a 20 mm/dia – chuva moderada; de 20 a 60 mm/dia chuva forte e acima de 60 mm/dia – chuva intensa, permitindo avaliar a distribuição das ocorrências em função da magnitude da chuva. A análise também foi realizada no software Excel, a partir do qual foi gerado um gráfico.

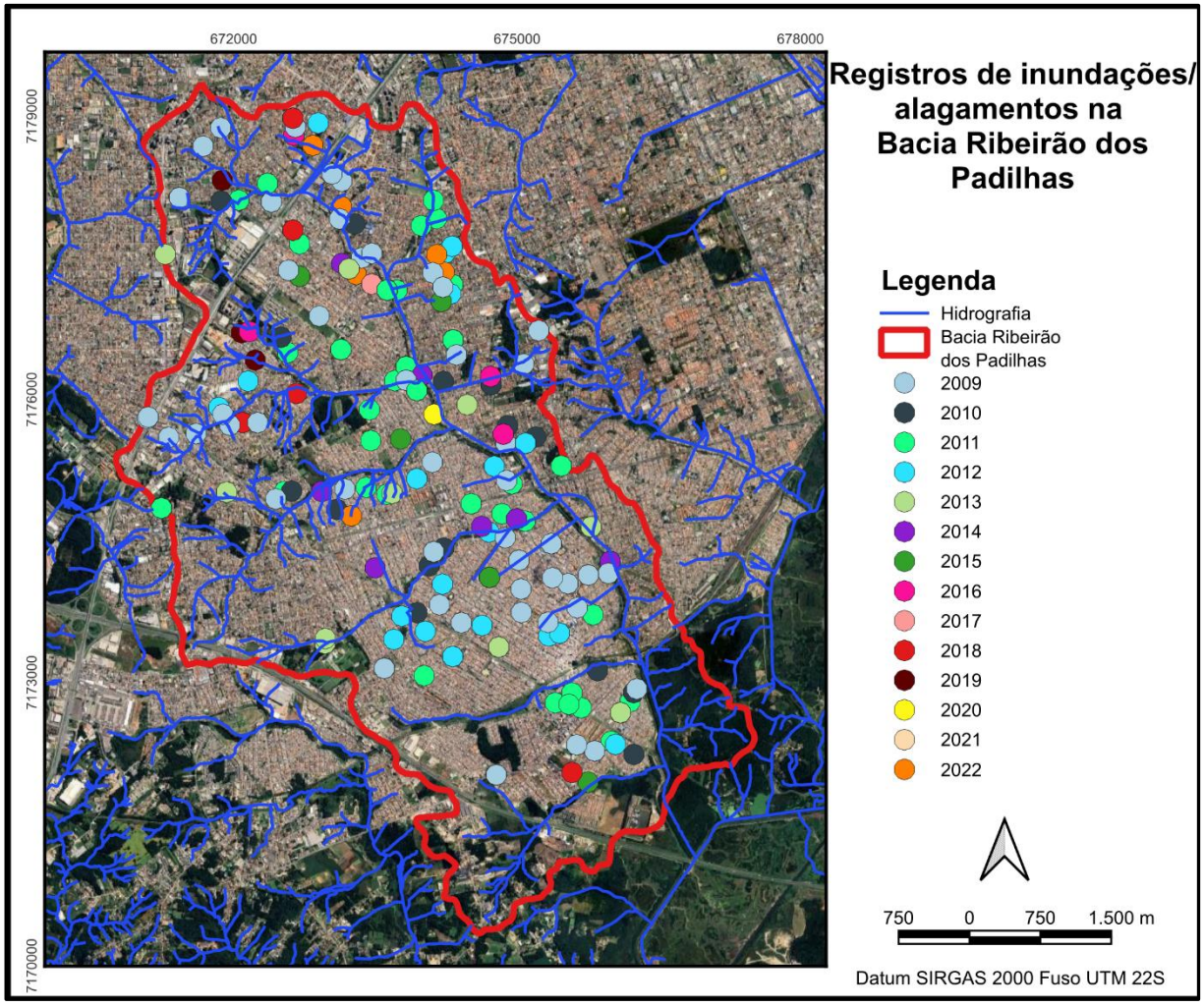
Com o intuito de contextualizar possíveis mudanças no padrão de ocorrências ao longo do período analisado, foi realizado um levantamento de notícias e documentos institucionais relacionados a obras e intervenções na drenagem urbana da bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas. Essas informações foram utilizadas como subsídio para a discussão dos resultados, considerando possíveis impactos de intervenções estruturais na redução do número de registros de ocorrências.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS OBTIDOS

No período analisado (2009 a 2022) a bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas apresentou 258 registros de inundação/alagamento registrados pela Defesa Civil do município. A espacialização dos registros por ano, bem como a concentração dos casos na bacia por período, podem ser visualizados na figura 2.

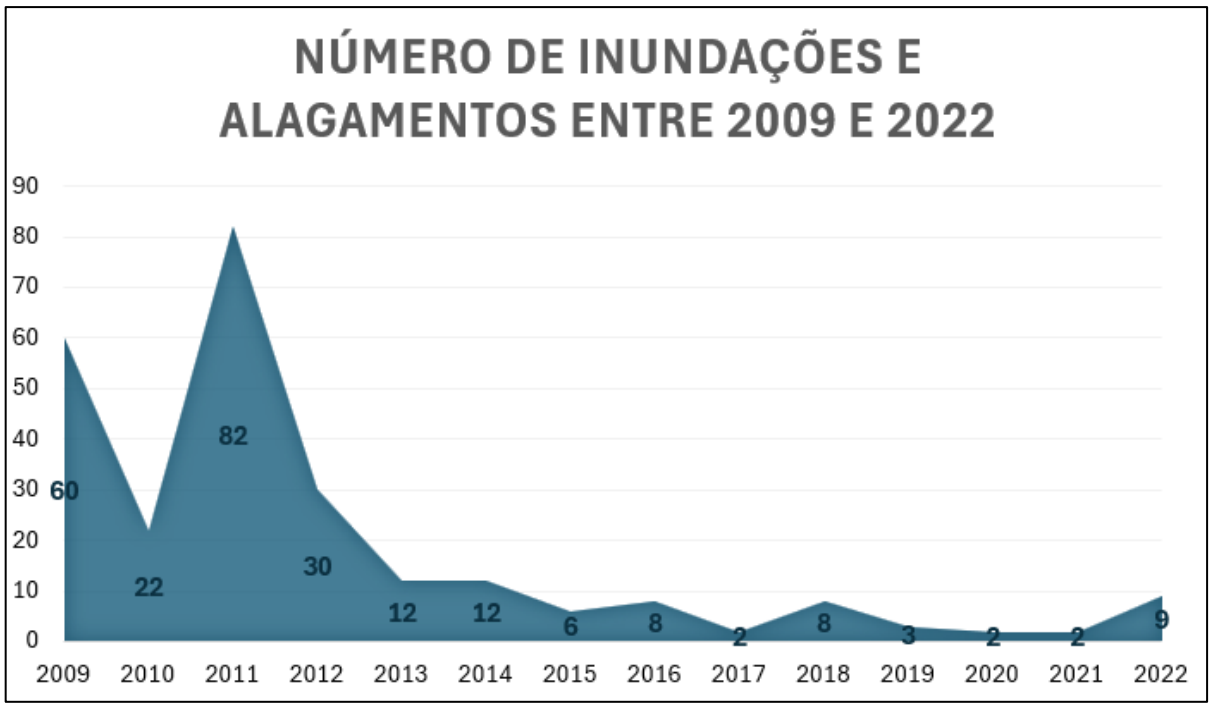
Figura 2 – Registros de inundação/alagamento na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas no período de 2009 a 2022



Fonte: Os autores, 2026.

O maior número de registros ocorreu em 2011, com 82 registros, seguido de 2009 com 60 registros (figura 3). Esses registros correspondem a 110 episódios distintos, indicando que em diversas datas ocorreram múltiplos registros de alagamentos/inundações na bacia.

Figura 3 – Número de registros de inundações/alagamentos entre 2009 e 2022

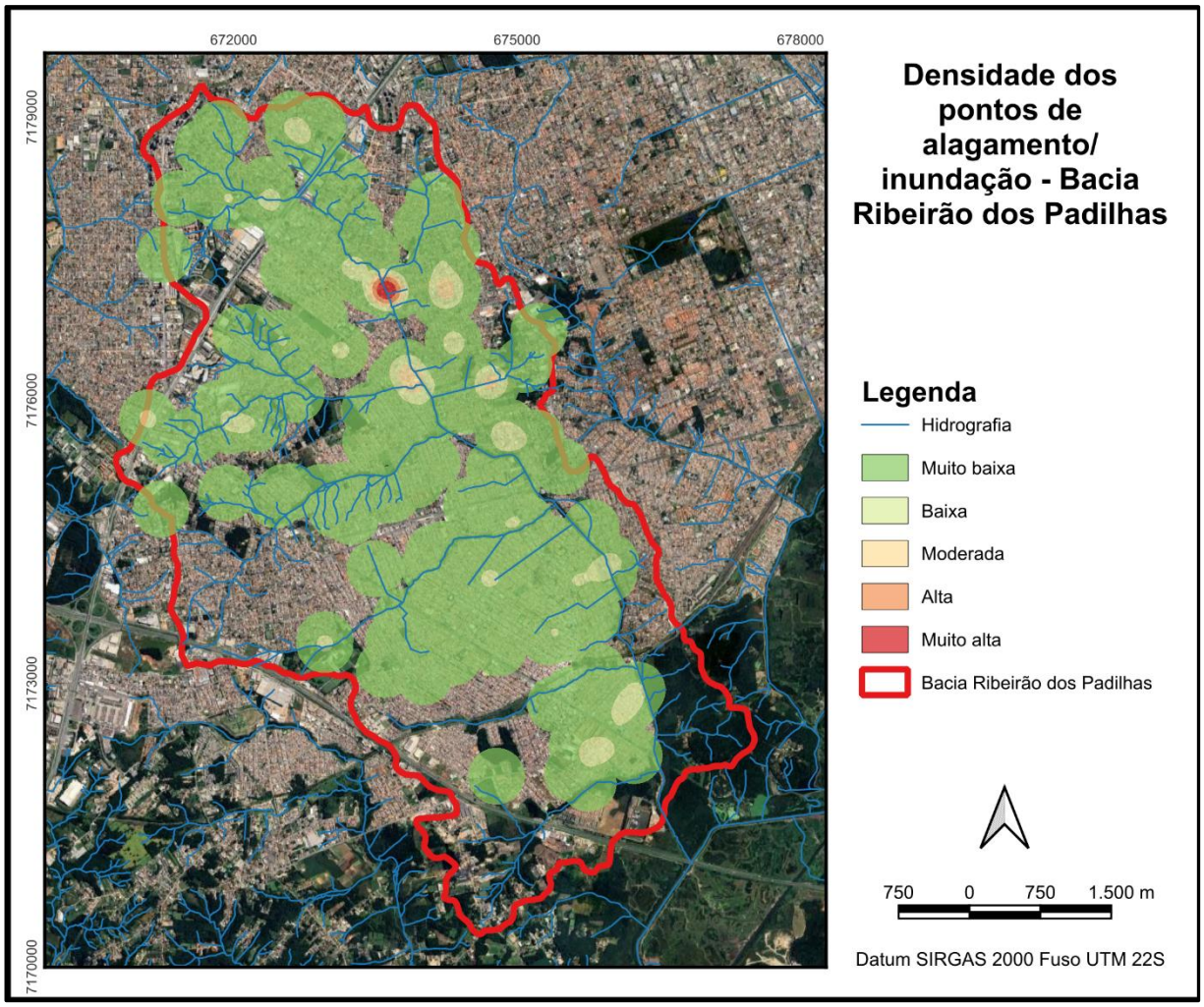


Fonte: Portal Dados Abertos, 2025.

O grande número de registros na bacia evidência e se relaciona a elevada densidade da urbanização, tendo em vista que de acordo com Couto, Nucci e Liberti, 2022) os espaços livres de edificação ocupam apenas 11% da área total da bacia, valor inferior ao total do município de Curitiba (38%). Essas taxas indicam que a bacia apresenta baixa capacidade de autorregulação, encontrando-se distante do funcionamento observado em sistemas naturais.

A distribuição espacial das ocorrências utilizando a estimativa de densidade Kernel (figura 4) indicou a presença de zonas com maior densidade de eventos. Essas áreas podem estar associadas a características locais da urbanização, como elevada impermeabilização do solo, limitações da rede de drenagem, ocupação de áreas naturalmente suscetíveis à acumulação de água ou canalização de rios, como fica nítido no local com maior predominância de concentração.

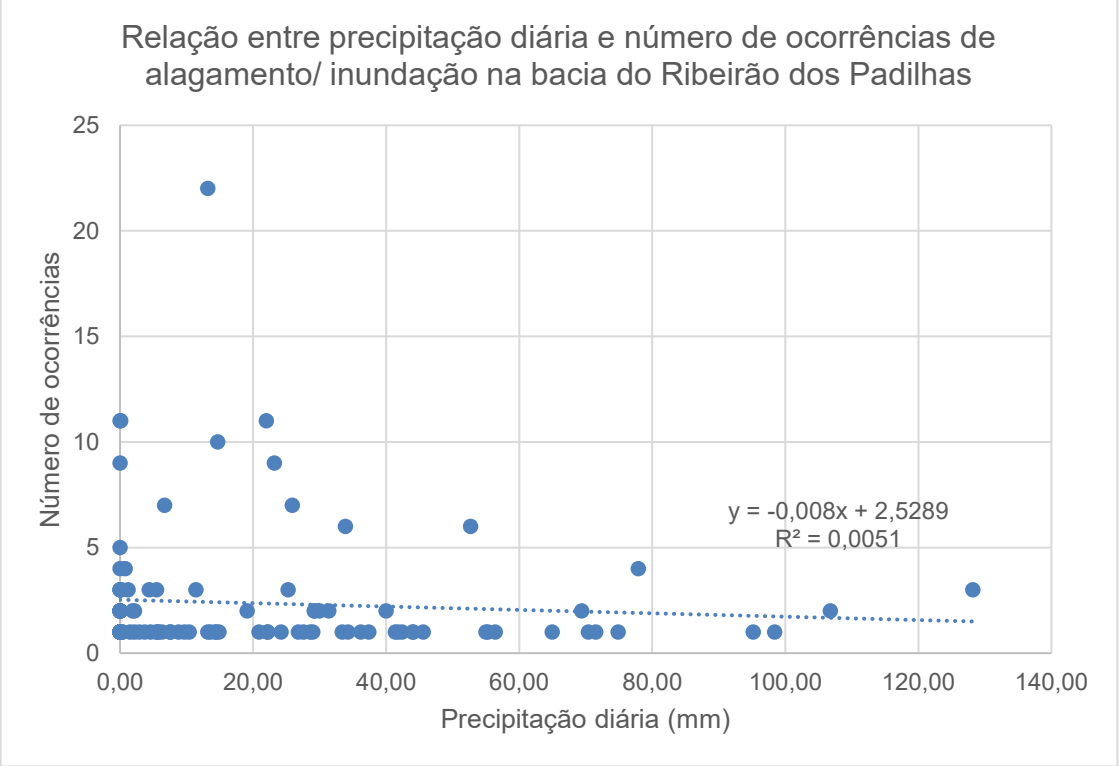
Figura 4 – Densidade dos pontos de alagamento/inundação na bacia Ribeirão dos Padilhas



Fonte: Os autores, 2026.

A análise da precipitação diária em relação a data e número de ocorrências, apresentou expressiva dispersão entre os dados de precipitação e o número de registros de ocorrências (figura 5). A linha de tendência apresentou coeficiente de determinação (R^2) muito baixo, indicando ausência de correlação linear significativa entre a intensidade da chuva e o número de ocorrências registradas.

Figura 5 – Relação entre precipitação diária e número de ocorrências de alagamento/inundação na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas

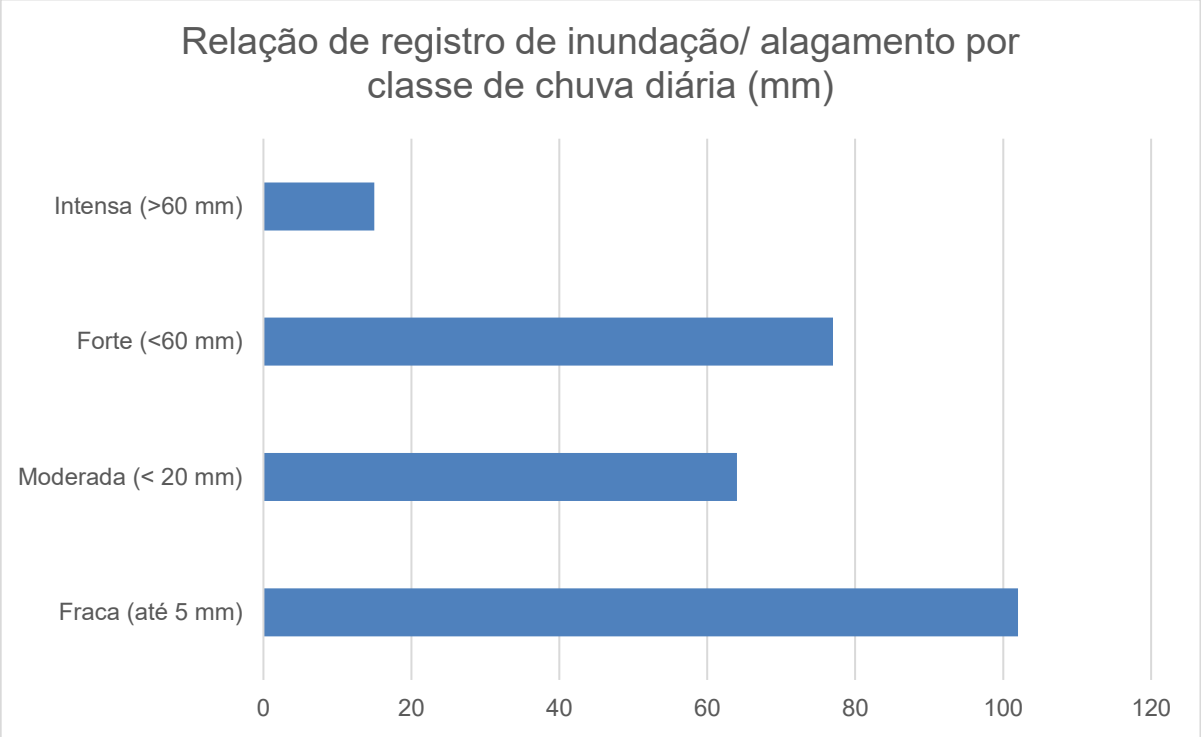


Fonte: Os autores, 2026.

O resultado obtido sugere que a ocorrência de alagamentos/ inundações na bacia do Ribeirão dos Padilhas não depende exclusivamente da intensidade da precipitação, mas também de fatores relacionados à dinâmica urbana, como a impermeabilização do solo, ao uso e ocupação da terra e a capacidade do sistema de drenagem. Tal comportamento é coerente com interpretações sobre bacias urbanas em que mudanças antropogênicas (formas e materiais superficiais) interferem no ciclo hidrológico e nos processos hidromorfodinâmicos, intensificando respostas rápidas ao escoamento superficial (MOROZ-CACCIA GOUVEIA; RODRIGUES, 2017).

Tal fato corrobora com os dados obtidos em relação a classificação da intensidade da precipitação nos dias em que ocorreram os registros, uma vez que a maior parte dos registros ocorreram com chuva fraca (102 ocorrências) seguida de chuva forte (77 ocorrências) (Figura 6). Os episódios de chuva intensa representam 15 ocorrências que ocorreram em 2009, 2011, 2012, 2013, 2014, 2018, 2021 e 2022, sendo que 2013 foi o período que apresentou maior registros de inundação ou alagamento com chuva intensa.

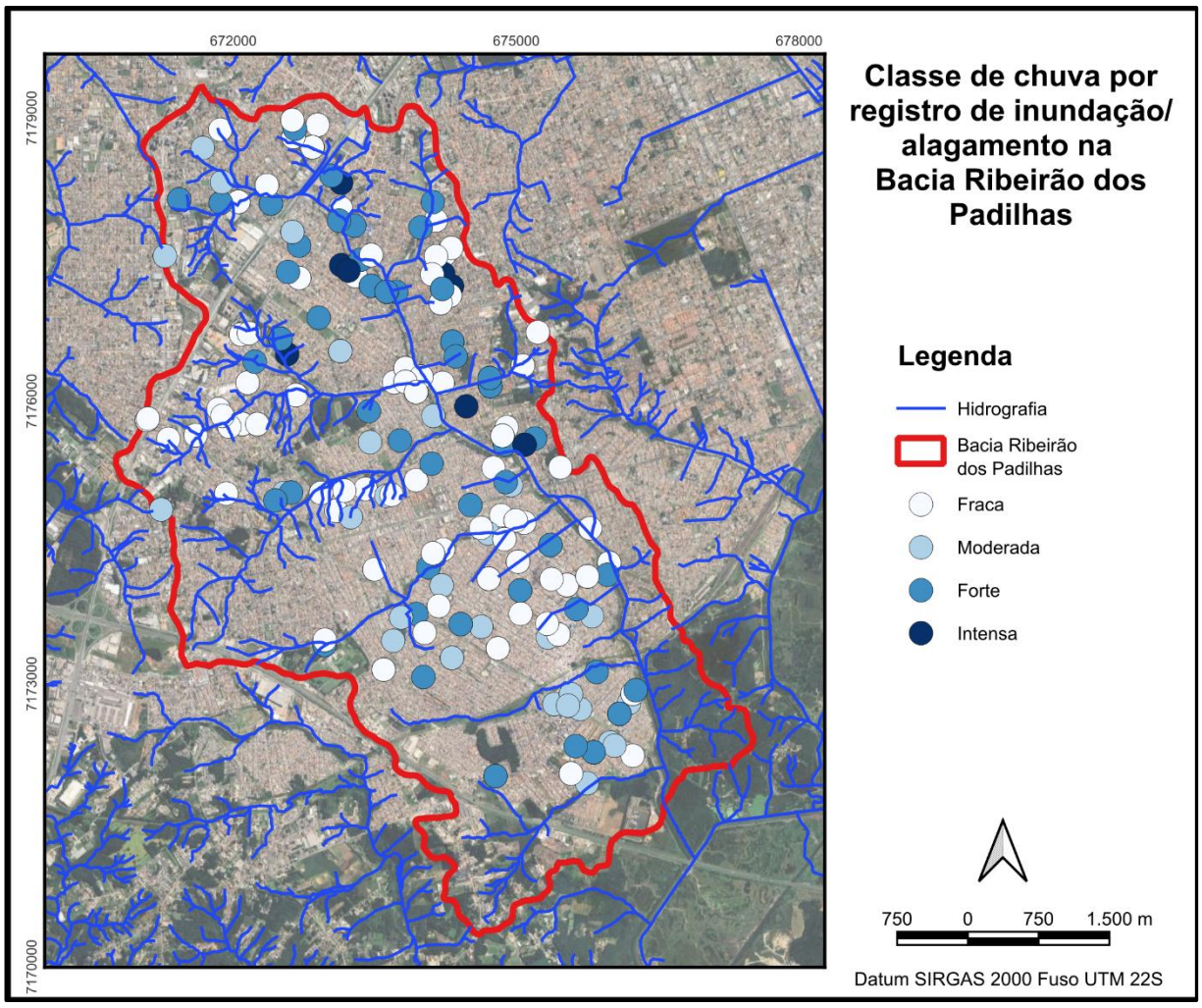
Figura 6 – Relação de registros de inundação/ alagamento por classe de chuva diária (mm)



Fonte: Os autores, 2026.

Além dos aspectos mencionados, a classificação dos eventos segundo a classe de precipitação, reforça a hipótese de que fatores estruturais e urbanísticos exercem influência importante na geração de eventos de alagamento. O número de episódios com chuva forte e extrema totalizaram 92 registros, ou seja, 35,6% das ocorrências no período, e indicam a possibilidade de saturação do sistema de drenagem e a presença de áreas urbanas mais vulneráveis dentro da bacia. A espacialização desses eventos por classe de chuva pode ser visualizada na figura 7.

Figura 7 – Classe de chuva por registro de inundação/alagamento na bacia hidrográfica Ribeirão dos Padilhas



Fonte: Os autores, 2026.

Os dados apresentados indicam que as ocorrências de inundação e alagamento estão associadas ao processo de urbanização e às características da drenagem urbana. Segundo Tucci (2012), à medida que a população impermeabiliza o solo e acelera o escoamento da água da chuva por meio de condutos e canais, a quantidade de água que chega simultaneamente no sistema de drenagem aumenta. Isso faz com que ocorrências de inundações sejam mais frequentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelo ravinamento natural (TUCCI, 2012).

3.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O maior número de registros de chuvas fracas e moderadas, associado ao baixo R² obtido na relação entre chuva e ocorrências (Figura 5), sugere um limiar hidrológico reduzido, característica típica de bacias densamente urbanizadas, nas quais precipitações fracas e moderadas podem produzir impactos quando há baixa infiltração e elevada concentração de escoamento superficial. Tal comportamento se relaciona com os estudos que apontam que a impermeabilização reduz infiltração, aumenta a velocidade do escoamento e antecipa picos de vazão, ampliando riscos mesmo sem precipitações extremas (MOROZ-CACCIA GOUVEIA; RODRIGUES, 2017; TUCCI, 2000).

Em relação ao dimensionamento do impacto da urbanização em bacias hidrográficas, Tucci (2000) destacou que cada habitante é responsável pela geração de aproximadamente 49 m² de área impermeável. A implantação de arruamentos pode aumentar o volume e o coeficiente de escoamento em até 260%. O incremento de apenas 13% de área impermeável nos lotes pode provocar um aumento de 115% no coeficiente de escoamento superficial. O autor ressalta que os valores são importantes para compreender a magnitude das transformações hidrogeomorfológicas provocadas pela urbanização, e permitem compreender que mudanças no padrão de ocupação podem gerar respostas hidrológicas desproporcionais

Além dos aspectos mencionados, a distribuição espacial e densidade de ocorrências indicam pontos críticos recorrentes, sugerindo que a ocorrência dos eventos de inundação/ alagamento dependem também da capacidade hidráulica efetiva do sistema, a qual é frequentemente reduzida por fatores como obstruções por sedimentos e resíduos sólidos, redução de seções e obras de drenagem inadequadas (TUCCI, 1997; TUCCI, 2012).

Tendo como base os resultados apresentados, é possível evidenciar que a bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas expressa um quadro em que o problema não é apenas meteorológico, mas também influenciado pela impermeabilização e estrutura de micro e macrodrenagem urbanas, bem como do seu estado operacional.

As áreas com maior densidade de ocorrências identificados pela estimativa de densidade de Kernel (Figura 4) e a espacialização por classes de chuva (Figura 7) são particularmente relevantes para o planejamento, pois permitem identificar áreas prioritárias que necessitam de intervenções combinadas de ações como: a recuperação/adequação de seções e travessias onde há gargalos; a redução do rápido escoamento superficial por meio do retardo e controle de conectividade; o controle de sedimentos e resíduos sólidos evitando obstruções e perda de capacidade; e a ampliação de áreas com função hidrológica efetiva (retenção/infiltração), evitando soluções que apenas transfiram o pico a jusante (TUCCI, 1997; TUCCI, 2000; TUCCI, 2012).

Nesse sentido, as evidências do período 2009–2022 demonstram que a mitigação de alagamentos/inundações na bacia requer uma abordagem integrada de medidas estruturais e não estruturais de planejamento e gestão, tendo a bacia como unidade efetiva (TUCCI, 2012). Com isso, se faz importante uma análise integrada das obras de macrodrenagem e as estratégias de mitigação implementadas no Ribeirão dos Padilhas.

3.3 RESULTADOS OBRAS DE DRENAGEM URBANA E MITIGAÇÃO DE ENCHENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DOS PADILHAS

A urbanização costuma ser celebrada como sinônimo de progresso. No entanto, quando a cidade é observada pelo caminho da água, ela se revela também como um processo de fricção contínua entre infraestrutura, uso do solo e dinâmica natural. Na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas esse atrito se torna particularmente visível. À medida que o território se adensa e se impermeabiliza, o sistema perde tempo de resposta, o escoamento superficial ganha velocidade e o curso d’água passa a transportar (além do volume hídrico) os efeitos acumulados da produção do espaço urbano. Nesse quadro, inundações e alagamentos deixam de ser apenas ocorrências episódicas e funcionam como um indicador crítico que expõe a sobrecarga do sistema de drenagem, a redução da capacidade hidráulica do leito e a vulnerabilização de margens e taludes, sobretudo onde a ocupação de fundo de vale se consolidou historicamente.

Figura 8 – Exemplos de trechos da bacia do Ribeirão dos Padilhas com edificações sobre canalização (A); ocupações das margens e intervenções (B); ocupação de fundo de vale (c); e evidências de assoreamento/obstrução (D).



Fonte: Os autores, 2025.

As respostas do poder público, variáveis no tempo e na escala, sugerem o reconhecimento da bacia como área sensível. Há registro, já no início dos anos 2000, de um conjunto de ações aprovadas para a bacia hidrográfica do “Rio Padilha”, contemplando drenagem e dragagem, limpeza de córregos, manutenção de pontes e passarelas, galerias pluviais marginais e menção a sistema alternativo de coleta e tratamento de esgoto sanitário, compondo um repertório heterogêneo, mas revelador de que o problema hídrico não se restringe ao canal, articulando-se com saneamento, travessias e infraestrutura urbana do entorno (CÂMARA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2004).

A temática do controle de cheias aparece inserida em programas e investimentos mais amplos voltados a obras de drenagem e prevenção de riscos, com referência à bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas no conjunto das intervenções planejadas para a cidade (BEM PARANÁ, 2014). Ainda assim, é a partir de 2020 que se documenta com maior nitidez um pacote de obras com desenho de macrodrenagem, explicitamente orientado a reduzir cheias e alagamentos por aumento de capacidade de vazão e por amortecimento hidráulico.

Nesse momento, o Ribeirão dos Padilhas passa a receber intervenções descritas como perfilamento, desassoreamento, realinhamento de taludes, recuperação de estruturas de micro e macrodrenagem e recomposição de mata ciliar ao longo de mais de seis quilômetros, combinadas à implantação de bacias de detenção em pontos estratégicos da bacia e de seus afluentes (CURITIBA, 2020).

A racionalidade técnica que sustenta essas intervenções é a das estratégias clássicas de controle de cheias: ampliar a seção de escoamento e criar dispositivos capazes de reter parte do volume nos momentos de pico. Nesse arranjo, as bacias de detenção operam como “infraestruturas de tempo”, não eliminando a água, mas reordenam o ritmo do escoamento, retendo volumes e liberando-os gradualmente para reduzir transbordamentos durante precipitações mais intensas (CURITIBA, 2020).

O conjunto é apresentado no âmbito do programa Curitiba Contra Cheias e associado a financiamento voltado à infraestrutura e ao saneamento, com a finalidade declarada de ampliar a segurança de moradores próximos às margens do ribeirão (CURITIBA, 2020).

Em 2021, a Prefeitura registra a conclusão dessas intervenções com a entrega das quatro bacias de contenção implantadas na bacia, associadas ao Arroio Cercado, ao Córrego Jardim Esmeralda, ao Arroio Boa Vista e ao próprio ribeirão, e informa capacidade conjunta de acumulação de 31.600 m³ (CURITIBA, 2021).

No mesmo registro, a administração municipal ressalta que, além das bacias, houve intervenções de perfilhamento ao longo de mais de seis quilômetros e que o pacote de macrodrenagem incluiu desassoreamento, realinhamento de taludes, recuperação de estruturas de micro e macrodrenagem e ações relacionadas à mata ciliar, compondo um “sistema completo e mais seguro” de escoamento (CURITIBA,

2021). Também é mencionada a recomposição de áreas públicas afetadas pelas obras, sugerindo atenção ao pós-obra e ao uso social dos espaços onde as estruturas foram implantadas (CURITIBA, 2021).

O que dá sustentação a esse tipo de intervenção é menos o gesto de inaugurar e mais a capacidade de manter. Em 2025, a Prefeitura registra ações de limpeza e desassoreamento do Ribeirão dos Padilhas como estratégia preventiva contra enchentes e alagamentos, descrevendo trechos atendidos e reafirmando que a retirada de sedimentos, lixo e materiais orgânicos melhora a vazão e reduz riscos (CURITIBA, 2025a).

No balanço institucional do mesmo ano, essas manutenções aparecem como rotina necessária, com menção à bacia do Padilhas entre aquelas que receberam ações preventivas. No mesmo documento, registra-se intervenção de conservação em travessias, como a revitalização de passarela metálica no Ribeirão dos Padilhas (CURITIBA, 2025b).

Em termos técnicos, isso é decisivo, uma vez que a manutenção do leito e das estruturas associadas funciona como uma "segunda engenharia", menos visível e frequentemente subestimada, mas determinante para evitar a perda de capacidade por assoreamento e obstruções, sobretudo em períodos mais chuvosos. O caso do Ribeirão dos Padilhas, portanto, permite ler as obras não como solução isolada, mas como parte de uma negociação contínua entre cidade e água. A macrodrenagem de 2020–2021 e as manutenções registradas em 2025 apontam para uma trajetória que combina grandes intervenções estruturais e ações recorrentes de preservação da capacidade hidráulica (CURITIBA, 2020; CURITIBA, 2021; CURITIBA, 2025a; CURITIBA, 2025b). Ao mesmo tempo, o histórico de propostas anteriores, já em 2004, reforça que a problemática é antiga e que a resposta pública se distribui em camadas, com intensidades distintas conforme prioridades, recursos e pressão social (CÂMARA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2004).

Em última instância, a bacia evidencia que enchentes e alagamentos não são apenas “falhas” pontuais: expressam uma urbanização que, quando não toma a bacia como unidade efetiva de planejamento, tende a deslocar o problema no espaço e no tempo. Drenar é necessário, mas, em bacias urbanas densas, a eficácia da drenagem

depende de como a cidade decide conviver com sua água e, sobretudo, de quanto consegue sustentar, ao longo do tempo, aquilo que constrói.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com a pesquisa desenvolvida neste capítulo demonstram que as ocorrências de alagamentos/ inundações na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas não podem ser compreendidas somente a partir da análise da variabilidade climática ou intensidade das precipitações ocorridas.

O grande número de registros desses eventos no período analisado, relacionado à fraca correlação entre chuva diária e número de registros, indicam que a dinâmica hidrológica da bacia é resultado do processo de urbanização, que acarreta alta impermeabilização do solo e limitações estruturais do sistema de drenagem urbana.

A espacialização das ocorrências, juntamente com os registros históricos de intervenções, indicam a suscetibilidade da bacia a eventos de inundação/ alagamentos, tendo em vista que pequenas variações na precipitação podem gerar impactos significativos em razão de um limiar hidrológico reduzido.

Esse comportamento é característico de bacias densamente urbanizadas, nas quais a capacidade de infiltração foi substituída por infraestruturas que aceleram o escoamento superficial e concentram volumes de chuva em intervalos curtos de tempo.

Essa situação se torna ainda mais complexa quando se considera o cenário das mudanças climáticas, uma vez que existem evidências que estimam que as mudanças climáticas estão ocasionando além do aumento da frequência das precipitações, e da intensidade dos eventos extremos, maior irregularidade nos regimes de chuva.

Em bacias como a do Ribeirão dos Padilhas, que se caracteriza por ser densamente urbanizada e já fragilizada, tais mudanças tendem a atuar como fatores que ampliam a probabilidade de alagamentos e inundações mesmo em situações que, anteriormente, não resultariam em impacto significativo. Dessa forma, os registros

observados devem ser interpretados como manifestações recorrentes de um sistema urbano pouco resiliente frente a cenários climáticos mais instáveis.

Nesse sentido, as intervenções na drenagem implementadas nas últimas décadas demonstraram avanços importantes, pois ampliaram a capacidade hidráulica e promoveram a diminuição de picos de vazão. Fato este identificado pela diminuição de eventos, com a execução das obras de drenagem e manutenção.

Porém, os resultados deste estudo também indicam que essas obras, embora necessárias, precisam ser integradas a estratégias mais amplas de planejamento urbano, manutenção contínua e controle do uso e ocupação do solo. Uma vez que a concentração espacial de ocorrências em determinados setores da bacia evidencia que soluções pontuais tendem a deslocar espacialmente o problema, sem eliminá-lo.

Com base no exposto, é possível evidenciar que a resiliência urbana diante dos eventos hidrológicos, não necessita unicamente da implantação de bacias de contenção, e da ampliação de canais ou obras de drenagem pontuais, mas na capacidade de planejamento da cidade e de se reorganizar em relação com a água.

Isso implica em reconhecer a bacia hidrográfica como unidade efetiva de planejamento, preservar e recuperar áreas com função hidrológica, reduzir o escoamento superficial, garantir a manutenção sistemática das infraestruturas existentes e optar por soluções baseadas na natureza – (SBNs).

No contexto de mudanças climáticas, as cidades resilientes tendem a se destacar como aquelas capazes de responder positivamente a eventos extremos, e reduzir sua vulnerabilidade estrutural no decorrer do tempo.

Dessa forma, a análise da bacia hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas evidencia que o enfrentamento dos alagamentos/ inundações exige uma abordagem integrada, que articule planejamento urbano, gestão da drenagem, políticas ambientais e também adaptação climática.

REFERÊNCIAS

BEM PARANÁ. **Curitiba vai investir R$ 798 milhões em projetos para prevenir enchente**. Bem Paraná, 27 abr. 2014. Disponível em: <https://www.bemparana.com.br/noticias/parana/curitiba-vai-investir-r-798-milhoes-em-projetos-para-prevenir-enchente/>. Acesso em: 3 mar. 2026.

CÂMARA MUNICIPAL DE CURITIBA. **Obras melhoram Rio Padilha**. Curitiba: Câmara Municipal de Curitiba, 27 jan. 2004. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.leg.br/informacao/noticias/obras-melhoram-rio-padilha>. Acesso em: 3 mar. 2026.

CURITIBA (Prefeitura Municipal). **Ribeirão dos Padilhas ficará mais seguro contra cheias**. Curitiba: Prefeitura Municipal de Curitiba, 2 jul. 2020. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/ribeirao-dos-padilhas-ficara-mais-seguro-contra-cheias/56513>. Acesso em: 3 mar. 2026.

CURITIBA (Prefeitura Municipal). **Obras de macrodrenagem no Ribeirão dos Padilhas estão prontas**. Curitiba: Prefeitura Municipal de Curitiba, 16 abr. 2021. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/obras-de-macrodrenagem-no-ribeirao-dos-padilhas-estao-prontas/58640>. Acesso em: 3 mar. 2026.

CURITIBA (Prefeitura Municipal). **Prefeitura de Curitiba limpa 20 km de rios para evitar enchentes e proteger bairros**. Curitiba: Prefeitura Municipal de Curitiba, 10 abr. **2025a**. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/prefeitura-de-curitiba-limpa-20-km-de-rios-para-evitar-enchentes-e-proteger-bairros/76872>. Acesso em: 3 mar. 2026.

CURITIBA (Prefeitura Municipal). **Macrodrenagem, limpeza de rios e manutenções ajudam a reduzir impactos das tempestades**. Curitiba: Prefeitura Municipal de Curitiba, 23 dez. **2025b**. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/macrodrenagem-limpeza-de-rios-e-manutencoes-ajudam-a-reduzir-impactos-das-tempestades/81054>. Acesso em: 3 mar. 2026.

CARMO, Luiz Felipe Rodrigues do; VASCONCELLOS, Fernanda Cerqueira; MENEZES, Wallace Figueiredo; VASCONCELLOS, Eduardo Charles. **Analysis of instability indexes for intense, moderate and low/no rain in southern and southeastern regions of Brazil**. *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p. 769–782, 2019. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_1_769_782.

COUTO, Jhenifer Priscila Borges do; NUCCI, João Carlos; LIBERTI, Eduardo. Hemerobia como indicador de qualidade ambiental na Bacia do Ribeirão dos Padilhas, Curitiba – Paraná – Brasil. Acta Geográfica, Boa Vista, v. 16, n. 41, p. 189–210, maio/ago. 2022. DOI: https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v16i41.6639.

FERREIRA, S. L. da S. Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Ribeirão dos Padilhas: O Processo de Ocupação do Loteamento Bairro novo, Sítio Cercado – Curitiba – PR. 2005. 133p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. Acesso em: 31 ago. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC). Dados Geográficos. Disponível em: https://ippuc.org.br/geodownloads/geo.htm. Acesso em: 15 jan. 2026.

MOROZ-CACCIA GOUVEIA, I. C.; RODRIGUES, C. Mudanças morfológicas e efeitos hidrodinâmicos do processo de urbanização na bacia hidrográfica do rio Tamanduateí – RMSP. GEOUSP: Espaço e Tempo (Online), [s. l.], v. 21, n. 1, p. 257, 2017.

NUCCI, J. C. Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília (MSP). Edição do Autor, 142p, 2008.

PAZ, O. L. S.; DAL PAI, M. O.; PAULA, E. V. Proposta metodológica para elaboração de base de dados geoespaciais como subsídio a estudos ambientais: aplicação em unidades de conservação do litoral norte do Paraná. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 613–629, 2020.

PAZ, Otacílio Lopes de Souza da; ESTEVAM, Franciele Marilies; ROCHA, Vera Cristina Scheller dos Santos; SILVA, Renata Adriana Garbossa. NDVI como indicador da impermeabilização do solo urbano: estudo preliminar na bacia do Ribeirão dos Padilhas (Curitiba/PR). In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2023, Gramado, RS. **Anais** [...]. Gramado, RS: CONFEA, 2023.

SILVA, Maria Aparecida da. Dinâmica geomorfológica em áreas urbanas de Curitiba–PR. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/2870. Acesso em: 13 mar. 2026.

TUCCI, C. E. M. "Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas." RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 5, n. 1 (2000), p. 6168 (2000).

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Drenagem urbana e controle de erosão. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. L. M. (Org.). Avaliação e controle de drenagem urbana. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2000. p. 113-127. v. 1.

TUCCI, C. E. M. Gestão da drenagem urbana. Distrito Federal: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012. Disponível em: https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/38004/LCBRSR274_pt.pdf. Acesso em: 23 fev. 2026.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. REGA: Revista de Gestão de Água da América Latina, Santiago, v. 1, n. 1, p. 59-73, jan./jun. 2004. DOI: https://doi.org/10.21168/rega.v1n1.p59-73.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 5–12, jul./dez. 1997

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. 1983. Guide to Climatological Practices, Second edition, WMO-182.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Severe Weather Information Centre (SWIC): severe weather observations**. Geneva: WMO, 2026. Disponível em: <https://severeweather.wmo.int/observation.html>. Acesso em: 02 mar. 2026.

O IMPACTO DAS SECAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO PARANÁ

Lucas Tamanini Camargo – UFPR[1]
Guilherme Gonzatto – UFPR[2]
Wilson Flavio Feltrim Roseghini – PPGEO/UFPR[3]

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas podem ser definidas e compreendidas de diversas maneiras, a depender de quem as conceitua. De modo geral, consistem em alterações de longo prazo nos padrões climáticos, modificando variáveis como temperatura, precipitação, velocidade e direção dos ventos, além da irradiação recebida na superfície terrestre. Podem ser causadas tanto por fatores naturais quanto por ações antrópicas, que persistem na atmosfera por meio da emissão de gases e do uso da terra (IPCC, 2021). Tais mudanças expressam alterações significativas no balanço geofísico terrestre, capazes de desencadear eventos de grandes proporções, sobretudo fenômenos climáticos como secas, inundações, ciclones tropicais e o aumento do nível do mar, que impactam direta ou indiretamente milhares de pessoas.

Atreladas a esses processos, nos últimos anos, diversas iniciativas intergovernamentais propuseram discussões e estratégias de mitigação desses eventos extremos na sociedade, especialmente no que se refere aos seus impactos em setores básicos, como alimentação, abastecimento hídrico e energia. Pode-se citar, por exemplo, a Agenda 2030, plano de ação global instituído pela Organização das Nações Unidas (ONU), que fornece objetivos de desenvolvimento sustentável

[1] Graduando em Geografia – lucastcamargo@gmail.com
[2] Doutorando em Geografia – gui.gonzatto16@gmail.com
[3] Doutor em Geografia – feltrim@ufpr.br

(ODS) para manter, preservar e garantir o equilíbrio da natureza em diferentes escalas. Dentre os objetivos estipulados, destacam-se a “Ação Contra a Mudança Global do Clima” (ODS 13), que busca promover medidas urgentes para enfrentar os processos de alteração climática e seus impactos sobre a superfície terrestre, e a “Energia Limpa e Acessível” (ODS 7), cujo propósito é assegurar o acesso universal a fontes de energia confiáveis, sustentáveis e economicamente viáveis (PEREIRA, 2009).

Esses objetivos evidenciam a complexidade que as mudanças climáticas impõem à dinâmica da produção energética, sobretudo em países cuja geração elétrica depende majoritariamente de recursos naturais sensíveis às variações atmosféricas, como o Brasil. Alterações no regime pluviométrico, elevação das temperaturas e intensificação de fenômenos extremos afetam diretamente a capacidade de produção, seja pela redução do nível dos reservatórios hidrelétricos, pela instabilidade dos ventos ou pela variação da radiação solar disponível. Esse cenário reforça a urgência de integrar políticas climáticas e energéticas, uma vez que a vulnerabilidade crescente dos sistemas de produção demanda não apenas mitigação das emissões, mas também adaptação estrutural e tecnológica.

Segundo o Ministério da Ciência, em 2022 o setor de energia foi responsável por aproximadamente 20,52% das emissões de GEE, sendo o terceiro setor que mais contribuiu no processo, atrás dos setores de uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas, e agropecuária. O setor de energia, entretanto, divide-se em dois grupos principais: o setor energético e o setor elétrico. O setor energético representa as indústrias que transformam energia primária em energia secundária; por exemplo, a transformação do petróleo nas refinarias. O setor elétrico está relacionado à produção de energia elétrica e às suas etapas subsequentes: transmissão e distribuição.

Em relação ao setor energético, de acordo com o Balanço Energético de 2024, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética brasileira é composta por 49,1% de fontes renováveis (como biomassa da cana e hidráulica) e 50,9% de fontes não renováveis (como petróleo e derivados, gás natural e carvão mineral), principais emissores de GEE do setor. Apesar de a matriz ser, em sua maioria, não renovável, o Brasil ainda apresenta números melhores que o restante do

mundo, onde aproximadamente 85,7% das fontes de energia são não renováveis (EPE, 2025).

Ainda de acordo com o Balanço Energético de 2024, a matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável que a matriz energética, com aproximadamente 86,1% composta por fontes renováveis, puxada principalmente pelas hidrelétricas, que respondem por quase 60% da geração de energia no país. Outras fontes renováveis, como a eólica e a solar, também se destacam, sendo responsáveis por aproximadamente 20% da energia gerada. Para efeitos de comparação, em 2022, 70,5% da energia elétrica mundial era proveniente de fontes não renováveis e combustíveis fósseis, como carvão e gás natural, utilizados em termoelétricas.

Entre os estados que mais se destacam na geração de energia renovável, o Paraná desponta entre os principais, tendo 98% da sua matriz energética concentrada nessas fontes (ABRHIDRO, 2025), sobretudo em Usinas Hidrelétricas. Entretanto, essa configuração da matriz energética paranaense revela uma relação problemática entre o clima e a geração de energia, especialmente em períodos de evento extremos negativos. Entre os fenômenos climáticos de extremidade, a seca se destaca por evoluir de maneira gradual, prolongando-se por longos períodos e apresentando baixa previsibilidade, diferentemente de outros riscos atmosféricos que possuem início e fim mais definidos. Além disso, por se manifestar em múltiplas escalas, temporal, espacial e hidrológica, não há, na comunidade científica, um consenso absoluto sobre uma única definição que abarque todas as suas formas de ocorrência, tornando-a um desafio para análise (MISHRA e SINGH, 2010; HAILE *et al.*, 2019).

Eventos como o apagão de 2001 e a seca de 2020-2022 (FERNANDES *et al.*, 2021; GONZATTO, 2025), que resultou no abaixamento dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas e na diminuição da geração de energia, evidenciaram a vulnerabilidade dos sistemas elétricos, que, ao interromperem seu fornecimento, ocasionaram perdas econômicas e impactos sociais, colocando em risco a segurança das populações e revelando a desigualdade social existente na região. Nessa perspectiva, o presente trabalho tem por objetivo analisar como os eventos de seca impactam a produção de energia hidrelétrica no estado do Paraná, a fim de compreender seus efeitos sobre a segurança energética regional e subsidiar a

formulação de estratégias de mitigação e de transição energética que reduzam a vulnerabilidade do sistema elétrico diante das mudanças climáticas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A diversificação da matriz energética, com o intuito de viabilizar a transição energética, é tratada por autores como Silveira (2018), que ressalta que o setor de energia é responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Isso evidencia a necessidade de fomentar o desenvolvimento de energias limpas, acompanhado de planos de eficiência energética, com o objetivo de diversificar a matriz energética brasileira, reduzir a dependência das hidrelétricas e aumentar a segurança energética do país.

Com relação aos impactos causados pelas mudanças climáticas na produção de energia através de fontes renováveis, alguns trabalhos se destacam. Gutierrez (2024) fornece uma abordagem teórica sobre o tema e aponta que os efeitos das mudanças climáticas já são visíveis e os eventos climáticos extremos decorrentes ameaçam o suprimento de energia. Como exemplo, a pesquisadora cita a crise energética de 2001, popularmente conhecido como apagão de 2001, a escassez hídrica de 2021, que culminou no abaixamento do nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, e as enchentes ocorridas no Rio Grande do Sul, em 2024, que alagaram subestações, desligaram linhas de transmissão e romperam uma barragem hidrelétrica, deixando milhares sem acesso à energia elétrica.

É comentado ainda sobre outros trabalhos que destacam que as mudanças nos ciclos hidrológicos afetarão diretamente a geração de energia hidrelétrica (IEA, 2021 *apud* GUTIERREZ, 2024), e que modificações nos padrões dos ventos alterarão o potencial da energia eólica (SHUKLA e SKEA, 2022 *apud* GUTIERREZ, 2024). Assim, a autora diz que a diversidade da matriz elétrica é um fator que aumenta a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico, uma vez que promove a complementaridade natural da oferta de energia entre as diversas fontes (GUTIERREZ, 2024, p.114). Em seu trabalho ainda é destacado o Plano Decenal de Expansão de Energia: 2032, que prevê uma diminuição da dependência da energia hidráulica na matriz elétrica brasileira, com aumento significativo da energia solar e

conclui afirmando a necessidade de aprimoramentos no planejamento energético brasileiro através de políticas públicas para alcançar a construção de sistemas elétricos preparados para eventos extremos.

Sobre os impactos das mudanças climáticas na hidreletricidade, são mostrados em (EPE, 2024) eventos recentes (a partir de 2012) que indicam possíveis impactos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica. Ao todo, foram elencados 7 eventos, sendo 5 relacionados a secas, e o consequente abaixamento do nível dos reservatórios, e 2 relacionados a chuvas intensas e/ou acima da média, resultando na interrupção da geração de energia. A partir de dados do IPCC de 2021, o documento mostra que o Subsistema Sul, classificação do Sistema Interligado Nacional realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no qual se encontra o Estado do Paraná, apresenta uma tendência de aumento de vazão média, o que pode trazer benefícios para o aumento da geração através da construção de novos empreendimentos e/ou modernização dos já existentes (EPE, 2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

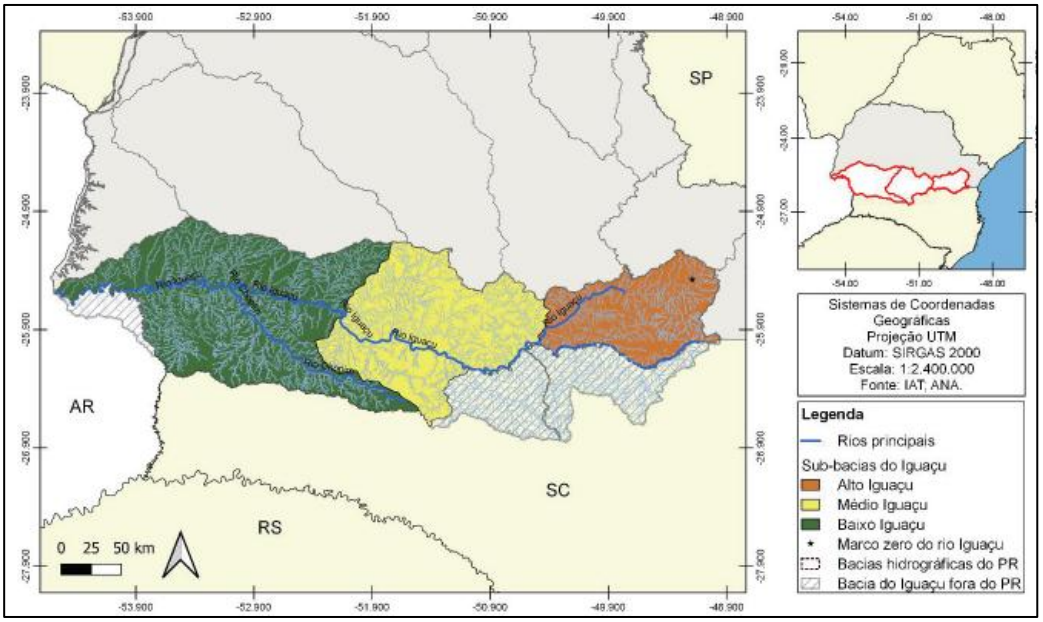
3.1 ÁREA DE ESTUDO

Localizada entre as coordenadas geográficas médias de 25°05’S a 26°45’S e longitudes 48°57’W a 54°50’W, a Bacia do Rio Iguaçu se estende por uma ampla faixa territorial do Sul do Brasil, alcançando também parte da Argentina. Com cerca de 70 mil km², a maior parte dessa área encontra-se no Paraná, onde o rio percorre dezenas de municípios desde suas nascentes na Serra do Mar até desaguar no rio Paraná, no extremo oeste. O curso do Iguaçu é formado inicialmente pela junção dos rios Atuba e Iraí e recebe diversos afluentes importantes ao longo do trajeto, o que contribui para sua expressiva rede de drenagem (ROCHA 2022). Esse conjunto hidrográfico desempenha papel fundamental na organização territorial, no abastecimento e especialmente na produção de energia do Estado.

Além de sua dimensão física, a bacia apresenta grande diversidade ambiental, influenciada por diferenças de relevo e pela distribuição climática regional. O trecho leste está associado ao clima oceânico, caracterizado por verões amenos e

úmidos, enquanto áreas mais a oeste sofrem a influência de um clima subtropical com temperaturas mais elevadas e maior umidade, favorecidas pela menor altitude e pela distância do litoral, conforme a classificação de Köppen (ITCG, 2008). Essa combinação de fatores contribui para a ocorrência de chuvas frequentes e, em alguns pontos, bastante concentradas. O relevo acidentado e o desnível natural do rio criaram condições propícias para a instalação de importantes usinas hidrelétricas, consolidando o Iguaçu como um dos principais eixos de geração elétrica no Paraná (MINE *et al.*, 2002).

Figura 1 – Localização da Bacia do Rio Iguaçu (PR)



Fonte: Rocha (2022).

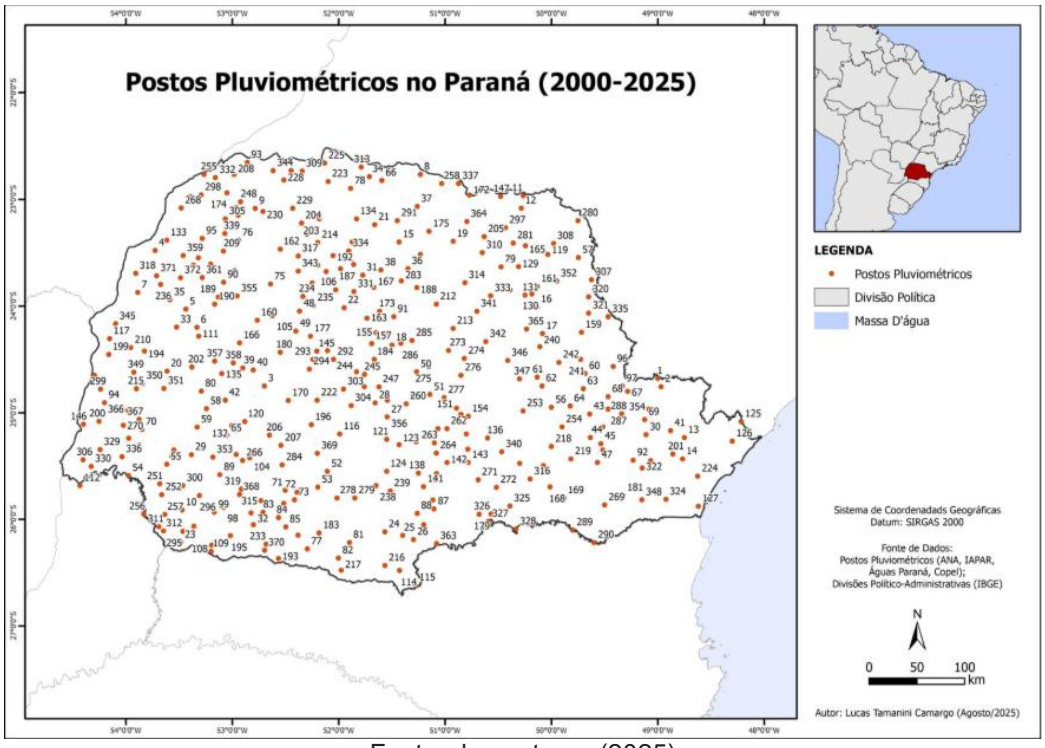
3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

A primeira parte da metodologia foi baseada no trabalho realizado por (GONZATTO, 2025), no qual foram coletados dados mensais de precipitação de 372 postos pluviométricos espalhados pelo Paraná, no período de 1977 a 2022. Os dados estavam disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas do Instituto Água e Terra (IAT), que armazena dados diários, mensais e anuais de chuva em todo o território paranaense, obtidos através de estações pluviométricas sob responsabilidade de diversos órgãos e instituições federais e estaduais como a

Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Água e Terra (IAT) e Companhia Paranaense de Energia (Copel).

Utilizando a mesma metodologia, o banco de dados criado pelo autor foi alimentado com dados até o mês de março de 2025. Para os meses sem dados foi utilizado o método de interpolação dos 3 vizinhos mais próximos, em que se considera a média aritmética dos 3 postos adjacentes mais próximos. Os dados coletados foram armazenados em uma planilha do software *Excel.* A Figura 2 mostra os 372 postos pluviométricos espalhados pelo Paraná utilizados neste estudo.

Figura 2 – Postos Pluviométricos ativos no Paraná



Fonte: dos autores (2025)

3.3 CÁLCULO DO ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO PADRONIZADA (SPI)

Para a identificação, quantificação e qualificação dos índices pluviométricos no Estado do Paraná a curto, médio e longo prazo (SPI1, SPI3, SPI6 e SPI12), utilizou-se o software *RStudio* para aplicar o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) em toda a série histórica. Primeiramente, calculou-se o SPI para cada posto pluviométrico, em seguida calculou-se a média do SPI, considerando todos os 372 postos

pluviométricos. Para armazenar os valores obtidos e relacioná-los com os índices de precipitação também foi utilizado o software *Excel*. A fim de quantificar e qualificar os períodos de seca ocorridos no Estado, a partir dos dados obtidos nas etapas anteriores, utilizou-se como referência a Tabela 1, retirada de (ANA, 2025).

Tabela 1 – Classificação da intensidade das secas

Categoria	Descrição	Percentil	SPI/SPEI	Recorrência	Impactos Possíveis
S0	Seca Fraca	30 %til	-0,5 a -0,79	Uma vez a cada 2-5 anos	Entrando em seca: veranico de curto prazo diminuindo plantio, crescimento de culturas ou pastagem. Saindo de seca: alguns déficits hídricos prolongados, pastagens ou culturas não completamente recuperadas.
S1	Seca Moderada	20 %til	-0,8 a -1,29	Uma vez a cada 5-10 anos	Alguns danos às culturas, pastagens; córregos, reservatórios ou poços com níveis baixos, algumas faltas de água em desenvolvimento ou iminentes; restrições voluntárias de uso de água solicitadas.
S2	Seca Grave	10 %til	-1,3 a -1,59	Uma vez a cada 10-20 anos	Perdas de cultura ou pastagens prováveis; escassez de água comuns; restrições de água impostas.
S3	Seca Extrema	5 %til	-1,6 a -1,99	Uma vez a cada 20-50 anos	Grandes perdas de culturas / pastagem; escassez de água generalizada ou restrições.
S4	Seca Excepcional	2 %til	<-2	Uma vez a cada 50-100 anos	Perdas de cultura / pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência.

Fonte: Monitor de secas (2025)

3.4 OBTENÇÃO DOS DADOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

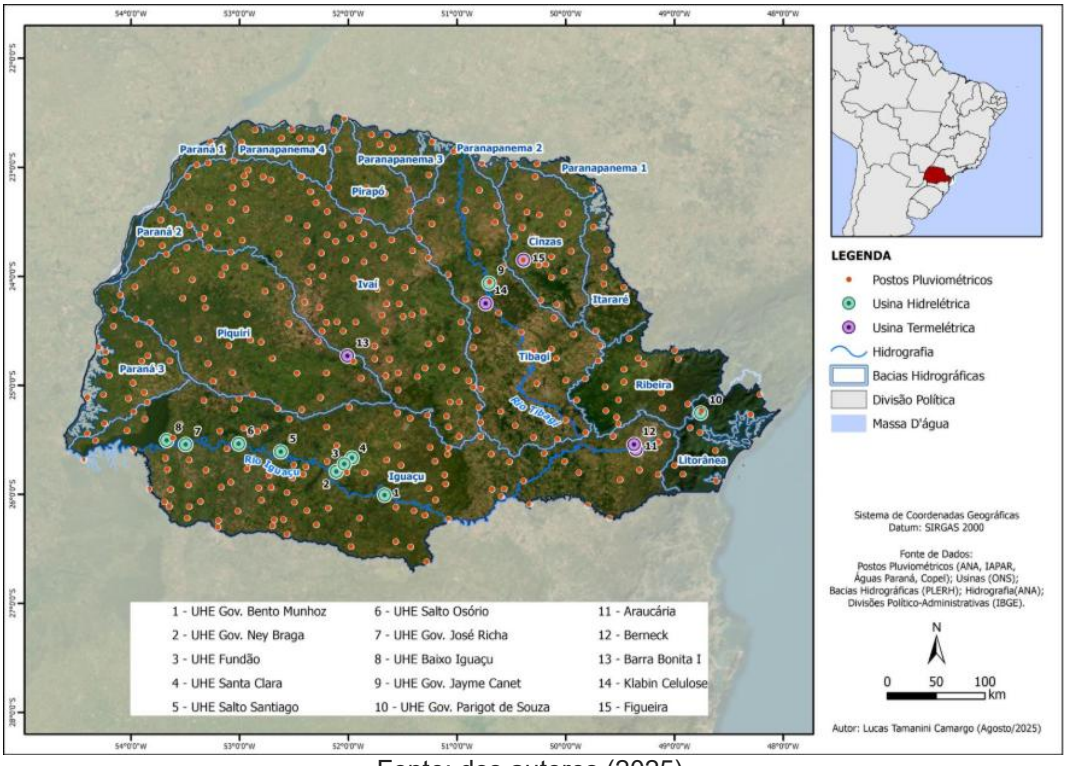
Os dados de produção de energia do Estado do Paraná foram obtidos através do Portal de Dados Abertos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que conta com dados de geração horária a partir de 01/01/2000. Os dados de geração são fornecidos em Megawatt médio [MWmed], que é a potência média de uma usina ao longo de um determinado intervalo de tempo, nesse caso, ao longo de uma hora. Como a energia é a potência multiplicada pelo tempo, para calcular a energia mensal gerada seria necessário multiplicar a potência horária pelo número de horas do mês em questão, porém, como os dados de potência são fornecidas de forma horária, somou-se os valores horários de cada mês para encontrar a energia gerada no mês.

Os dados do Paraná são divididos em 4 categorias: energia hidroelétrica, energia térmica, energia eolielétrica e energia fotovoltaica, com os dados de energia hidroelétrica e térmica sendo mostrados por unidades geradoras. As principais unidades geradoras de energia hidroelétrica no Paraná são 10 Usinas Hidrelétricas

(UHEs) (8 localizadas na Bacia do Rio Hidrográfica do Iguaçu, 1 na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi e 1 na Bacia Hidrográfica Litorânea), além das Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs), sem informação de localização disponível, estando distribuídas por todo o território do estado. As Usinas Termoelétricas principais são 5, sendo a principal a Usina Elétrica a Gás de Araucária, localizada no município de Araucária.

É importante ressaltar que a fim de mensurar o impacto do clima do Estado do Paraná na produção de energia, foram consideradas apenas UHEs localizadas em bacias hidrográficas que estejam totalmente inseridas nos limites do estado, por conta disso, não foram consideradas as UHEs localizadas no Rio Paranapanema, no norte do Estado, pois possui grande parte de sua extensão no Estado de São Paulo, e também a UHE de Itaipu, localizada no Rio Paraná, no oeste do estado, cuja bacia hidrográfica engloba os estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás, além do território do Paraguai. Apesar da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu abarcar uma pequena porção do Estado de Santa Catarina e da Argentina, a mesma foi considerada no estudo, por aproximadamente 80% de sua extensão estar dentro do território paranaense. A Figura 3 mostra a localização das principais fontes geradoras de energia do estado.

Figura 3 – Localização das principais fontes geradoras de energia no Paraná



Fonte: dos autores (2025).

3.5 COMPARAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

Para a comparação dos dados obtidos de precipitação, SPI calculado e energia produzida foram feitos gráficos utilizando o software *Excel* para que fosse possível de maneira visual compreender os efeitos das chuvas na produção de energia elétrica a partir de UHEs e como essa variação influencia a produção de energia térmica. Foram considerados dados calculados e obtidos apenas após o ano 2000, pois essa é a data de início da divulgação dos dados de produção de energia.

3.6 MÉTODO GEOESTATÍSTICO E PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão dos dados de precipitação obtidos foi utilizado o método de interpolação geoestatística de *Krigagem*, através do *software através do software Surfer 20.4.3, da Golden Software Inc.*, que permite espacializar o fenômeno na superfície terrestre. O método se baseia na estipulação de valores de uma variável em locais sem amostragem com base em valores medidos em pontos mais próximos com dados, fazendo com que sejam estabelecidas médias aproximadas em relação aos dados observados. A exemplo, tem-se na Figura 03 a média pluviométrica anual entre os anos de 2000 e 2024, obtida através dos 372 postos pluviométricos e espacializada a partir da técnica de krigagem.

Além disso, com intuito de evidenciar a correlação entre as variáveis de precipitação pluvial e energia foi utilizado a correlação de *Spearman*, onde consiste em medir a força e a direção da associação entre duas variáveis de forma não paramétrica, através da fórmula:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)}$$

em que ρ é o valor do coeficiente de *Spearman*; di refere-se ao desvio entre os postos atribuídos às variáveis; e n representa a quantidade total de pares comparados (TERASSI *et al.*, 2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao se comparar os dados de produção de energia no período de 2000 a 2025, observa-se a relevância da energia hidrelétrica na matriz energética do Paraná, correspondendo a aproximadamente 95,5% da energia gerada no período, seguido pela energia termoelétrica, com aproximadamente, 4,5% da energia gerada, e pelas energias solar e eólica, que juntas somam menos de 1% do total gerado no período. Cabe destacar que os dados de energia fotovoltaica, incluídos nos relatórios da ONS a partir de abril de 2023, expõem um alcance elétrica de 7,9% da energia total produzida no Estado, contra 92% da energia hidrelétrica e 0,1% da energia térmica. A Tabela 02 a seguir sintetiza essas informações.

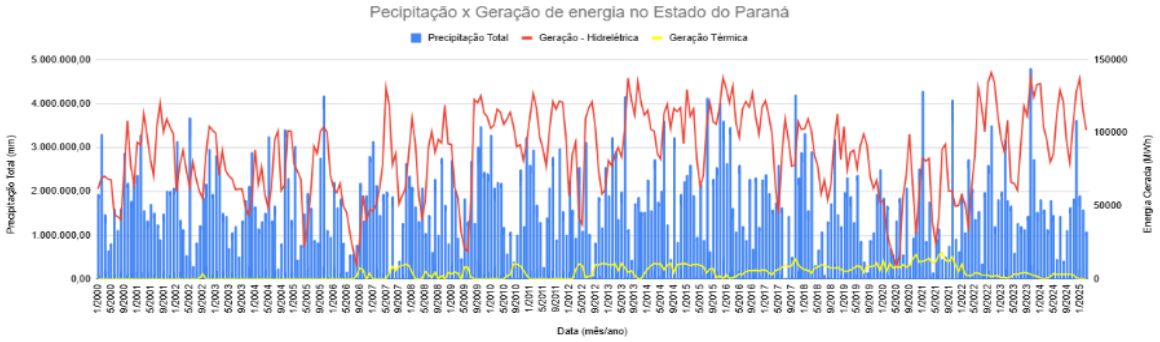
Tabela 2 – Energia elétrica gerada no Paraná no período 2000-2025

Tipo de Energia	Geração (MWh)	%
Hidrelétrica	863.851.759,54	94,66
Térmica	41.442.093,05	4,54
Solar	7.240.728,99	0,79
Eólica	1.392,34	0,00
Total	**912.535.973,94**	**100**

Fonte: ONS (2025). Elaboração: dos autores (2025)

Ao se analisar os dados de geração de energia hidrelétrica, nota-se sua dinâmica e variabilidade, alternando momentos de alta geração com momentos de baixa geração. Quando se compara os dados da geração hidrelétrica mensal com os dados de precipitação pluvial mensal (Figura 5), observa-se uma certa correlação entre as variáveis, ora em menor grau, ora em maior grau, ou seja, quando há um maior nível de chuva, há maior geração de energia e vice-versa. A Figura 5 a seguir ilustra a comparação entre precipitação pluvial e geração de energia hidrelétrica e térmica.

Figura 5 – Comparação entre precipitação e geração de energia no período 2000-2025



Fonte: dos autores (2025)

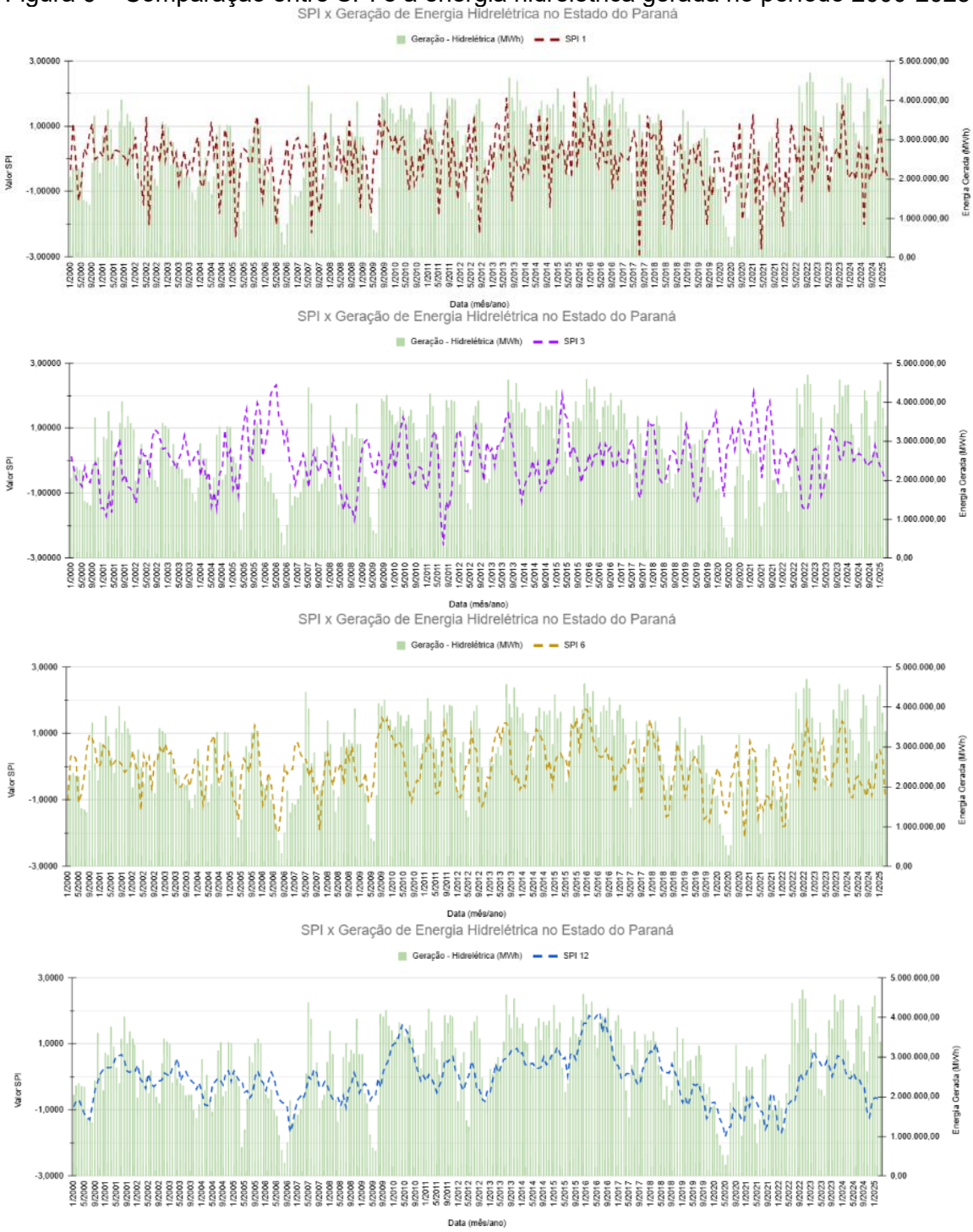
Os menores valores de geração de energia hidrelétrica da série histórica ocorreram em maio de 2020 (menor valor), outubro de 2006 (2º menor valor) e abril de 2020 (3º menor valor). Os anos de 2006 e 2020 foram anos marcados por fortes secas e baixos índices pluviométricos (Figura 9), resultando também na diminuição dos fluxos hídricos e por consequência, na geração de energia hidrelétrica. Cabe ressaltar que em 2006 as UHEs Governador Jayme Canet e Baixo Iguaçu, inauguradas em 2012 e 2019, respectivamente, ainda não estavam em funcionamento, o que pode ter contribuído com o baixo valor de geração.

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (2025), os reservatórios das UHEs Salto Osório, Baixo Iguaçu e Governador José Richa possuem reservatório do tipo fio d'água, ou seja, não acumulam grandes quantidades de água em seus reservatórios, ao passo que as UHEs Salto Santiago, Governador Bento Munhoz e Governador Ney Braga possuem reservatório de acumulação, que tem capacidade de armazenar grandes volumes pluviais, auxiliando na gestão hídrica das bacias hidrográficas. Essa conjuntura também pode ter tido alguma influência na vazão dos cursos hídricos, afetando a geração de energia.

Ao se comparar o valor da geração da energia hidrelétrica com os SPI 1, 3, 6 e 12 (obtidos através da média dos 372 postos pluviométricos), evidencia-se que todos atingiram desvios menores que -1,6, indicando períodos de seca extrema e seca excepcional, de acordo com o Monitor de Secas (ANA, 2025). Visualmente, as curvas dos índices SPI6 e SPI12 são as que mais se adaptam às curvas de geração de energia, mostrando que baixos valores de geração estão associados a baixos valores de SPI. Para o SPI12, o menor valor calculado foi -1,81, em maio de 2020, e o terceiro menor valor foi -1,68, em outubro de 2006, ao mesmo tempo que para o SPI6, o menor

valor calculado foi –2,13, em novembro de 2020 e o segundo menor foi –1,96, em junho de 2006. Os índices calculados destacam uma correlação entre os períodos de seca com o baixo valor de energia gerada. A Figura 6 ilustra a relação dos SPIs com a geração de energia na série histórica.

Figura 6 – Comparação entre SPI e a energia hidrelétrica gerada no período 2000-2025



Fonte: dos autores (2025)

Com relação à produção de energia térmica, é possível observar uma relação inversa com a produção de energia hidrelétrica, ocorrendo aumento na geração de energia térmica quando há momentos de baixa geração de energia hidrelétrica. Essa configuração pode acontecer na tentativa de suprir a demanda de energia, compensando a baixa geração da energia hidrelétrica.

Apesar de a energia hidrelétrica responder por aproximadamente 95% da matriz energética, como dito anteriormente, houve momentos durante a série histórica em que os percentuais se aproximaram, em 2006, 2020 e 2021 (justamente os períodos de baixa precipitação e baixa geração hidrelétrica), indicados na Figura 6, com redução de geração de energia de aproximadamente 86% em 2006 e 90% em 2020. No mês de maio de 2020 a energia hidrelétrica correspondeu a 50,2% da energia gerada e a energia térmica correspondeu a 49,8% da energia gerada.

4.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU

Das 10 UHEs principais do estado do Paraná, 8 se encontram na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu (6 no curso do Rio Iguaçu), sendo responsáveis por aproximadamente 86% de toda a energia elétrica gerada no período de 2000 a 2025, conforme Tabela 33. Assim, faz-se necessário um aprofundamento em seus dados pluviométricos e de geração de energia para um melhor entendimento do contexto energético paranaense.

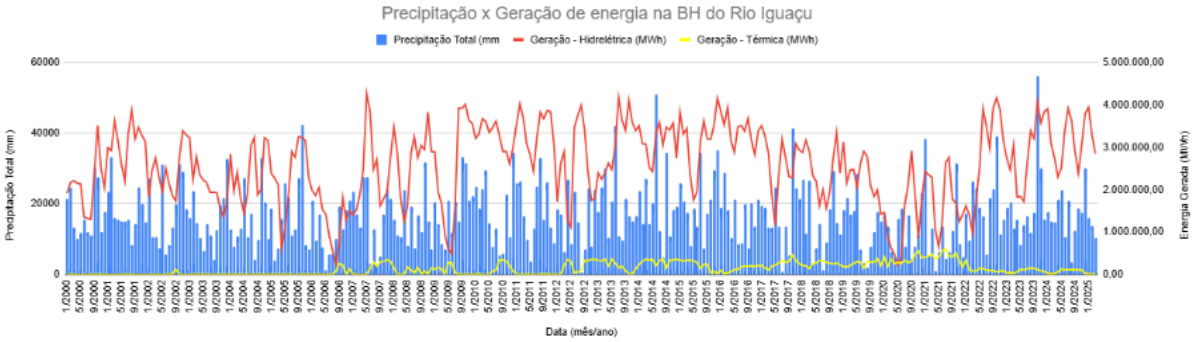
Tabela 3 -- Energia elétrica gerada no Paraná no período 2000-2025

Tipo de Energia	Geração (MWh)	%
Hidrelétrica - Bacia do Iguaçu	785.220.177,71	86,04
Hidrelétrica - Demais Bacias	78.631.581,83	8,62
Térmica	41.442.093,05	4,54
Solar	7.240.728,99	0,79
Eólica	1.392,34	0,00
Total	**912.535.973,94**	**100**

Fonte: ONS. Elaboração: dos autores (2025)

Ao se comparar a energia elétrica gerada na Bacia do Rio Iguaçu com a precipitação pluvial total da bacia (medida por 108 postos pluviométricos que se encontram na bacia hidrográfica em questão), constata-se um comportamento similar ao do Estado inteiro, com alternância de períodos de alta geração, coincidindo com períodos de maior chuva, e períodos de baixa geração, coincidindo com períodos de baixa precipitação. O gráfico da Figura 08 ilustra esse comportamento. Quando comparado com os valores gerais para o Estado, os menores valores de geração de energia hidrelétrica também ocorreram em 2020, em maior (menor valor) e junho (3º menor valor), e em 2006, porém no mês de agosto (2° menor valor).

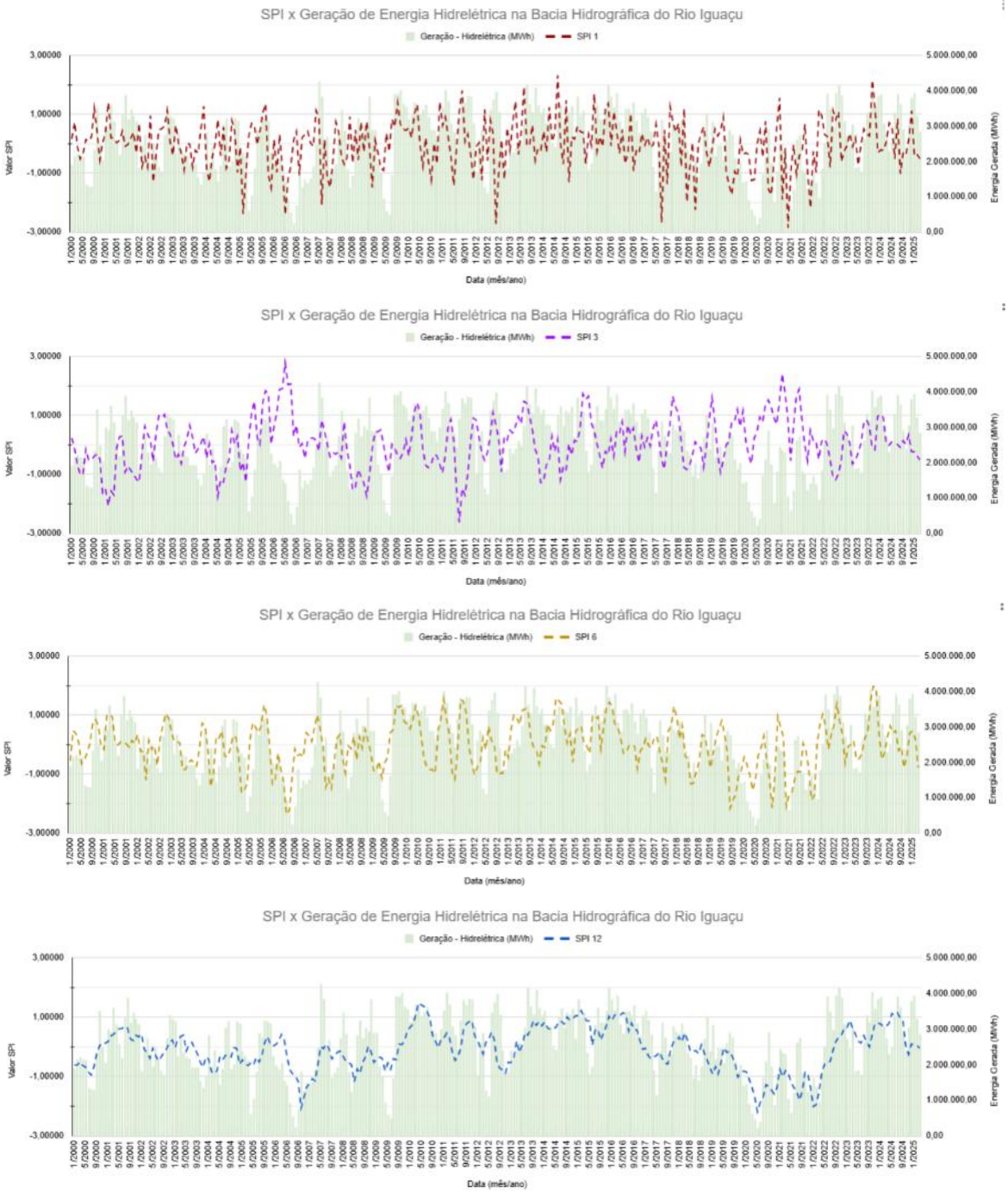
Figura 7 – Comparação entre precipitação e geração de energia na BH do Rio Iguaçu no período 2000-2025



Fonte: dos autores (2025)

Ao se comparar o valor da geração da energia hidrelétrica com os SPI 1, 3, 6 e 12 (obtidos através da média dos 108 postos pluviométricos localizados na bacia hidrográfica em análise), observa-se que todos atingiram desvios menores que -2, indicando períodos de seca excepcional (ANA, 2025). Visualmente, as curvas dos índices SPI6 e SPI12 também são as que mais se adaptam às curvas de geração de energia, mostrando que baixos valores de geração estão associados a baixos valores de SPI. Para o SPI12, o menor valor calculado foi –2,19, em maio de 2020, e o segundo menor valor foi –2,06, em outubro de 2006. Para o SPI6, o menor valor calculado foi –2,36, em junho de 2006 e o segundo menor foi –2,25 em julho de 2006. A Figura 8 ilustra a relação dos SPIs com a geração de energia na série histórica.

Figura 8 – Comparação entre SPI e a energia hidrelétrica gerada na BH do Rio Iguaçu no período 2000-2025



Fonte: dos autores (2025)

Com relação à produção de energia térmica, também é possível observar uma relação inversa com a produção de energia hidrelétrica, ocorrendo aumento na geração de energia térmica quando há momentos de baixa geração de energia

hidrelétrica. Apesar de a energia hidrelétrica gerada na bacia responder por aproximadamente 86% da matriz energética, como dito anteriormente, houve momentos durante a série histórica em que os percentuais também se aproximaram, em 2006, 2020 e 2021 (justamente os períodos de baixa precipitação e baixa geração hidrelétrica), conformes descritos nas Figuras 9 e 10, com redução de geração de energia de aproximadamente 89% em 2006 e 91% em 2020, com a geração térmica ultrapassando a geração hidrelétrica em maio de 2020 (56,52% a 43,48%).

Os testes de correlação entre as UHEs evidenciam essa tendência positiva em relação a diminuição no aporte de chuva e na produção de energia hidrelétrica (Tabela 4), especialmente nos anos de evento extremos secos, como aqueles registrados em 2006, 2019 e 2020. Em 2006, os valores de correlação foram predominantemente considerados intensos (muito fortes) entre as Usinas, alcançando 0,72169 no Posto 1 (Gov. Bento Munhoz), 0,82617 no Posto 3 (Salto Santiago), 0,81475 no Posto 4 (Salto Osório) e 0,90899 no Posto 5 (Gov. José Richa), respectivamente. Esses números revelam uma relação altamente consistente entre as anomalias pluviais e as condições de seca expostas pelo SPI-6 (Figura 9), indicando que o déficit de chuva afeta diretamente a produção hidrelétrica.

Tabela 4 – Correlação de Spearman em reação a Energia x SPI-6

Correlação de Spearman em Relação a Energia x SPI - 6

Posto 1 - UHE Gov Bento Munhoz	2006	0,72169	**Posto 2 - UHE Gov. Ney Braga**	2006	0,48508	**Posto 5 - UHE Gov. José Richa**	2006	0,90899
	2019	0,34471		2019	0,52659		2019	0,68807
	2020	0,66018		2020	0,77672		2020	0,72579
	2021	-0,33025		2021	0,09795		2021	0,15755
	2022	0,86257		2022	0,92326		2022	0,85742
Posto 3 - UHE Salto Santiago	2006	0,82617	**Posto 4 - UHE Salto Osório**	2006	0,81475	**Bacia Rio Iguaçu**	2006	0,15176
	2019	0,11323		2019	0,51179		2019	0,16401
	2020	0,73552		2020	0,72184		2020	0,38712
	2021	-0,40408		2021	-0,28904		2021	0,44140
	2022	0,88319		2022	0,89788		2022	0,60894
Posto 6 - UHE Baixo Iguaçu	2006	-						
	2019	0,63142						
	2020	0,64486						
	2021	0,25326						
	2022	0,79356						

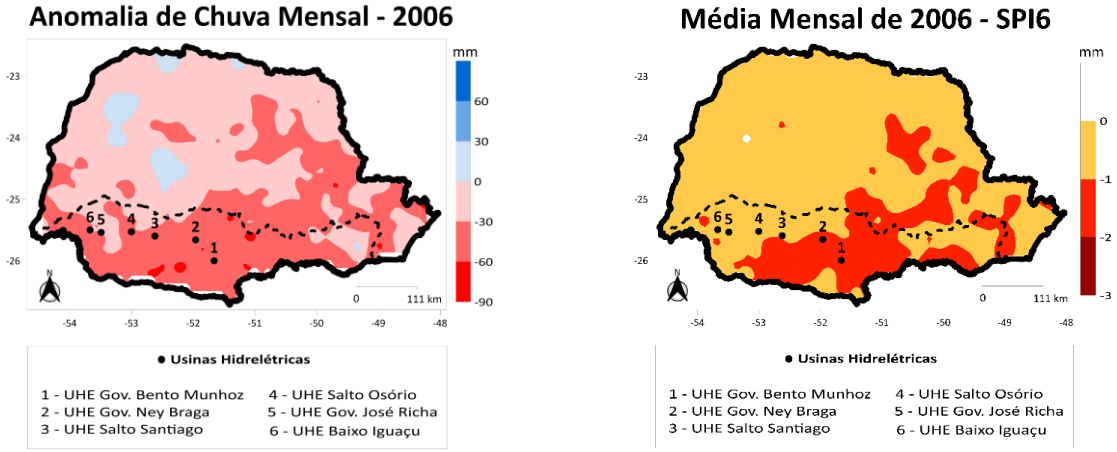
Legenda		
	0 - 0,3	correlação fraca
	0,3 - 0,5	correlação moderada
	0,5 - 0,7	correlação forte
	0,7 - 0,9	correlação muito forte
	0,9 - 1	correlação perfeita

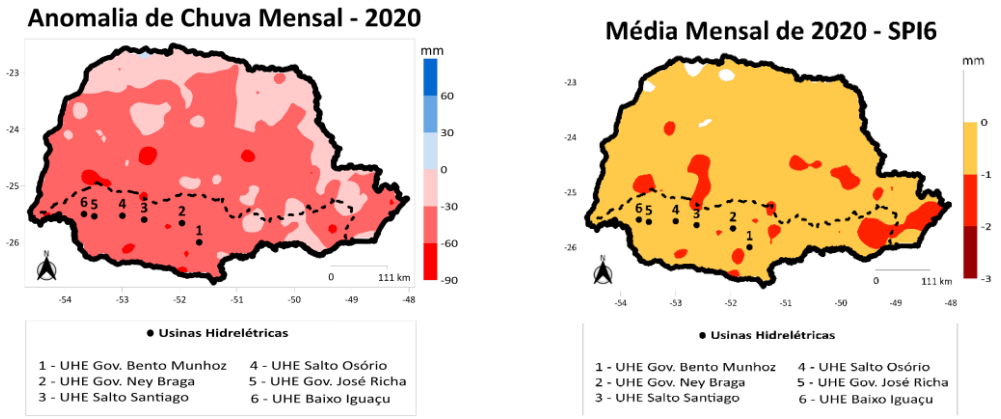
Fonte: dos autores (2025).

O mesmo comportamento pode ser constatado em 2020, onde o Estado, sobretudo a Bacia do Rio Iguaçu, esteve com reduções de chuva abaixo do esperado. Segundo autores como Fernandes *et al.*, (2021) e Gonzatto (2025), o Paraná vivenciou um verdadeiro colapso em diversas esferas econômicas, sociais e políticas devido as severidades de seca no território, isso porque houve déficits de até -90 mm nas áreas onde estão instaladas as principais Usinas Hidrelétricas responsáveis pelo gerenciamento elétrico (Figura 9). Além disso, os registros dos desvios obtidos pelo SPI-6 em consonância com os padrões estatísticos de correlações realizados para o recorte espacial selecionado evidenciam nuances complexos entre chuva *versus* energia, reforçando o padrão de elevada aderência entre as variáveis destacadas.

Por exemplo, nos locais de armazenamento de água, isto é, as Usinas de Gov. Ney Braga, Salto Santiago e Salto Osório, os desvios pluviométricos constatados foram superiores a -1,0, resultando na diminuição hidrelétrica para esse período. Corroborando com essas análises, as correlações realizadas para tais postos demonstram positividades nas relações destacadas, com 0,77672, 0,73552 e 0,72184 respectivamente. Dessa forma, pode-se afirmar que o comportamento consistente dos postos individualizados sugere a predominância de um regime pluvial lógico, no qual variações climáticas influenciaram diretamente a operação das usinas dentro do Estado, conforme indica a Figura 9.

Figura 9 – Anomalias de Chuva Mensal e Média Mensal do SPI para os anos de 2006 e 2020

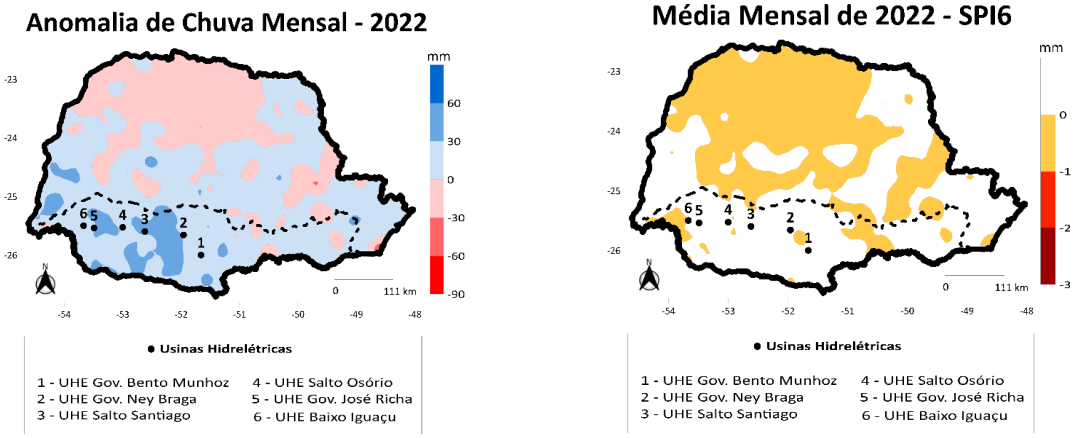




Fonte: dos autores (2025).

Entretanto, é importante ressaltar que por se tratar de anomalias em escala de média e longa duração, o efeito de causa-consequência em relação aos eventos de seca e produção de energia hidrelétrica não ocorrem simultaneamente. No ano de 2022, por exemplo, apesar das correlações se apresentarem nos intervalos “muito forte e perfeitas”, como por exemplo, 0,86257 no Posto 1 (Gov. Bento Munhoz), 0,92326 no Posto 2 (Gov. Ney Braga), 0,88319 no Posto 3 (Salto Santiago), 0,89788 no Posto 4 (Salto Osório), 0,85742 no Posto 5 (José Richa) e 0,79356 no Baixo Iguaçu, conforme indicados na Tabela 4, a Bacia do Rio Iguaçu se manteve com valores pluviométricos acima do esperado (Figura 10). O SPI, ao incorporar as chuvas acumuladas dos meses anteriores captou uma tendência de recuperação gradual e persistente, capazes de restaurar a conexão natural entre a chuva e a geração energética expostas na figura 10.

Figura 10 – Anomalia de Chuva Mensal e Média Mensal do SPI para o ano de 2022



Fonte: dos autores (2025).

Dessa forma, considera-se que o ano de 2022 foi considerado atípico, quando comparados com os anos anteriores, sobretudo 2006 e 2020, haja vista que que os períodos de seca tendem a reduzir gradualmente a disponibilidade hídrica, mas essa influência depende tanto da duração quanto da intensidade do evento seco, refletindo a natureza lenta e acumulativa desse fenômeno. Por outro lado, em alguns anos, mesmo com precipitações abaixo da média (Figura 10), a resposta dos reservatórios foi amortecida, enquanto em outros, pequenas reduções na chuva produziram quedas mais expressivas na geração, indicando sensibilidade variável do sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho foi possível compreender a importância da energia hidrelétrica na composição da matriz energética paranaense, respondendo por quase 95% da energia total gerada no estado do Paraná, e observar como a dinâmica pluviométrica influencia a geração de energia hidrelétrica no estado. Os dados mostraram que em períodos de baixa precipitação a geração hidroelétrica também diminui, sendo o inverso também verdadeiro, em períodos de grandes precipitações, a energia gerada também aumenta, evidenciando a volatilidade desse tipo de fonte energética e a suscetibilidade do estado às condições pluviais. Os fortes períodos de seca que afetaram o Paraná no século XXI, em 2006 e 2019-2021, causaram grandes impactos também na geração energia elétrica, reduzindo-a em aproximadamente 90%.

Essa variação na geração hidrelétrica faz com que seja necessário a utilização de outros tipos de fontes de energia para suprir a demanda, no caso do Paraná, a segunda fonte de energia mais utilizada é a energia térmica, com as principais centrais geradoras do estado sendo a Usina Elétrica a Gás de Araucária, movida a gás natural, a Usina Termelétrica Klabin Celulose, movida a biomassa, e a Usina Térmica de Figueira, movida a carvão mineral, sendo que o gás natural e o carvão mineral são combustíveis fósseis, não renováveis e emissores de gases efeito estufa (de acordo com BNDES, 2008, a queima do gás natural emite em torno de 44% menos CO2 do que o carvão mineral), afetando o ecossistema como um todo, mas também as pessoas que moram ao redor dessas instalações que estarão sujeitas a inalar ar com

uma maior quantidade de poluentes, o que pode acarretar implicações na saúde desses indivíduos.

Com relação às mudanças climáticas, como apontado por (GONZATTO, 2025), existe uma tendência decrescente de chuva no Paraná, principalmente na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, onde estão as UHEs responsáveis por 85% da produção de energia elétrica no estado, podendo causar grandes períodos de seca e menos espaçados, afetando drasticamente a produção de energia hidrelétrica. Além claro, de modos de variabilidade fortemente reconhecidos na região, como *El Niño* e *La Niña*, que podem afetar a dinâmica pluvial do território.

Já, de acordo com (EPE, 2024), a região onde se encontra o estado do Paraná apresenta tendência de aumento na vazão na média, o que pode significar chuvas menos frequentes, porém mais intensas, o que pode colocar em risco também a infraestrutura do setor de energia, como barragens, postes e linhas de transmissão. Apesar de a energia térmica proveniente de combustíveis fósseis ser uma energia poluente, sua independência das variáveis climáticas, como chuva, vento e insolação, e de suas variações, faz dela uma fonte de energia segura, sendo essencial para garantir a segurança energética do país em tempos de crise.

Entretanto, visando a transição energética para fontes renováveis e não poluentes, é imprescindível que haja uma maior participação das fontes de energia solar e eólica, que para que consigam suprir demanda energética em tempos de crise hídrica, diminuindo a dependência de energias geradas a partir de combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Tabela de classificação de severidade da seca**. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/tabela-de-classificacao> Acesso em 25 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE HIDROENERGIA – ABRHIDRO. **Principal fonte de energia de cada estado do Brasil**. Disponível em: <https://www.site.abrhidro.org.br/post/principal-fonte-de-energia-de-cada-estado-do-brasil> Acesso em 25 nov. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Gás natural**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. Disponível em:

<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20802/1/PR_Gas%20natural_215277_P_BD.pdf> Acesso em 23 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2024:** Relatório Síntese 2024 - ano base 2023, Brasília: EPE. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico 715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf> Acesso em 25 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidreletricidade e mudanças climáticas:** Reflexões para a adaptação e ampliação da resiliência do Setor Elétrico Brasileiro, Brasília: EPE, dez. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-852/topico736/FACT%20SHEET%20HIDRELETRICIDADE%20E%20MUDAN%C3%87AS%20CLIM%C3%81TICAS.pdf> Acesso em 22 nov. 2025.

COPANINHA, O.; LACTEC; CEPEL; COPEL; *et al. Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná*. Curitiba: COPEL / Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, 2007. 53 p. ISBN 978-85-88519-03-9. Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas_do_Potencial_Eolico_do_Estado_do_Parana.pdf> Acesso em 24 nov. 2025.

COSTA, L. C. O.; BROEDEL, E.; FRANÇA, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. Secas e os impactos na região sul do brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 561-584, 2021.

FERNANDES, V. R.; CUNHA, A. P. M. A.; PINEDA, L. A. C.; LEAL, K. R. D.; COSTA, L. C. O.; BROEDEL, E.; FRANÇA, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. Secas e os impactos na região sul do brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 561-584, 2021.

GOZZO, L. F.; PALMA, D. S.; CUSTÓDIO, M. S.; DRUMOND, A. Padrões climatológicos associados a eventos de seca no leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 28, p. 321–341, 2021.

GRIMM, A. M.; ALMEIDA, A. S.; BENETI, C. A. A.; LEITE, E. A. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **RBRH**, v. 25, p. e48, 2020.

GUTIERREZ, M. B. G. P. S. As Mudanças climáticas e seus impactos sobre o setor de energia elétrica no Brasil: a necessidade de aprimorar o planejamento energético. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental (Brua)**: n. 33, Brasília, v. 33, p. 111-119, 2 dez. 2024.

GONZATTO, G. **Análises das secas e de seus padrões espaço-temporais no Estado do Paraná**. 2025. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2025. 151p.

HAILE, G. G.; TANG, Q.; LI, W.; LIU, X.; ZHANG, X. Drought: Progress in broadening its understanding. **WIREs Water**, v. 2, p. e1407, 2019.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity Security 2021:** climate resilience. Paris: IEA, 2021.

IPCC. **Climate Change 2021**: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

ITCG. **Instituto de Terras, Cartográfica e Geologia do Paraná.** 2008. Disponível em:<http://www.geoitcg.pr.gov.br/geoitcg/pages/templates/initial_public.jsf;jsessionid=aivSkIBEAx5oi0Ep3GGxTwnLg1zBYLz7uIGjUkMp.scelepar75028?windowId=02d>

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of hydrology**, v. 391, n. 1-2, p. 202-216, 2010.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Instruções de Operação**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/%2FMPO%2FDocumento%20Normativo%2F3.%20Instru%C3%A7%C3%B5es%20de%20Opera%C3%A7%C3%A3o> Acesso em 27 nov. 2025.

PEREIRA, J. B. **Desafios e Oportunidades das Abordagens ESG para Reduzir os Impactos Ambientais da Indústria Têxtil**. In: XAVIER JUNIOR, Ely Caetano; BRANDÃO, Clarissa. Desafios globais contemporâneos: cenário de convergências no direito internacional. Revista Direito GV, v. 5, p. 425-442, 2009.

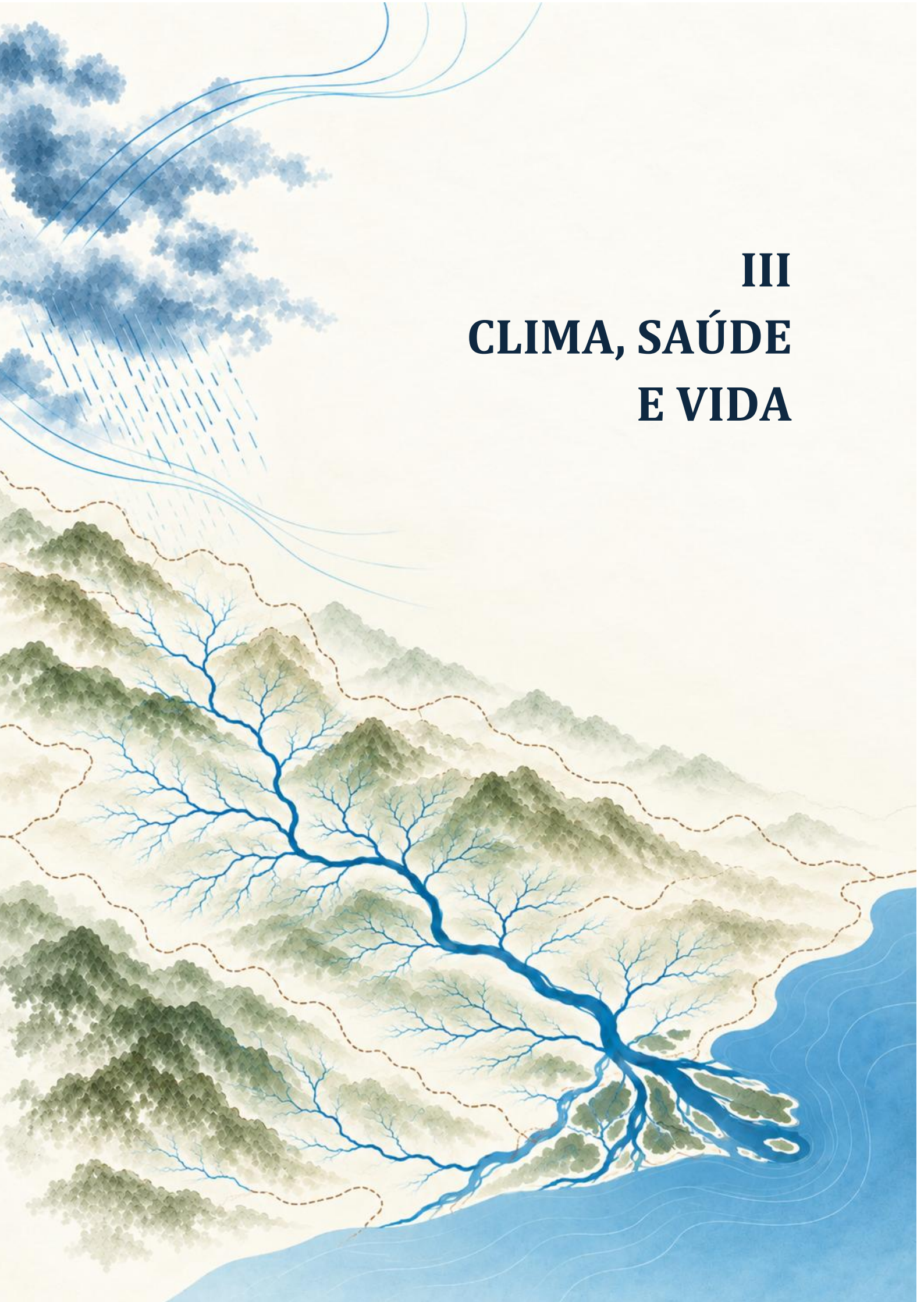
ROCHA, S. S. **Variabilidade pluviométrica no Paraná e eventos climáticos: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu**. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022. 125p.

TERASSI, P. M. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR J. F.; GÓIS, G.; GALVANI, E. Variabilidade do índice de precipitação padronizada na região norte do estado do paraná associada aos eventos de el niño-oscilação sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 11-25, 2018.

SILVEIRA, P. G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. **Opinión Jurídica**, Medellín, v. 17, n. 33, p. 123-148, jun. 2018.

SHUKLA, P. R.; SKEA, J. (Ed.). **Climate change 2022: mitigation of climate change – Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2022.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ Jr., J.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S.; ALVES, A. R. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba: INPE/UTFPR, 2017.



III
CLIMA, SAÚDE E VIDA

CLIMA, TERRITÓRIO E ENFERMIDADES: UMA ANÁLISE DA GEOGRAFIA DA SAÚDE SOB A ÓTICA DO COMPLEXO PATOGÊNICO E DA SAÚDE ÚNICA

Thiago Kich Fogaça – Universidade Federal do Paraná – Instituto Federal do Paraná[1]
Wilson Flavio Feltrim Roseghini – Laboratório de Climatologia – UFPR[2]

1 INTRODUÇÃO

A interface entre os elementos do clima e a saúde pública figura entre as preocupações mais antigas da medicina e da geografia, remontando à tradição hipocrática e consolidando-se, contemporaneamente, como campo estratégico para a compreensão dos determinantes/condicionantes ambientais do processo saúde-doença.

A obra de Hipócrates "Dos ares, das águas e dos lugares" (480 a.C.), já apresentava a necessidade dos médicos investigarem as origens das enfermidades a partir das condições ambientais vividas pelas populações (Lacaz, 1972). Embora o reconhecimento empírico da influência do clima sobre a saúde remonte à Antiguidade, a sistematização científica desse conhecimento ganhou impulso apenas no início do século XX. Entre 1934 e 1938, William F. Petersen, da Universidade de Illinois, publicou a série "O paciente e o tempo", por exemplo, na qual analisou as correlações entre variáveis meteorológicas e estados fisiológicos, tanto em indivíduos saudáveis quanto em pacientes, sendo um estudo pioneiro.

Conforme problematizado por Mendonça (2004), a influência climática sobre o organismo humano manifesta-se de maneira direta e indireta, podendo assumir

[1] Doutor em Geografia – tkfogaca@gmail.com
[2] Doutor em Geografia – feltrim@ufpr.br

caráter tanto benéfico quanto danoso. Em situações de estresse térmico e higrométrico acentuado, por exemplo, observa-se maior vulnerabilidade fisiológica e o agravamento de quadros inflamatórios. Em contrapartida, regimes moderados de temperatura, umidade e radiação solar contribuem para o bem-estar e a manutenção da saúde. Além disso, os elementos do clima contribuem para ampliação das condições socioambientais favoráveis à proliferação de vetores de enfermidades transmissíveis. Mendonça (2004) enfatiza que as variáveis climáticas, especialmente as condições térmicas, os padrões de ventilação e os níveis de umidade, exercem papel determinante na manifestação de endemias e epidemias.

Com o atual cenário de mudanças climáticas globais, a investigação acerca da dinâmica espacial, padrões de dispersão e as populações mais afetadas pelas doenças tropicais negligenciadas, como a dengue, demanda abordagem necessariamente interdisciplinar, capaz de articular conhecimentos da climatologia, da epidemiologia e do ordenamento territorial, sob a ótica da Geografia da Saúde. Os geógrafos da saúde pesquisam a relação entre elementos geográficos e a disseminação de determinadas doenças levando em consideração o ambiente, natural e construído, mais os aspectos socioculturais e as políticas públicas desempenhadas para prevenção e tratamento dos doentes, levando em consideração processos espaciais (Fogaça, 2024). A ênfase é no lugar e suas territorialidades e como favorecem e/ou configuram ambientes de vulnerabilidade socioambiental para diferentes doenças. Nesse sentido, Aleixo et al (2017) argumentam que a produção do espaço urbano, ao reorganizar os usos do solo e as condições ambientais, redefine padrões de exposição e vulnerabilidade, estabelecendo mediações decisivas entre clima e saúde.

O presente texto propõe-se a examinar a dinâmica entre clima e saúde a partir de um referencial teórico estruturado em quatro eixos fundamentais: a Geografia da Saúde e o conceito de complexo patogênico, formulado por Maximilien Sorre, que permite integrar fatores ecológicos, biológicos e sociais na explicação das endemias; as contribuições da climatologia geográfica brasileira, que têm avançado na análise rítmica e na compreensão dos regimes climáticos em sua articulação com o território; as perspectivas contemporâneas voltadas à vigilância em saúde, em diálogo com o paradigma One Health (Saúde Única), que enfatiza a interdependência entre saúde

humana, animal e ambiental no enfrentamento de ameaças sanitárias complexas; e, por fim, o estudo de caso sobre a doença dengue na perspectiva do complexo patogênico e da saúde única.

2 GEOGRAFIA DA SAÚDE, MAXIMILIEN SORRE E O COMPLEXO PATOGÊNICO

A Geografia da Saúde se estabelece na contemporaneidade como um campo de conhecimento de natureza marcadamente transdisciplinar, situado nas interfaces entre a Geografia, as ciências biomédicas e as ciências sociais. Essa área do saber funciona como um espaço de convergência onde se encontram fenômenos naturais, socioeconômicos, culturais e comportamentais. Essa capacidade de integração a torna fundamental para a explicação dos padrões espaciais de saúde e doença, uma vez que tais padrões não podem ser compreendidos a partir de uma única dimensão explicativa (SANTANA, 2014; MENDONÇA; ARAÚJO; FOGAÇA, 2014, FOGAÇA, 2024).

A Geografia da Saúde implica um duplo movimento. Por um lado, quando praticada por geógrafos, ela se configura como uma plataforma metodológica que, embora dialogue com temas caros a outras disciplinas, mantém-se firmemente ancorada nos referenciais teórico-metodológicos da Geografia. Por outro lado, ao ser apropriada por profissionais de outras áreas, essa perspectiva geográfica oferece um modo particular de enxergar os problemas, iluminando aspectos espaciais e territoriais que, de outra forma, permaneceriam desconsiderados e possibilitando, assim, a busca de soluções inovadoras (PEREIRA, 2021). Trata-se de um olhar abrangente, voltado não para o indivíduo ou para o agente etiológico isoladamente, mas para o contexto mais amplo no qual os problemas de saúde se manifestam. O objetivo, nesse sentido, é atuar sobre os territórios, compreendendo a dinâmica que envolve tanto o processo de adoecimento quanto a organização dos serviços de atenção à saúde (BARCELLOS, 2018).

Essa importante abordagem territorial atual é fruto de uma significativa mudança teórica ocorrida por volta da década de 1970, quando a tradicional Geografia Médica deu lugar ao que hoje se denomina Geografia da Saúde. Tal mudança

acompanhou uma transformação mais ampla no pensamento científico e social, que gradualmente deslocou o foco de análise do conceito restrito de doença para o conceito mais abrangente de saúde. Além disso, essa evolução conceitual permitiu uma compreensão mais robusta do fenômeno do adoecimento, que passou a ser visto como um processo profundamente enraizado em dinâmicas sociais e espacialmente determinadas (MENDONÇA, 2014). O território, nessa nova perspectiva, deixa de ser um mero receptáculo ou palco onde as doenças acontecem, para ser entendido como um processo ativo, resultado de uma acumulação complexa de situações históricas, ambientais e sociais. São essas situações que, em seu conjunto, promovem condições particulares e concretas para a produção de doenças, tornando o reconhecimento e a análise aprofundada do território um passo fundamental para a caracterização dos problemas de saúde de uma população e para a avaliação do impacto das políticas e dos serviços de saúde (MENDONÇA, 2014).

Para analisar a dimensão espacial das doenças, sobretudo as de caráter transmissível, a geografia recorre a um arcabouço conceitual cujas bases foram lançadas ainda em meados do século XX pelo geógrafo francês Maximilien Sorre. Em suas obras, Sorre propôs uma abordagem inovadora para a época ao conceber a doença como resultado da convergência de fatores biológicos e geográficos, materializada no que denominou de “complexo patogênico”. Este conceito descreve precisamente a complexa teia de relações que se estabelece entre o meio natural, os diferentes seres vivos – incluindo o agente causal da doença, seus vetores e hospedeiros – e o homem. Mais do que uma simples justaposição de elementos, o complexo patogênico constitui um sistema organizado no espaço, no qual as condições de vida das populações humanas e as condições ecológicas dos vetores se encontram e interagem (SORRE, 1955 *apud* SETTE, 2011; GUIMARÃES, 2015).

Sorre argumentava que a distribuição geográfica das endemias não poderia ser explicada sem a consideração integrada de elementos como a geografia da alimentação, a geografia do habitat e as condições climáticas, por exemplo. Para a Geografia da Saúde contemporânea, essa lição permanece atual, pois não se trata apenas de mapear a localização dos doentes, mas mapear as próprias condições de possibilidade da doença. Isso implica investigar um conjunto complexo de variáveis que inclui, por um lado, os fatores climáticos, como temperatura e umidade, que

afetam a reprodução de vetores, e, por outro, as condições sociais, como saneamento básico, qualidade da habitação e mobilidade populacional, que criam ambientes propícios ou não para a transmissão de patógenos (GUIMARÃES, 2015). Nessa perspectiva, a relação ecológica estabelecida em cada complexo é patogênica justamente porque sua existência estável e localizável no espaço resulta na produção de doenças e na deterioração da saúde humana, sendo a ação dos homens um fator decisivo para assegurar a permanência ou promover o declínio desses complexos ao longo do tempo (GUIMARÃES; CATÃO; CASAGRANDE, 2018).

A dinâmica do mundo contemporâneo, entretanto, impõe novos desafios e exige uma constante releitura e atualização desses conceitos fundadores. Autores como Barcellos (2018) observam que, acompanhando a transição demográfica e epidemiológica em curso, a geografia da saúde tem progressivamente reservado às abordagens tradicionais ligadas às doenças infecciosas e transmissíveis ao campo de análise coberto pelo conceito de complexo patogênico. Paralelamente, a emergência de novos perfis de morbidade, dominados por doenças crônico-degenerativas, como as cardiovasculares, o câncer e as enfermidades neuro-degenerativas, demandou a criação de conceitos revisitados. É nesse contexto que Henri Picheral propõe, nas décadas de 1970 e 1980, a noção de sistema patogênico, uma abordagem sistêmica mais apta a analisar as heterogeneidades espaciais da saúde produzidas por esses novos perfis, associados ao prolongamento da vida e às mudanças nos estilos de vida (BARCELLOS, 2018).

É precisamente nessa esteira de atualização conceitual que se insere a contribuição de Guimarães, Catão e Casagrande (2018). Para esses autores, as profundas transformações impostas pelo período técnico-científico, caracterizado pela crescente normatização dos corpos e da vida pela ciência e pela técnica, tornam insuficiente a abordagem clássica do complexo patogênico. Eles propõem, então, que se considere a emergência dos complexos tecno-patogênicos informacionais. Essa releitura busca captar uma mudança qualitativa na organização dos complexos patogênicos, sobretudo no caso de doenças infecto-parasitárias, que seguem sendo um grave problema de saúde pública em muitas regiões. Doenças como a dengue e a leishmaniose tegumentar americana, por exemplo, são cada vez mais resultado da complexa interação entre um corpo social e biologicamente normatizado pelas

tecnologias e pelas informações e as constantes variantes adaptativas dos patógenos e vetores. Essa nova dinâmica, mediada pela informação e pela técnica, influencia decisivamente as formas de distribuição e difusão espacial das doenças, exigindo, portanto, que o legado analítico de Sorre seja constantemente revisitado e atualizado para dar conta da complexidade do mundo presente (GUIMARÃES; CATÃO; CASAGRANDE, 2018).

3 A CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA E SAÚDE NO BRASIL

A climatologia, enquanto campo do conhecimento, caracteriza-se por sua natureza intrinsecamente interdisciplinar. No âmbito específico da climatologia geográfica, no entanto, o clima é compreendido não como um fenômeno puramente atmosférico, mas pelo que representa no conjunto das relações entre natureza e sociedade. O foco de análise recai, portanto, sobre a interação da atmosfera com a litosfera, a hidrosfera e a biosfera no espaço socialmente produzido. A dinâmica dos atributos climáticos manifesta-se por meio de distintos ritmos, inter-relacionados em diferentes escalas temporais, que repercutem e interagem com as atividades humanas e com o ambiente construído. Paralelamente, os próprios ritmos internos dos organismos encontram-se ligados a determinadas condições como a gravidade, temperatura, luz, umidade e oxigênio, condições estas que foram evoluídas e produzidas ao longo de ciclos temporais extensos e que, relativamente, mantêm certos padrões de regularidade ou variações que permitem a adaptação dos seres vivos às mudanças ambientais.

Historicamente, o clima foi concebido como um dos principais elementos do meio a influenciar a manifestação das mais diversificadas moléstias humanas. Tal percepção foi tão marcante que o determinismo climático tornou-se uma concepção hegemônica no campo da ciência e da política entre os séculos XVIII e meados do XX (MENDONÇA, 2014). No Brasil, a aplicação da climatologia aos estudos de saúde ganhou expressiva contribuição a partir de trabalhos que buscam articular o rigor da análise climática com a complexidade social dos ambientes urbanos. Autores destacam que o clima urbano não pode ser reduzido a um dado meramente físico,

devendo ser compreendido como um produto social que afeta diretamente as condições de saúde pública.

A biometeorologia, campo que compartilha dessas preocupações, dedica-se a esclarecer as variações e transformações nos sistemas físico-químicos dos organismos vivos, com especial atenção aos seres humanos, dada sua sensibilidade às alterações atmosféricas de diversas ordens. Entre os elementos climáticos que influenciam a fisiologia humana, destacam-se a temperatura, a umidade do ar, os ventos, a pressão atmosférica, a radiação solar, a poluição do ar, as descargas elétricas e o magnetismo (ALEIXO, 2017). A complexidade das relações entre clima e saúde decorre, em grande medida, da dependência de fatores como a intensidade e a duração das mudanças nas condições atmosféricas, ou seja, o grau de contraste experimentado, bem como da sensibilidade dos receptores, sejam eles indivíduos ou populações, atributos que variam continuamente no tempo e no espaço.

Estudos empíricos têm demonstrado de forma consistente os impactos das variações térmicas sobre a morbidade e a mortalidade. Investigações realizadas em Ribeirão Preto, por exemplo, identificaram que episódios extremos de baixa temperatura, particularmente as ondas de frio, associam-se a um aumento significativo nos casos de internação hospitalar por pneumonia. O efeito não é imediato, manifestando-se com maior intensidade até uma semana após a exposição humana ao frio intenso (RIBEIRO *et al.*, 2016). A quantificação desse risco revela que períodos consecutivos de dias com temperaturas mínimas inferiores a 15 graus Celsius elevam em quase duas vezes as chances de ocorrência de excesso de internações por pneumonia na população exposta (ALEIXO, 2012).

No contexto urbano, fenômenos como as ilhas de calor agravam esses quadros. A maior intensidade dessas ilhas de calor, geralmente associada à concentração de edificações, à impermeabilização do solo e à reduzida cobertura vegetal, mostrou-se espacialmente relacionada a maiores taxas de mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente entre a população idosa (RIBEIRO *et al.*, 2016). A chamada poluição térmica, resultante desses processos, contribui para o surgimento e agravamento de enfermidades cardiovasculares e respiratórias, além de provocar desconforto e estresse, afetando de maneira

particularmente intensa grupos populacionais mais vulneráveis, como crianças, propensas a doenças respiratórias, e idosos e cardíacos (SETTE, 2011).

As interações entre clima e poluição atmosférica também se destacam. As condições meteorológicas desempenham um papel essencial na determinação dos níveis de qualidade do ar, uma vez que os poluentes atmosféricos são sensíveis a variáveis como temperatura, umidade, precipitação, radiação solar e padrões de vento. O clima influencia distintos processos, desde as reações químicas que ocorrem na atmosfera até os mecanismos de transporte, dispersão e remoção dos poluentes (CASTELHANO *et al.*, 2022). Em áreas caracterizadas por alta umidade e chuvas frequentes, a precipitação atua como um eficiente mecanismo de limpeza atmosférica, removendo partículas por deposição úmida. Por outro lado, regiões áridas apresentam menor remoção natural de poluentes, aumentando a dependência de outros mecanismos, como a presença de espaços verdes, para desempenhar essa função. Os padrões de vento, por sua vez, influenciam a dispersão e a concentração dos poluentes, pois, velocidades mais elevadas tendem a aumentar a turbulência e a advecção, favorecendo a dispersão, enquanto condições de baixa velocidade favorecem o acúmulo de poluentes próximos às fontes emissoras (SILVA *et al.*, 2025; CASTELHANO *et al.*, 2022).

As variações regionais nos padrões meteorológicos, na topografia e na circulação atmosférica contribuem, assim, para resultados díspares na concentração de poluentes entre diferentes áreas. A temperatura e a umidade relativa, por exemplo, são determinantes importantes das tendências de material particulado fino e ozônio troposférico. Estudos têm encontrado correlações positivas entre temperatura e poluição do ar, ao mesmo tempo que sugerem correlações negativas entre a velocidade do vento e determinados poluentes, incluindo o ozônio (COBELO *et al.*, 2023). A formação de ozônio troposférico, em particular, é favorecida por condições de baixa umidade, reduzida nebulosidade, altas temperaturas e baixa velocidade do vento (CASTELHANO *et al.*, 2022).

Os impactos dessa interação entre clima e poluição sobre a saúde humana são profundos e multifacetados. Estimativas nacionais indicam que, ao longo de um período de 16 anos, o impacto do clima sobre as concentrações de material particulado fino esteve associado a mais de seis mil e quinhentas mortes no Brasil. As

relações de concentração-resposta para os três poluentes responsáveis pela maior parcela da mortalidade relacionada à poluição do ar – o material particulado fino, o ozônio e o dióxido de nitrogênio – evidenciam a magnitude do problema (CASTELHANO *et al.*, 2022). Os mecanismos pelos quais a poluição atmosférica afeta a saúde incluem processos como o estresse oxidativo, que danifica células e tecidos; a inflamação, que exacerba condições respiratórias pré-existentes; e o comprometimento da função pulmonar, que reduz a ingestão de oxigênio e impõe sobrecarga adicional ao sistema cardiovascular. A exposição ao material particulado fino, por exemplo, tem sido sistematicamente associada ao aumento de internações hospitalares por asma, doença pulmonar obstrutiva crônica e eventos cardiovasculares diversos, incluindo infartos agudos do miocárdio, acidentes vasculares cerebrais e quadros de insuficiência cardíaca (SILVA *et al.*, 2025).

Os efeitos adversos estendem-se também às populações mais vulneráveis, como as gestantes e os fetos. O nascimento de crianças com peso inferior ao adequado, além de elevar o risco de mortalidade e morbidade no período neonatal, também restringe o crescimento e o desenvolvimento neurológico, podendo desencadear a ocorrência de doenças não transmissíveis em estágios posteriores da vida. Os poluentes atmosféricos, ao serem inalados pela mãe, podem induzir processos que dificultam o transporte transplacentário de oxigênio e nutrientes, limitando, assim, o desenvolvimento fetal. Variações regionais nos padrões meteorológicos e na circulação atmosférica, ao influenciarem a dispersão e a concentração desses poluentes, contribuem para resultados díspares de baixo peso ao nascer em diferentes áreas, somando-se ainda os efeitos biológicos específicos de cada poluente sobre a saúde materna e fetal (MOORE *et al.*, 2024).

Fontes específicas de emissão, como os incêndios florestais e as queimadas agrícolas, agravam significativamente esse panorama. Eventos de incêndios florestais ocorridos entre o início dos anos 2000 e o final da década de 2010 elevaram os níveis de poluição do ar e representaram riscos substanciais à saúde no Brasil. A emissão de poluentes provenientes da queima da cana-de-açúcar, por exemplo, mostrou-se associada ao aumento de doenças respiratórias. De modo ainda mais expressivo, incêndios originários de áreas de cultivo de soja no bioma Amazônia foram associados

a milhares de mortes, atribuíveis à exposição ao material particulado fino proveniente dessas queimadas (COBELO *et al.*, 2023).

Para além das doenças respiratórias e cardiovasculares, as condições climáticas interagem também com outras enfermidades, como a leptospirose. Estudos evidenciam que a dinâmica climática associa-se a doenças relacionadas à água em períodos temporais distintos. No caso da leptospirose, a temperatura efetiva e, posteriormente, a precipitação pluvial mostraram-se importantes para a compreensão de duas situações de risco distintas: as atividades de lazer em contato com águas contaminadas e os episódios de inundação urbana. Em contextos urbanos como o de Ribeirão Preto, o principal fator de risco identificado foi o contato da população com rios, córregos e lagos, seja para atividades de lazer, seja por razões ocupacionais, além, evidentemente, das inundações que expõem grandes contingentes populacionais à água contaminada por urina de roedores (ALEIXO, 2012).

Por fim, é fundamental considerar que esses impactos não se distribuem de maneira homogênea no espaço social. Em populações de baixa renda, as condições econômicas frequentemente não permitem o acesso a equipamentos como ar condicionado, ventiladores e aquecedores, que poderiam regular as condições microclimáticas internas das residências quando estas se tornam desfavoráveis. Adicionalmente, as construções em áreas socioeconomicamente vulneráveis são frequentemente precárias, empregando materiais e técnicas construtivas que dificultam o adequado isolamento térmico, expondo seus moradores a condições de maior estresse térmico, tanto no inverno quanto no verão (SETTE, 2011). A vulnerabilidade social, portanto, potencializa os riscos climáticos e ambientais, produzindo padrões espacialmente diferenciados de adoecimento e morte que devem ser objeto central das políticas públicas de saúde e de planejamento urbano.

4 O PARADIGMA ONE HEALTH (SAÚDE ÚNICA)

A complexidade das crises sanitárias que marcam a contemporaneidade, exemplificada de modo contundente pela pandemia de COVID-19 e pelas recorrentes epidemias de arboviroses como dengue, zika e chikungunya, impõe a necessidade de superação de uma visão estritamente antropocêntrica e fragmentada dos processos

de adoecimento. Diante desse cenário, emerge com força crescente o conceito de Saúde Única, tradução da expressão inglesa *One Health*, que propõe o reconhecimento da indissociabilidade entre a saúde humana, a saúde animal e a saúde dos ecossistemas. Para a Geografia da Saúde, essa abordagem implica compreender que fenômenos como o desmatamento, a expansão das fronteiras agrícolas e a urbanização acelerada alteram profundamente os habitats da fauna silvestre, forçando um contato cada vez mais intenso entre animais selvagens, animais domésticos e populações humanas. Esse processo cria as condições propícias para o chamado *spillover*, ou transbordamento, de patógenos de seus hospedeiros naturais para novas espécies, incluindo os seres humanos, desencadeando surtos e epidemias de difícil controle.

O conceito moderno de Saúde Única possui raízes históricas bem delineadas. Sua origem remonta à noção de "Medicina Única" ou "Medicina Unificada" (*One Medicine*), formulação desenvolvida inicialmente para demonstrar a conexão intrínseca entre a medicina humana e a medicina veterinária, particularmente no contexto do controle de zoonoses. Essa base conceitual foi posteriormente ampliada, dando origem à expressão "Um Mundo, Uma Saúde" (*One World, One Health*), criada para representar de forma mais abrangente a interdependência entre a saúde de humanos, a saúde dos animais e a saúde dos ecossistemas (ELLWANGER, 2022).

Um marco fundamental nessa trajetória ocorreu em 2004, quando o conceito "Um Mundo, Uma Saúde" foi oficialmente estabelecido em um contexto de crescente preocupação global com as doenças emergentes. Nesse momento, incorporou-se de maneira definitiva a saúde do ecossistema e da fauna silvestre à abordagem que, até então, concentrava-se prioritariamente em humanos e animais domésticos (MACHADO *et al.*, 2023). A sucessão de zoonoses de grande impacto ocorridas nas últimas décadas, como a gripe aviária, as epidemias de Ebola e Zika e, mais recentemente, a pandemia de COVID-19, evidenciou para a comunidade científica e para a população em geral a necessidade urgente dessa visão integrada e sistêmica dos processos de saúde e doença (MACHADO *et al.*, 2023).

No âmbito institucional global, a abordagem da Saúde Única tem sido sistematicamente promovida por organismos do sistema das Nações Unidas, com destaque para a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

e a Organização Mundial da Saúde. O conceito ganhou ainda maior evidência no contexto das discussões sobre o Tratado de Pandemias, impulsionadas pela crise sanitária da COVID-19, que expôs de forma dramática as fragilidades dos sistemas de saúde e a insuficiência de abordagens fragmentadas para o enfrentamento de ameaças sanitárias globais (RIZZOTTO *et al.*, 2024). Trata-se, portanto, de uma estratégia global que enfatiza a necessidade de uma abordagem holística e transdisciplinar, incorporando expertise multissetorial para lidar com os complexos desafios que envolvem a saúde humana, animal e dos ecossistemas de maneira integrada (MACHADO *et al.*, 2023).

No Brasil, a trajetória recente de incorporação do conceito foi marcada por importantes avanços institucionais. Em 2024, a Saúde Única ganhou reconhecimento legal por meio da Lei nº 14.792, que instituiu o Dia Nacional da Saúde Única, e do Decreto nº 12.007, que criou o Comitê Técnico Interinstitucional de Uma Só Saúde. Esses instrumentos normativos representam um esforço de institucionalização da abordagem no âmbito das políticas públicas brasileiras, criando mecanismos para a articulação entre diferentes setores e esferas de governo no enfrentamento de problemas sanitários complexos (RIZZOTTO *et al.*, 2024).

Apesar de seu reconhecimento crescente, o conceito de Saúde Única não está isento de críticas e limitações. Autores apontam que, embora a abordagem apresente evidências científicas robustas sobre a interdependência entre os seres vivos no que se convencionou chamar de biosfera, ela frequentemente se omite ou simplifica excessivamente quando se trata de incorporar a análise das formas específicas pelas quais a ação humana, particularmente em suas dimensões econômicas e políticas, desestrutura os ecossistemas, destrói a biodiversidade e provoca a emergência de doenças infecciosas, além de contribuir decisivamente para as mudanças climáticas globais. Essa omissão pode resultar em uma abordagem tecnocrática que trata dos sintomas, mas não das causas profundas dos problemas sanitários (RIZZOTTO *et al.*, 2024).

Além disso, o conceito tem sido resgatado e aplicado como ferramenta analítica e propositiva no enfrentamento de doenças graves que afligem a população brasileira. No caso da leishmaniose visceral, por exemplo, a perspectiva da Saúde Única permite identificar as condições que promovem a persistência da doença e orientar ações

integradas voltadas à sua eliminação, uma vez que saúde humana, saúde animal e viabilidade ecossistêmica encontram-se inseparavelmente ligadas nesse agravo (FONSECA *et al.*, 2024). Do mesmo modo, a abordagem tem sido mobilizada no enfrentamento da dengue, arbovirose de grande magnitude que exige ações coordenadas que envolvem o controle do vetor, a atenção à saúde humana, a gestão ambiental e a mobilização social (MACHADO *et al.*, 2023).

Em síntese, o conceito de Saúde Única resgata a possibilidade de integrar conhecimentos e práticas historicamente compartimentados, oferecendo um quadro analítico e operacional mais adequado à complexidade dos problemas sanitários contemporâneos. Sua aplicação no âmbito da Geografia da Saúde permite avançar na compreensão das interações entre processos sociais, dinâmicas ambientais e manifestações patogênicas, contribuindo para a formulação de respostas mais efetivas e socialmente justas diante dos desafios colocados pelas crises sanitárias em um mundo cada vez mais interconectado.

5 O CASO DAS ARBOVIROSES: DENGUE, CLIMA E MODELAGEM

A dengue, classificada como uma doença tropical negligenciada e apesar de sua alta prevalência e impacto sobre os sistemas de saúde, constitui um estudo de caso exemplar para a aplicação integrada dos referenciais teóricos da climatologia geográfica e da abordagem da Saúde Única. A relação entre as variáveis climáticas e a dinâmica populacional do vetor *Aedes aegypti*, embora direta em termos causais, está longe de ser linear, envolvendo interações complexas que se desdobram no tempo e no espaço.

Estudos detalhados sobre a ocorrência da dengue demonstram que os casos da doença se concentram predominantemente nos meses de outono, mas essa manifestação tardia está diretamente relacionada às condições ambientais vigentes um ou dois meses antes. Nesse período anterior, identificam-se faixas ótimas para o desenvolvimento do vetor, caracterizadas por temperaturas máximas do ar entre 27 e 32 graus Celsius, temperaturas mínimas entre 16 e 21 graus e umidade relativa do ar situada entre 89 e 94 por cento (ALEIXO, 2012). Em complemento, estudos realizados por pesquisadores do Laboratório de Climatologia (Laboclima) da Universidade

Federal do Paraná, identificaram os limiares ideais para a proliferação do vetor entre as temperaturas de 22ºC e 30ºC (Oliveira *et al*, 2020). A incidência da doença, no entanto, não flutua apenas em função da temperatura e da pluviosidade, variáveis classicamente exploradas pela literatura. Estudos recentes têm evidenciado a importância de outros elementos climáticos frequentemente negligenciados, como a baixa velocidade dos ventos, que favorece a concentração do vetor e reduz a dispersão das partículas infectantes, contribuindo para a elevação do número de casos (RIBEIRO *et al.*, 2016).

A urbanização caótica característica de muitas cidades nos trópicos desempenha um papel determinante na criação de microclimas favoráveis à proliferação de vetores (CASTELHANO *et al.*, 2022; FOGAÇA, 2024; MENDONÇA; ARAÚJO; FOGAÇA, 2014).

O fenômeno das ilhas de calor urbanas, amplamente estudado pela climatologia geográfica, refere-se à elevação significativa das temperaturas em áreas densamente construídas e com reduzida cobertura vegetal em comparação com as regiões rurais ou arborizadas do entorno. Esse fenômeno impacta a dinâmica da dengue por meio de três mecanismos principais.

- Em primeiro lugar, o aumento das temperaturas médias, especialmente das mínimas noturnas que se elevam devido à liberação do calor acumulado pelo concreto ao longo do dia, reduz o ciclo de desenvolvimento do *Aedes aegypti*. Nessas condições, a fêmea do mosquito digere o sangue mais rapidamente e, consequentemente, realiza maior número de repastos sanguíneos em um intervalo de tempo menor, ampliando as oportunidades de transmissão viral.

- Em segundo lugar, as temperaturas mais elevadas aceleram a maturação do vírus dentro do organismo do vetor, encurtando o chamado período de incubação e tornando o mosquito infectante mais precocemente.

- Em terceiro lugar, as ilhas de calor criam verdadeiros refúgios térmicos durante o inverno, particularmente em cidades localizadas em regiões de clima mais ameno do Sul do Brasil. Mesmo quando as temperaturas regionais caem para níveis que teoricamente inviabilizariam a sobrevivência do vetor, os centros urbanos e bairros densamente construídos mantêm-se aquecidos, permitindo que mosquitos adultos, larvas e ovos sobrevivam à estação fria e estejam prontos para eclodir e se

reproduzir tão logo as primeiras chuvas da primavera se manifestem (MENDONÇA, 2015; ROSEGHINI, 2013).

A expansão recente da dengue para regiões de clima subtropical no Sul do Brasil tem sido objeto de investigações detalhadas. Nessas áreas, onde a doença se tornou endêmica mais tardiamente em comparação com as regiões Norte e Nordeste, a combinação entre aquecimento regional e intensa mobilidade humana tem criado condições propícias para a disseminação do vetor e do vírus. Estudos demonstram que anomalias positivas de temperatura, associadas a padrões específicos de pluviosidade, atuam como gatilhos para a deflagração de epidemias. No entanto, esses fatores climáticos, embora necessários, não são suficientes: a densidade demográfica elevada e a precariedade da infraestrutura urbana funcionam como catalisadores que potencializam o impacto das condições ambientais favoráveis, transformando surtos localizados em epidemias de grande magnitude (FOGAÇA, 2017).

A dimensão espacial da dengue e de outras arboviroses tem sido sistematicamente investigada por meio de ferramentas de geoprocessamento aplicadas à vigilância em saúde. Essas abordagens permitem compreender como as mudanças climáticas em curso estão progressivamente expandindo as fronteiras de transmissão das doenças. É importante ressaltar que a mudança climática não cria, por si só, enfermidades inteiramente novas. No entanto, ela altera de forma significativa a magnitude e a distribuição espacial das doenças já existentes, exacerbando as vulnerabilidades sociais previamente estabelecidas e expondo populações anteriormente não afetadas ao risco de transmissão (BARCELLOS *et al.*, 2009). Nesse contexto, o trabalho desenvolvido por observatórios de clima e saúde tem sido fundamental para traduzir dados meteorológicos complexos em informações aplicáveis à formulação de políticas públicas de prevenção, integrando bases de dados ambientais e epidemiológicas em sistemas de alerta e monitoramento.

Segundo SOEK et al (2023), a modelagem baseada em modelos do IPCC como o CMIP6 emerge, nesse cenário, como ferramenta de crescente importância para antecipar a ocorrência de surtos e orientar a alocação de recursos pelos sistemas de saúde. A compreensão da geografia da saúde na contemporaneidade exige o domínio de duas escalas analíticas distintas, porém complementares. A escala macro ou

regional é dominantemente investigada por meio de modelos preditivos baseados em grandes bancos de dados climáticos, capazes de identificar padrões e tendências em amplos territórios. A escala micro ou local, por sua vez, permite analisar como a estrutura intraurbana e suas alterações térmicas influenciam diretamente a biologia dos vetores e as condições de exposição das populações. A transição da epidemiologia descritiva, que tradicionalmente reage ao aumento de casos notificados, para uma epidemiologia preditiva de caráter probabilístico, tem sido viabilizada pelo uso de variáveis climáticas como preditores antecipados, ou seja, como indicadores capazes de sinalizar com antecedência a probabilidade de ocorrência de epidemias.

A metodologia empregada nesses modelos avançados frequentemente utiliza abordagens estatísticas sofisticadas, como os modelos hierárquicos bayesianos. Diferentemente das correlações lineares simples, que poderiam sugerir, de forma equivocada, que mais chuva implica diretamente mais casos de dengue, esses modelos incorporam a complexidade temporal do processo de transmissão. Eles consideram, por exemplo, a defasagem temporal entre a ocorrência das condições ambientais favoráveis e a manifestação dos casos clínicos. A chuva que cai em determinado dia não gera casos de dengue imediatamente, pois é necessário computar o tempo necessário para a eclosão dos ovos, o desenvolvimento das larvas até a fase adulta, a infecção do mosquito pelo vírus e o período de incubação até que o vetor se torne infectante. Esse intervalo pode variar entre três e cinco semanas, e os modelos são calibrados para ajustar matematicamente essa variável.

Além dos fatores climáticos, estes modelos incorporam variáveis não climáticas de grande relevância, como a imunidade de rebanho, que indica a proporção da população já exposta a determinado sorotipo viral e, portanto, protegida contra nova infecção por esse mesmo sorotipo, e a densidade demográfica das áreas analisadas. A abordagem bayesiana permite ainda quantificar a incerteza associada às previsões, oferecendo aos gestores de saúde uma probabilidade de risco expressa em termos como a chance de o número de casos ultrapassar determinado limiar epidêmico.

Essa modelagem integra ainda previsões climáticas sazonais de escala global, como as anomalias de temperatura da superfície do mar no Pacífico Equatorial associadas aos fenômenos El Niño e La Niña, permitindo antecipar surtos com meses

de antecedência. Dessa forma, torna-se possível que o setor de saúde se prepare antes mesmo da chegada das primeiras chuvas de verão, tradicionalmente associadas ao aumento da proliferação do vetor. A combinação entre previsões climáticas em tempo real e dados de vigilância epidemiológica cria, assim, uma janela de oportunidade para intervenções preventivas que podem ser implementadas antes que o surto atinja seu pico de incidência.

Por fim, é fundamental considerar que os riscos associados à dengue não se distribuem de maneira homogênea no espaço urbano. As áreas de maior risco não são simplesmente aquelas que registram as temperaturas mais elevadas, mas aquelas nas quais a degradação ambiental urbana se sobrepõe às condições de vulnerabilidade social. Configura-se, assim, o que se pode denominar de risco híbrido: de um lado, a ilha de calor, fenômeno físico resultante da modificação antrópica do ambiente; de outro, a precariedade dos serviços de coleta de lixo, o armazenamento inadequado de água e a ausência de infraestrutura básica de saneamento, fatores de natureza eminentemente social. Essa abordagem rompe definitivamente com qualquer visão determinista que suponha que o clima afeta a todos igualmente. O clima urbano, tal como produzido pelas formas de ocupação e uso do solo, é socialmente determinado e, como tal, seus efeitos sobre a saúde são injustamente distribuídos, recaindo com maior peso sobre as populações que já experimentam as piores condições de vida e de trabalho nas cidades brasileiras.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este texto buscou apresentar o diálogo entre a Geografia da Saúde, a climatologia geográfica e o paradigma da Saúde Única para a compreensão dos complexos processos que envolvem a relação entre clima e saúde. O resgate do conceito de complexo patogênico, formulado por Maximilien Sorre em meados do século XX, revela-se completamente atual, sobretudo quando confrontado com os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela urbanização acelerada. O ambiente, na perspectiva sorreana, nunca foi mero cenário passivo onde as doenças se manifestam, mas componente ativo e estruturador das condições de possibilidade do adoecimento. Ao integrar fatores ecológicos, biológicos e sociais em uma análise

espacialmente referenciada, Sorre antecipou elementos centrais oferecendo às gerações posteriores um arcabouço analítico flexível para incorporar novas variáveis e complexidades.

É precisamente nesse ponto que o paradigma One Health encontra no legado de Sorre um fundamento teórico consistente. A noção de indissociabilidade entre saúde humana, saúde animal e saúde dos ecossistemas, cara à abordagem da Saúde Única, já se anunciava na concepção sorreana de que as endemias resultam de uma teia de relações que conecta diferentes espécies e o meio geográfico. As alterações climáticas em curso, ao impactarem populações animais e vetores, alterarem seus padrões de migração e reprodução e expandirem a distribuição geográfica de espécies antes restritas a determinadas latitudes, impõem uma releitura urgente dessas interações. A vigilância de epizootias, como a ocorrência de febre amarela em primatas não humanos, transcende o interesse estritamente veterinário para se converter em ferramenta estratégica de geografia da saúde humana, atuando como sistema de alerta precoce para surtos iminentes. Nesse sentido, mapear o adoecimento animal é também mapear trajetórias possíveis de patógenos em direção às populações humanas, em um exercício de antecipação que a climatografia rítmica e a modelagem espacial tornam cada vez mais preciso.

O caso da dengue, examinado à luz desses referenciais, ilustra com clareza a insuficiência de abordagens fragmentadas. A doença, que persiste como grave problema de saúde pública no Brasil, não pode ser adequadamente enfrentada por meio de campanhas episódicas de "fumacê" ou exclusivamente pelo tratamento clínico dos casos já estabelecidos. Sua dinâmica espaço-temporal, fortemente influenciada pelas variações térmicas e higrométricas que a climatologia geográfica se dedica a compreender em sua dimensão rítmica, exige intervenções igualmente rítmicas e territorialmente diferenciadas. A modelagem preditiva, ao incorporar variáveis climáticas, ambientais e sociais em modelos hierárquicos capazes de quantificar incertezas e antecipar cenários, oferece aos gestores de saúde uma janela de oportunidade preciosa para a alocação eficiente de recursos e a implementação de medidas preventivas antes que os surtos atinjam seu pico de incidência. A transição da epidemiologia reativa para a epidemiologia preditiva, ainda que em

estágio inicial, representa um avanço civilizatório no modo como sociedades democráticas podem proteger suas populações mais vulneráveis.

Por fim, é imperativo reconhecer que os efeitos das mudanças climáticas sobre a saúde não se distribuem de maneira homogênea no espaço social. As ilhas de calor urbanas, fenômeno amplamente estudado pela climatologia geográfica, não afetam indistintamente todos os moradores da cidade: sua intensidade é maior justamente nas áreas onde o poder público investiu menos em áreas verdes e onde a impermeabilização do solo é mais acentuada, frequentemente coincidentes com territórios de ocupação popular e infraestrutura precária. A abordagem da Saúde Única, ao incorporar essa dimensão de justiça ambiental, convoca a Geografia da Saúde a assumir um compromisso ético e político com a produção de conhecimentos que subsidiem a formulação de políticas públicas capazes de reduzir, e não reproduzir, as iniquidades em saúde. O planejamento territorial que considera a variabilidade climática e adota a perspectiva integradora do One Health não é apenas tecnicamente mais eficaz, mas socialmente mais justo, por reconhecer que a saúde é produto do equilíbrio, ou desequilíbrio, entre sociedade e natureza, e que esse equilíbrio se joga cotidianamente na produção do espaço urbano e nas condições concretas de vida das populações.

REFERÊNCIAS

ALEIXO, N. C. R. **Pelas lentes da climatologia e da saúde pública**: doenças hídricas e respiratórias na cidade de Ribeirão Preto/SP. 2012. 353 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.

ALEIXO, N. C. R.; SANT'ANNA NETO, J. L. Clima e saúde: diálogos geográficos. **Revista Geonorte**, v. 8, n. 30, p. 78-103, 2017.

BARCELLOS, C. *et al.* Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, DF, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009.

BARCELLOS, Christovam; BUZAI, Gustavo D.; HANDSCHUMACHER, Pascal. Geografia e saúde: o que está em jogo? História, temas e desafios. **Confins**, [s. l.], n. 37, 2018.

CAMINADE, C.; MCINTYRE, K. M.; JONES, A. E. Impact of recent and future climate change on vector-borne diseases. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 157–173, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1111/nyas.13950. Acesso em: 19 out. 2026.

CASTELHANO, Francisco Jablinski *et al.* The impact of long-term weather changes on air quality in Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 283, art. 119182, 2022.

COBELO, Igor *et al.* The impact of wildfires on air pollution and health across land use categories in Brazil over a 16-year period. **Environmental Research**, v. 224, art. 115522, 2023.

ELLWANGER, Joel Henrique; CHIES, José Artur Bogo. Saúde Única (One Health): uma abordagem para entender, prevenir e controlar as doenças infecciosas e parasitárias. **Bio Diverso**, v. 2, n. 1, p. 1-15, 2022.

FIOCRUZ. Observatório de Clima e Saúde. **Portal Clima e Saúde**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2024. Disponível em: https://climaesaude.icict.fiocruz.br/. Acesso em: 24 set. 2024.

FOGAÇA, T. K. **Geografia da Saúde**. Curitiba: Intersaberes, 2024. v. 2.

FOGAÇA, T. K.; CASTELHANO, F. J.; MENDONÇA, F. Clima e saúde: a dengue na região Sul do Brasil. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 21, n. 1, p. 119-135, 2017.

FONSECA, Elivelton da Silva *et al.* Saúde Única e Ciência da Informação Geográfica em direção à eliminação da leishmaniose visceral no estado de São Paulo, Brasil. **Estrabão**, v. 5, p. 141-154, 2024.

GUIMARÃES, Raul Borges. **Saúde**: fundamentos de Geografia humana. São Paulo: Editora UNESP Digital, 2015.

GUIMARÃES, Raul Borges; CATÃO, Rafael de Castro; CASAGRANDE, Baltazar. Raciocínio geográfico e complexos patogênicos atuais: análise comparativa da Dengue e da Leishmaniose Tegumentar Americana. **Confins**, n. 37, 2018.

LOWE, R. *et al.* Dengue outlook for the World Cup in Brazil: an early warning model framework driven by real-time seasonal climate forecasts. **The Lancet Infectious Diseases**, v. 14, n. 7, p. 619-626, 2014.

LOWE, R. *et al.* Evaluating probabilistic dengue risk forecasts from a prototype early warning system for Brazil. **eLife**, v. 5, art. e11285, 2016.

MACHADO, Gabrielly Silva; RUBENS, Rebeca Siqueira; DALMOLIN, Tanise Vendruscolo. Abordagem One Health (saúde única) e a dengue. **Vigilância Sanitária em Debate**, Rio de Janeiro, v. 11, art. e02125, 2023.

MENDONÇA, F. Aspectos da interação clima-ambiente-saúde humana: da relação sociedade-natureza à (in)sustentabilidade ambiental. **RA'E GA: O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, n. 8, p. 57-69, 2004.

MENDONÇA, F. Clima e saúde no Brasil: da climatologia geográfica à geografia da saúde. **Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v. 11, n. 20, p. 1-19, 2015.

MENDONÇA, F. *et al.* Climate change and neglected diseases: the dengue epidemy in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 37, p. 249-274, 2023.

MENDONÇA, F.; ARAÚJO, W. M.; FOGAÇA, T. K. A geografia da saúde no Brasil: estado da arte e alguns desafios. **Investigaciones Geográficas**, Santiago, n. 48, p. 41-52, 2014.

MOORE, Julia Placido *et al.* Ambient air pollution and low birth weight in Brazil: a nationwide study of more than 10 million births between 2001 and 2018. **Chemosphere**, v. 366, art. 143469, 2024.

OLIVEIRA, A. G.; ROSEGHINI, W. F. F. A influência das temperaturas de inverno na efetividade dos ovos do *Aedes aegypti* em Curitiba, Paraná. In: MURARA, P. G. S.; ALEIXO, N. C. R. (org.). **Clima e Saúde no Brasil**. Jundiaí: Paco Editorial, 2020. v. 1, p. 1-356.

PEREIRA, Martha Priscila Bezerra. Geografia da Saúde por dentro e por fora da Geografia. **Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 17, p. 121-132, 2021.

RIBEIRO, H. *et al.* Ritmo climático e geografia da saúde. **Revista de Geografia**, Recife, v. 33, n. 4, p. 321-344, 2016.

RIZZOTTO, Maria Lucia Frizon *et al.* Saúde Única – um conceito ambíguo sob debate. **Saúde em Debate**, Rio de Janeiro, v. 48, art. e8920, 2024.

ROSEGHINI, W. F. F. **Clima urbano e dengue no centro-sudoeste do Brasil**. 2013. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANTANA, Paula. **Introdução à Geografia da Saúde**: território, saúde e bem-estar. Coimbra: Coimbra University Press, 2014.

SETTE, D. M.; RIBEIRO, H. Interações entre o clima, o tempo e a saúde humana. **InterfacEHS: Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 6, n. 2, p. 37-51, 2011.

SILVA, Breno Gonçalves da *et al.* **Saúde Única**. Curitiba: Instituto Carlos Chagas – Fiocruz Paraná, 2023.

SILVA, Reizane Maria Damasceno da *et al.* The mediating role of air pollution in the relationship between greenspace and cardiorespiratory admissions in Brazil. **Environmental Pollution**, v. 369, art. 125849, 2025.

SOEK, Felipe José *et al.* Mudanças Climáticas e Infestação por *Aedes aegypti* na Região Sul do Brasil. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 42, art. e74550, 2023. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/74550. Acesso em: 24 set. 2024.

SORRE, Maximilien. **Les Fondements de la Géographie Humaine**. Tome I: Les Fondements Biologiques. Paris: Armand Colin, 1943 (ed. rev. 1955).

SOUZA, C. G.; SANT'ANNA NETO, J. L. Geografia da saúde e climatologia médica: ensaios sobre a relação clima e vulnerabilidade. **Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v. 3, n. 6, p. 116-126, 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **One Health**. Geneva: WHO, 2017..

SAÚDE ANIMAL E HUMANA EM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E EVENTOS EXTREMOS: DESAFIOS E PERSPECTIVAS

Larissa Kaniak Ikeda Rodrigues – Universidade Federal do Paraná[1]
Fernanda Loffler Niemeyer Attademo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido[2]
Maria Luiza Rech Capuci – Universidade do Vale do Itajaí[3]
Nicole Geraldine de Paula Marques Witt – Universidade Federal do Paraná[4]

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas de origem antropogênica constituem um dos maiores desafios globais do século XXI, com efeitos que ultrapassam os limites dos ecossistemas e da biodiversidade, alcançando diretamente a saúde animal e humana (Caminade, Mclntyre e Jones, 2018; Malhi *et al.*, 2020). Os ecossistemas estão mudando rapidamente em respostas às mudanças climáticas e a outros fatores de transformações globais, não somente como respostas às mudanças de temperatura, mas também às mudanças associadas à precipitação, na concentração de dióxido de carbono atmosférico, no balanço hídrico, na química oceânica e na frequência e magnitude de eventos extremos (Malhi *et al.*, 2020).

[1]Bacharel em Ciências Biológicas, Arquitetura e Urbanismo, mestranda em Ecologia e Conservação – larissa.kaniak@ufpr.br
[2]Bacharel em Ciências Biológicas e Medicina Veterinária, Mestra em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Doutora em Ciências Animais e Pós-Doutora em Biologia Animal – niemeyerattademo@yahoo.com.br
[3]Bacharel em Ciências Biológicas, Engenheira Civil e mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental – luiza.rechh@gmail.com
[4]Licenciada e Bacharel em Ciências Biológicas, Mestra em Agronomia e doutoranda em Ecologia e Conservação – nicabio@ufpr.br

O aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, incêndios florestais, enchentes e tempestades, acarreta alterações profundas na dinâmica ecológica, potencializando a perda de habitats, a mortalidade em massa, o deslocamento de populações, os conflitos por recursos naturais, a produção de alimentos (Malhi *et al.*, 2020) e mudanças significativas no uso e ocupação da terra (França *et al.*, 2020). Evidências empíricas apontam que extremos climáticos tendem a desencadear mais mudanças abruptas em sistemas ecológicos do que mudanças graduais (Malhi *et al.*, 2020; Turner *et al.*, 2020). Muitas vezes, a depender do tipo, intensidade e duração do evento, ecossistemas inteiros são modificados a ponto do não retorno à condição original. Como exemplo, eventos de seca extrema combinada com incêndio florestal incitam a substituição de florestas por campos arbustivos e/ou herbáceos (Turner *et al.*, 2020).

Em conjunto, tais eventos intensificam as ameaças sanitárias ao modificar a dinâmica de doenças infecciosas, comprometer a disponibilidade de água e alimentos e impor situações de estresse fisiológico a diferentes espécies da flora e da fauna. De forma associada, favorecem a disseminação de vetores, alteram habitats de espécies hospedeiras e aumentam a exposição de animais a contaminantes ambientais, criando condições propícias ao surgimento e à reemergência de enfermidades, incluindo a iminente seleção de bactérias resistentes. Muitas dessas doenças assumem caráter zoonótico, ampliando o risco de transmissão entre animais e humanos e revelando a dimensão epidemiológica das mudanças ambientais em escala planetária.

Diante disso, as mudanças climáticas configuram uma emergência global de saúde que, ao afetar simultaneamente humanos, animais e ecossistemas e favorecer a disseminação de zoonoses, exige a adoção da Saúde Única (Uma Só Saúde). Esta abordagem propõe políticas integradas, vigilância eficaz e manejo ambiental voltado à mitigação dos impactos antropogênicos, incluindo o avanço das doenças sensíveis ao clima (Conn & Magalhães, 2024).

Compreender os efeitos das mudanças climáticas sobre a saúde animal, em um contexto ecossistêmico que envolve populações, comunidades, ecossistemas e paisagens, é fundamental para antecipar cenários de risco, desenvolver estratégias de mitigação e fortalecer sistemas de monitoramento e resposta a emergências (Malhi

et al., 2020). Estudos recentes têm mostrado que, além dos efeitos diretos sobre os ecossistemas, as mudanças climáticas podem favorecer o surgimento de pandemias, que tendem a se tornar mais frequentes nas próximas décadas (Caminade; McIntyre e Jones, 2018; Destoumieux-Gárzon *et al.*, 2018).

A literatura das ciências ambientais tem avançado na análise das interações entre mudanças climáticas e emergências ambientais de diferentes ordens — secas, inundações e incêndios —, mas ainda são incipientes as discussões que vinculam de forma explícita a saúde animal, a saúde humana e a saúde ambiental no escopo das alterações climáticas (Destoumieux-Garzón *et al.*, 2018). Nesse contexto, as mudanças climáticas devem ser entendidas como uma emergência de Saúde Única, com impactos diretos e interdependentes, que exigem a formulação de políticas públicas eficazes, a promoção de ações preventivas e a ampliação da vigilância integrada.

Este capítulo busca, portanto, discutir as consequências das mudanças climáticas e dos eventos extremos para a saúde animal, relacionando-as aos princípios da Saúde Única e destacando os reflexos para a saúde humana e para os ecossistemas.

2 AUMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA DA TERRA E ONDAS DE CALOR

O efeito estufa é um fenômeno natural e de vital importância no sistema climático terrestre, pois a atmosfera funciona como um cobertor, o vapor de água, CO_2, metano e outros gases presentes nela, aprisionam a radiação de ondas longas recebidas do sol, aquecendo o planeta a uma temperatura média de 14ºC. Se não fosse isso, a Terra se pareceria com a Lua, com temperaturas que variam de 116ºC durante o dia e -173ºC à noite e valor médio de temperatura de -27,5ºC. No entanto, pequenas alterações nas variações dos gases de efeito estufa (GEE) resultam em mudanças significativas na temperatura média global do planeta (Campos, 2014).

As ações do homem, ao longo dos anos, têm produzido impacto planetário na atmosfera, oceanos, criosfera e biosfera. O Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas, IPCC (2023), indica que essas atividades antropogênicas estão elevando a temperatura global da Terra. Entre 2011 e 2020, a superfície da Terra

aqueceu 1,1ºC em comparação com o período de 1850 a 1900, quando os impactos da indústria ainda não eram perceptíveis na atmosfera. Cabral e Santos (2025) afirmam que junto da emissão dos GEE, o uso insustentável da energia, do uso da terra, e os elevados padrões de produção e consumo têm intensificado o efeito estufa, elevando a temperatura do planeta e acelerando o processo de mudanças climáticas.

O ano de 2024 foi o mais quente desde o início dos registros globais em 1850 e os dez anos mais quentes nestes anos de registros ocorreram na última década (2015-2024) (NOAA, 2025). Essas alterações climáticas induzidas pelo homem levaram a um aumento global na frequência, intensidade e duração de eventos de calor extremo ou ondas de calor (Turner *et al.*, 2020). Mudanças climáticas e o aquecimento global são identificadas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como os maiores desafios da humanidade que ameaçam todos os aspectos da vida (Alboredo, 2025).

De acordo com Campbell *et al.* (2018) diversos eventos de calor extremo ocorrem em todo o mundo, para citar alguns: Chicago, EUA, em 1995; Europa em 2003; sudeste da Austrália em 2009. Embora todos sejam atingidos pelo aumento das temperaturas, os impactos na saúde não são uniformes e previsíveis, fatores biológicos, ambientais, médicos, sociais e geográficos influenciam grandemente, afetando principalmente os grupos mais vulneráveis.

Para Yasobant *et al.* (2025) o calor excessivo impõe uma carga fisiológica cumulativa ao corpo humano, elevando as principais causas globais de mortalidade, como doenças respiratórias e cardiovasculares, diabetes mellitus e problemas renais. Mudanças na temperatura e nos regimes de precipitação influenciam diretamente a sobrevivência, a distribuição e o comportamento de insetos vetores, resultando em alterações na dinâmica de disseminação de doenças infecciosas (Githeko *et al.*, 2000). Esses impactos extrapolam a saúde humana, afetando também a saúde animal e ambiental, evidenciando a interdependência entre esses sistemas, conforme a abordagem de Saúde Única (Destoumieux-Garzón *et al.*, 2018).

Neste cenário de mudanças abruptas, algumas espécies podem se mostrar mais resilientes do que outras, embora todas tenham seus limites térmicos estabelecidos, que quando atingidos, podem levar à migração ou até extinção em massa, tanto de vegetação, aves, peixes, insetos, pessoas, que tendem a migrar para

regiões mais elevadas, em nível local e global (Assad, 2025). Patógenos emergentes ou introduzidos podem ter impactos devastadores na função ecológica, especialmente se os hospedeiros infectados já estiverem estressados pelas mudanças climáticas, como exemplos temos: a extinção em massa em curso de anfíbios infectados com o fungo quitrídio, *Batrachochytrium dendrobatidis*; e o vírus do Nilo Ocidental, transmitido por mosquitos, que desde quando surgiu em 1999 teve importante impacto na avifauna norte-americana, tendo, a mortalidade aviária e a incidência em humanos, associação com as mudanças na precipitação e invernos mais amenos (Turner *et al.*, 2020).

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), o oceano tem um papel vital na contenção e mitigação das mudanças climáticas. Eles cobrem aproximadamente 75% da superfície da Terra, e cerca de 3,1 bilhões de pessoas (equivalente a 40%) vivem a menos de 100km do mar, enquanto aproximadamente 150 países são costeiros ou insulares. O oceano produz 50% do oxigênio necessário para a vida na Terra (Cabral & Santos, 2025), atua como sumidouro de cerca de 25% das emissões antropogênicas de CO_2, oferecendo serviços ecossistêmicos essenciais para o equilíbrio climático, segurança alimentar, energética, hídrica e do patrimônio sociocultural (Horta *et al.*, 2020). Para Cabral e Santos (2025) sem essa absorção, os GEE poderiam ter causado danos muito maiores ao planeta. Estima-se que desde os anos 1950, cerca de 90% do calor gerado pelo acúmulo de GEE de origem antropogênica foi absorvido pelo oceano.

Contudo, o aumento da concentração de CO_2 atmosférico intensifica a acidificação dos oceanos, enquanto o aquecimento da água diminui a sua capacidade de absorver e reter o carbono, processos que afetam a biodiversidade marinha e os setores de pesca, impactando economias costeiras. Já o aumento da temperatura média global e as ondas de calor, promovem o aumento no nível do mar, que ocasiona a perda de habitats, erosão costeira, inundações, salinização de corpos de água doce, entre outros (Campos, 2014; Cabral & Santos, 2025). Projeções do IPCC (2023) indicam que, ao longo de aproximadamente 2.000 anos, o nível médio do oceano pode se elevar entre 2 e 3 metros caso o aquecimento global seja limitado a 1,5ºC, podendo alcançar até 6 metros se a temperatura média global atingir 2ºC (Cabral & Santos,

2025). No entanto, esse aumento não é homogêneo, ocorrendo de forma desigual em diferentes partes do globo.

Visto que mais de 90% do excesso de calor no sistema terrestre é absorvido pelo oceano, as temperaturas globais dos oceanos em 2024 atingiram quinze meses consecutivos de temperaturas recordes (de abril de 2023 a junho de 2024), cada mês superando o anterior em pelo menos 0,15ºC (NOAA, 2025). Os altos níveis de aquecimento máximo e exposição prolongada da ultrapassagem da temperatura para além do seu limiar de inflexão implicam em danos irreversíveis aos recifes de corais.

De acordo com Lenton *et al.* (2025) recifes de corais de águas quentes (tropicais e subtropicais), são o ecossistema mais biodiverso do mundo, abrigando cerca de um terço de toda a biodiversidade marinha conhecida. Ademais, fornecem habitat para mais de oitocentas mil espécies e contribuem com até US$ 9,9 trilhões anuais em bens e serviços dos quais um bilhão de pessoas se beneficiam. Nesse sentido, a degradação dos recifes e das espécies que dependem deles ameaça não só a perda da biodiversidade, mas também a subsistência de pessoas vulneráveis que vivem em países menos desenvolvidos. Esse processo escancara mais uma vez a interdependência entre a saúde ambiental, animal e humana.

Para a sobrevivência de sistemas recifais, é essencial que o aquecimento global seja limitado a 1,2ºC em relação à média do período pré-industrial, porém esta marca já foi ultrapassada e o seu limite térmico superior de 1,5ºC poderá ser alcançado na próxima década. O aumento a partir de 2ºC somado à acidificação oceânica irá ocasionar perdas severas da biodiversidade destes ecossistemas, comprometendo até 50% a calcificação de corais, e, junto da poluição, reduzir de 90 a 100% a produção primária destes organismos construtores (Lenton *et al.*, 2025). As temperaturas extremamente altas da superfície do mar em grande parte dos oceanos tropicais e extratropicais de 2015-2016 causaram um dos eventos de branqueamento em massa mais fortes em escala mundial, resultaram em níveis sem precedentes de mortalidade de corais e alteraram a composição da comunidade de corais e peixes na Grande Barreira de Corais, além de impactarem no achatamento da estrutura do recife, na perda de produção de carbonato, na formação de novas comunidades de peixes persistentes e perturbações ecológicas multitróficas síncronas (França *et al.*, 2020).

Estressores locais, como a sobrepesca, a poluição terrestre, doenças, sedimentação e a sobrecarga de nutrientes atuam em sinergia com as mudanças climáticas globais, retardam o processo de recuperação e levam as comunidades de corais aos seus limites de estresse fisiológico, causando o branqueamento generalizado. Os eventos climáticos extremos influenciam fortemente os ecossistemas marinhos, chuvas intensas, tempestades e furacões são fatores importantes de mudanças na dinâmica dos recifes costeiros ao desencadear transições de regime da dominância de corais para a de macroalgas que levam ao declínio da cobertura de coral (França *et al.*, 2020). Em 2013, uma intensa onda de calor marinha atingiu o Oceano Pacífico, ao longo da costa oeste da América do Norte, promovendo elevações de temperatura de até 5 °C. Esse evento comprometeu a produtividade do fitoplâncton e desencadeou efeitos em cascata em toda a cadeia alimentar marinha, afetando organismos desde o krill até grandes vertebrados, como baleias, além de peixes comerciais, incluindo salmões, arenques e sardinhas, e aves marinhas. Como consequência, foram registrados encalhes de baleias e leões-marinhos na costa da Califórnia, além de impactos severos sobre as atividades pesqueiras locais. O aquecimento das águas também eleva o risco de derretimento de geleiras na Antártida, contribuindo ainda mais para a elevação dos mares. Na Groenlândia, o potencial derretimento do permafrost pode resultar na liberação de vírus e bactérias nele preservados há muito tempo (Assad, 2025), colocando em risco a saúde única global.

Para Campos (2014) o Oceano Atlântico, apesar de não tão extenso como o Pacífico, também contribui para o clima mundial, em especial para as Américas, sendo fator determinante no sistema de monções da América do Sul. Análises de registros climáticos e hidrológicos mostraram que a seca de 2005 na Amazônia, foi causada pelo aumento anormal da temperatura do Oceano Atlântico, que pode estar relacionado ao aquecimento global. Em conjunto, Horta *et al.* (2020) afirmam que a zona costeira brasileira exerce um papel central na adaptação às mudanças climáticas. O Brasil possuí uma das maiores faixas de costa do mundo e a sua zona econômica exclusiva é conhecida como Amazônia Azul, pois equivale, em superfície, à área da Amazônia Legal. Porém, apesar do importante papel desempenhado, estes ecossistemas encontram-se em vulnerabilidade justamente pelo aquecimento e

acidificação do oceano, elevação do nível do mar, invasões biológicas, poluição, sobrepesca, entre outros estressores. Habitats como marismas, manguezais e recifes de corais, além de florestas submersas formadas por gramas marinhas, macroalgas e rodolitos, atuam diretamente na manutenção da biodiversidade, produção de O_2 e absorção do CO_2 da atmosfera. Estudos recentes, feitos no litoral brasileiro, relatam alterações fisiológicas da fauna e da flora marinha, e reforçam o declínio de espécies de macroalgas que compõem as florestas submersas, que têm seu ciclo de vida profundamente afetado pelo aquecimento global e acidificação dos oceanos (Horta *et al.*, 2020).

O aquecimento global, intensificado por ondas de calor mais frequentes e prolongadas, tem atuado como fator central na amplificação de eventos extremos, como secas e incêndios florestais, com efeitos profundos sobre ecossistemas tropicais. Em florestas tropicais, esses eventos elevam o estresse térmico e hídrico, resultando em aumento da mortalidade de árvores, empobrecimento das comunidades biológicas e perda de grupos funcionais, além de promover mudanças na composição de espécies em direção àquelas mais adaptadas a ambientes secos, mesmo em regiões historicamente úmidas, como a Amazônia (França *et al.*, 2020). De forma convergente, o Pantanal tem apresentado uma intensificação expressiva da seca associada ao aumento das temperaturas, com redução acentuada da duração e extensão das áreas alagadas, aproximando o bioma de um possível ponto de não retorno ecológico (WWF-Brasil *et al.*, 2024). Esse processo compromete a biodiversidade, os modos de vida tradicionais e atividades econômicas dependentes do equilíbrio hidrológico, além de afetar a produção de energia hidrelétrica na Bacia do Alto Paraguai.

Portanto, essas evidências indicam que o aquecimento global e a intensificação das ondas de calor não atuam de forma isolada, mas funcionam como vetores centrais na deflagração e no agravamento de outros eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, incêndios florestais, alterações hidrológicas e perda de habitats. Esse encadeamento de processos desencadeia uma cascata de impactos socioambientais, conectando diretamente as mudanças climáticas ao colapso de ecossistemas e à ampliação das vulnerabilidades humanas, econômicas e ecológicas, incluindo a saúde coletiva, animal e ambiental.

3 ESTIAGEM E SECA EXTREMA

A seca é um dos processos mais severos resultantes das mudanças climáticas (Salvador *et al.*, 2023). O reflexo deste fenômeno pode ser verificado na saúde humana, animal e dos ecossistemas, tanto pela escassez de água e alimento quanto pelo aumento de doenças. Ou seja, o aumento da disseminação de patógenos zoonóticos por causa do estresse de temperatura pode ocorrer de forma mais frequente cada vez mais (Acevedo-Whitehouse *et al.*, 2009). Importante destacar que o impacto das mudanças climáticas é desproporcional. A estiagem e a escassez de água é mais intensa e frequente sobre as populações marginalizadas, particularmente em regiões de baixa renda e onde os serviços públicos não chegam de forma satisfatória, ressaltando a necessidade urgente de estratégias equitativas e inclusivas (Ferraz & Vidal, 2025). De forma concomitante, a seca contribui para a perda da biodiversidade com redução ou extinção local de espécies fundamentais para o funcionamento e resiliência dos ecossistemas (Ellwanger *et al.*, 2020; Basiri, 2024).

Ellwanger *et al.* (2020) enfatizam que o histórico e progressivo desmatamento amazônico contribui para o aquecimento regional e global, alterando os padrões de chuva e aumentando a frequência de eventos climáticos extremos, incluindo secas severas. De acordo com estes autores, as secas reduzem a umidade da floresta, facilitam incêndios e comprometem os serviços ecossistêmicos que regulam o clima e a disponibilidade de água. Dessa forma, esse cenário impacta diretamente a saúde humana ao aumentar a incidência e a prevalência de doenças respiratórias, especialmente em função da exposição à poluição atmosférica por fumaça. Adicionalmente, de maneira indireta, favorece a ocorrência de surtos de doenças infecciosas, ao alterar a dinâmica de vetores e comprometer a disponibilidade e a qualidade da água potável, elevando o risco de doenças zoonóticas e de veiculação hídrica (Ellwanger *et al.*, 2020).

As mudanças climáticas alteram profundamente a ecologia e os ciclos de vida de vetores, criando condições favoráveis à sua reprodução e à intensificação da transmissão de doenças veiculadas por vetores, alimentos e água (Basiri, 2024). O aquecimento global, associado a períodos prolongados de seca e a alterações nos

regimes de temperatura e precipitação, modifica a dinâmica ecológica dessas enfermidades, ampliando a incidência de zoonoses e reforçando a relevância de uma abordagem integrada baseada no conceito de Saúde Única. Esses processos evidenciam que o aumento da temperatura, a escassez hídrica e as mudanças nos padrões de chuva afetam diretamente a ocorrência, a distribuição e a persistência dessas doenças.

Em consonância, o aumento da temperatura da água pode comprometer sua qualidade, elevando o risco de contaminação, especialmente durante eventos extremos e desastres naturais (Basiri, 2024). A redução de áreas alagadas tende a concentrar o descarte de águas residuais em espaços cada vez mais limitados, resultando em maiores cargas de contaminantes. Em contextos de escassez hídrica, populações humanas e animais passam a depender de fontes de água com maior grau de contaminação, o que intensifica os riscos à saúde. Ressalta-se que esses impactos são mais pronunciados em regiões com menor disponibilidade de recursos financeiros, onde políticas públicas de saneamento e saúde frequentemente são insuficientes ou implementadas de forma tardia, agravando desigualdades socioambientais.

A escassez de água e o aumento da frequência e intensidade de eventos de seca, impactam também a vida selvagem. Em animais, fisiologicamente, a falta da ingestão de água induz à desidratação, a desequilíbrios eletrolíticos e falha multiorgânica, o que compromete as respostas imunes inatas e adaptativas, como a redução na imunidade celular mediada (Fagre *et al.*, 2025). Além da desidratação e estresse térmico, os animais podem sofrer por escassez de recursos alimentares, o que consequentemente eleva as taxas de mortalidade e a ameaça de extinção local e global de diversas espécies (Boersma *et al.*, 2022). Ademais, uma vez que a ausência de recursos hídricos e alimentares pode alterar comportamento de forrageamento e termorregulação, a ocorrência e distribuição de espécies também pode sofrer alteração. A seca ainda pode atrasar ou falhar a reprodução ao limitar acesso a parceiros e alimento (Crawford *et al.*, 2022). Esses impactos fisiológicos e biológicos, incluindo imunossupressão e perda de condição corporal, reduzem a aptidão geral e aumentam vulnerabilidade a predadores e doenças principalmente em ecossistemas áridos e semiáridos (Vieira *et al.*, 2008).

O Nordeste brasileiro expressa, de forma contínua e histórica, a recorrência dos processos de seca no Brasil. Desde o século passado, o tema tem sido amplamente abordado nos meios de comunicação e no debate político; contudo, permanece uma realidade latente e persistente em grande parte da região. A escassez de alimentos decorrente desses eventos contribui para quadros de subnutrição e para o agravamento da fome no país. Ao longo das últimas décadas, diferentes políticas públicas foram implementadas com o objetivo de mitigar ou reverter esses impactos; entretanto, diante da aceleração das mudanças climáticas, tais medidas nem sempre acompanham a velocidade e a intensidade dos efeitos observados. Destaca-se, ainda, que as causas das secas não se restringem a fatores locais, estando intrinsecamente associadas a condicionantes políticos, históricos e geográficos de maior escala.

Diante do cenário de seca extrema, a sobrevivência de diversas espécies da fauna fica ameaçada. Na região amazônica durante os anos de 2023 e 2024, a grande mortandade de cetáceos (*Inia geoffrensis* e *Sotalia fluviatilis*) e peixes-bois-da-Amazônia (*Trichechus inunguis*) chamou grande atenção (Fritzen & Silva, 2025). Neste período foram registrados centenas de golfinhos mortos em decorrência das altas temperaturas da água, bem como possível desenvolvimento de doenças por esta razão. De acordo com os mesmos autores, de forma indireta, ocorreu o aumento da morte de peixes-bois, pois com a diminuição das áreas alagadas, estes animais ficaram restritos em áreas menores de água e com isso mais susceptíveis à caça. Cita-se estes episódios como exemplos de diminuição da biodiversidade, porém efeitos semelhantes podem ocorrer em diversas espécies da fauna e da flora. Vale observar que as causas de mortalidade não foram todas especificamente a falta de água ou alimento, nem mesmo de doenças, mas sim a redução de área disponível para a espécie, como ocorreram com os peixes-bois e o consequente aumento da caça.

De forma associada, a seca provoca a perda não apenas de espécies da fauna, mas também da flora, intensificando outros eventos extremos, como ondas de calor e incêndios florestais. A escassez de água já constitui uma realidade em diversos países, sobretudo naqueles em desenvolvimento, onde a pobreza é predominante. A crescente exploração de lençois freáticos e o esgotamento de fontes naturais de água representam impactos globais significativos, comprometendo a saúde do planeta

como um todo. Embora alguns países com maior capacidade econômica tenham investido em tecnologias como o aprimoramento do tratamento de água e a dessalinização, essas soluções permanecem restritas a poucas regiões do mundo. Nesse sentido, pode-se afirmar, de forma metafórica, que a seca assume contornos de uma pandemia silenciosa, cuja “cura” está limitada aos grupos humanos mais favorecidos; contudo, à medida que seus efeitos se ampliam e se intensificam globalmente, nem mesmo esses estarão imunes às consequências da escassez hídrica.

4 INCÊNDIOS FLORESTAIS

O fogo é um agente natural e fundamental ao funcionamento de vários ecossistemas e um importante agente regulador da biodiversidade. Contudo, também pode atuar como força negativa em locais onde a dinâmica do fogo não é natural ou quando este se apresenta em intensidade, duração, extensão, época e frequência diferente da habitual (González *et al.*, 2022).

Nesse cenário de dinâmica não natural do fogo, os incêndios florestais configuram um fenômeno ambiental intimamente associado às mudanças climáticas afetando diretamente a saúde humana, animal e a integridade dos ecossistemas (Gonzáles *et al.*, 2022). O aumento da frequência e intensidade de secas prolongadas, impulsionado pelo aquecimento global, reduz a umidade do solo e da vegetação, criando condições altamente inflamáveis que favorecem a propagação de incêndios de grande escala (Aragão *et al.*, 2018; IPCC, 2021). Esse contexto estabelece um ciclo de retroalimentação perigoso: as queimadas liberam grandes volumes de gases de efeito estufa, como CO_2, CH_4 e N_2O, intensificando as mudanças climáticas que, por sua vez, ampliam a predisposição a novos eventos de fogo (van der Werf *et al.*, 2017).

Incêndios florestais de grande magnitude promovem alterações significativas no uso e cobertura do solo, gerando mudanças duradouras na estrutura da vegetação e na composição das assembleias faunísticas (Peres, 1999; Chia *et al.*, 2015). Além da mortalidade direta, muitos indivíduos são forçados a dispersar para áreas limítrofes, onde frequentemente encontram habitats inadequados, o que reduz sua

sobrevivência, sucesso reprodutivo e capacidade de realizar serviços ecológicos, como por exemplo, a dispersão de sementes e controle de cascatas tróficas. Essas transformações implicam *feedbacks* sobre a regeneração da paisagem e podem acelerar transições de uso do solo (p. ex. de floresta para pastagem ou matorral), especialmente quando incêndios são intensos ou recorrentes. Como consequência, a recorrência desse padrão de incêndios ao impedir a recuperação da vegetação, reduz a disponibilidade de recursos alimentares e de refúgio, o que dificulta o restabelecimento das comunidades faunísticas (Chia *et al.*, 2015; Leahy *et al.*, 2015).

De forma adicional, funções ecológicas essenciais, como regulação climática, ciclagem de nutrientes e controle biológico, as quais por sua vez influenciam a dinâmica de vetores, a emergência de zoonoses e a resiliência de comunidades humanas expostas, também são impactadas pela frequência e intensidade dos incêndios (Destoumieux-Garzón *et al.*, 2018; Myers *et al.*, 2013). Em ecossistemas perturbados, espécies oportunistas tendem a proliferar, enquanto espécies sensíveis declinam, alterando cadeias tróficas e favorecendo desequilíbrios ecológicos que podem repercutir em riscos sanitários adicionais.

Essas alterações também repercutem profundamente nas populações humanas que dependem das florestas para moradia, coleta de recursos e manutenção de seus modos de vida. Comunidades que vivem no interior ou no entorno desses ambientes enfrentam tanto perdas materiais diretas, como destruição de residências e infraestrutura, quanto efeitos indiretos decorrentes da degradação ambiental, incluindo piora da qualidade do ar, escassez de recursos naturais e maior vulnerabilidade a doenças respiratórias e infecciosas associadas ao estresse ambiental e às mudanças microclimáticas (Johnston *et al.*, 2012; Marengo & Espinoza, 2016). Nesse contexto, a saúde humana é afetada de forma multidimensional, evidenciando a interdependência entre os sistemas ecológicos, sociais e sanitários.

No Brasil, incêndios florestais associados ao desmatamento e intensificados pelas mudanças climáticas, não só aceleram a perda de biodiversidade e modificam o uso do solo, como também constituem uma das principais fontes de poluição atmosférica, contribuindo para níveis elevados de material particulado fino (MP2,5) e gases tóxicos (Reddington *et al.*, 2015). Estudos demonstram que episódios de queimadas na Amazônia e no Cerrado estão diretamente relacionados ao aumento

de internações por doenças respiratórias, especialmente em crianças e idosos, grupos mais sensíveis aos efeitos da fumaça (Ignotti *et al.*, 2010; Cascio, 2018). Segundo o relatório O Ar É Insuportável, áreas próximas a locais que ocorrem queimadas e incêndios frequentes podem ficar dois meses com qualidade do ar imprópria para a manutenção da saúde (Human Rights Watch, IEPS e IPAM, 2020).

Ao mesmo tempo, evidências indicam que florestas afetadas pelo fogo no sudoeste da Amazônia apresentam redução significativa da capacidade de regeneração, com perda de aproximadamente 33% da diversidade nos primeiros cinco anos após o incêndio. Avaliações baseadas em mais de 180 censos de inventários florestais mostram que, mesmo após 31 anos, essas florestas não se recuperam plenamente, mantendo um estoque de biomassa cerca de 25% inferior ao de áreas intactas, em decorrência da elevada mortalidade de árvores adultas, especialmente nos primeiros 11 anos pós-fogo. O impacto atinge de forma desproporcional árvores de grande porte e alta densidade de madeira (DAP > 40 cm; > 0,7 g/cm³), responsáveis por cerca de 40% da biomassa florestal, resultando na redução de 30% a 70% de espécies de alto valor madeireiro e não madeireiro. Embora espécies como açaí, seringueira e castanheira resistam inicialmente ao fogo, a degradação prolongada compromete a estrutura e a funcionalidade do ecossistema (Araújo *et al.*, 2024). Esses resultados evidenciam que os efeitos dos incêndios florestais extrapolam a Amazônia, indicando riscos semelhantes para outros biomas tropicais e subtropicais, onde o fogo, intensificado por mudanças climáticas e pressões antrópicas, pode desencadear perdas duradouras de biodiversidade, serviços ecossistêmicos e resiliência ambiental.

O Brasil teve em 2024 a pior temporada de incêndios florestais em sete décadas. Dados do Monitor do Fogo do MapBiomas indicam que, entre janeiro e dezembro de 2024, 30,8 milhões de hectares foram queimados no Brasil, um aumento de 79% em relação a 2023, representando a maior área queimada registrada desde 2019 pelo Monitor do Fogo. Desse total, 73% corresponderam a vegetação nativa, com destaque para formações florestais, enquanto as pastagens concentraram 6,7 milhões de hectares entre as áreas agropecuárias (MapBiomas, 2025a).

A Amazônia foi o bioma mais afetado, concentrando 17,9 milhões de hectares queimados, o equivalente a 58% da área total queimada no país, configurando o maior

registro dos últimos seis anos. Pela primeira vez, as formações florestais (6,8 milhões de hectares) superaram as pastagens (5,8 milhões de hectares), evidenciando uma mudança preocupante no padrão do fogo em um bioma onde incêndios não fazem parte da dinâmica ecológica natural. Esse cenário foi associado a um regime de chuvas abaixo da média histórica, intensificado pelos efeitos do El Niño 2023–2024 (MapBiomas o, 2025a) e ampliado por focos de queimadas intencionais para a limpeza de pasto e derrubada de florestas e pelo próprio desmatamento que aumenta a fragmentação da floresta e os efeitos de borda (Araújo *et al.*, 2024).

No Cerrado, foram queimados 9,7 milhões de hectares, sendo 85% em vegetação nativa, com aumento de 47% em relação à média dos últimos seis anos, refletindo a intensificação do fogo em períodos de seca e a crescente pressão antrópica sobre o bioma. O Pantanal registrou 1,9 milhão de hectares queimados, valor 64% acima da média histórica, associado à seca extrema de 2024, enquanto a Mata Atlântica apresentou 1 milhão de hectares queimados, área superior à soma registrada entre 2019 e 2023, com impactos relevantes sobre remanescentes florestais não adaptados ao fogo. Em contraste, o Pampa (3,4 mil hectares) e a Caatinga (330 mil hectares) apresentaram redução da área queimada em relação a anos anteriores, influenciadas por condições climáticas específicas associadas ao El Niño. Em termos espaciais, os estados do Pará, Mato Grosso e Tocantins responderam conjuntamente por 55% da área queimada nacional, com destaque para os municípios de São Félix do Xingu (PA) e Corumbá (MS). Apenas em dezembro de 2024, foram queimados 1,1 milhão de hectares, dos quais 88% ocorreram na Amazônia, reforçando a persistência do fogo em áreas florestais e de pastagem mesmo no final do ano (MapBiomas, 2025a).Dados da mesma plataforma, evidenciam que a área total queimada de janeiro a novembro de 2025 foi de aproximadamente 11 milhões de hectares, com predomínio da formação savânica natural (34,9%), típica do Cerrado brasileiro (MapBiomas, 2025b).

Em conjunto, as evidências reunidas indicam que o fogo, quando deslocado de seu papel ecológico natural e intensificado por mudanças climáticas e pressões antrópicas, transforma-se em um dos principais vetores de degradação ambiental e de risco socioambiental no Brasil. Os incêndios florestais atuais não apenas comprometem a biodiversidade e a capacidade de regeneração dos ecossistemas,

mas também afetam de forma direta e indireta a saúde humana, animal e ambiental, configurando um problema típico da abordagem de Saúde Única. A magnitude e a recorrência dos eventos recentes, especialmente a partir de 2024, revelam a consolidação de um novo regime de fogo, marcado por perdas duradouras de biomassa, serviços ecossistêmicos e resiliência dos biomas. Esse cenário reforça a urgência de estratégias integradas de prevenção, ordenamento territorial, adaptação climática e governança ambiental, capazes de romper o ciclo de retroalimentação entre desmatamento, incêndios e mudanças climáticas, sob pena de aprofundar desigualdades sociais, crises sanitárias e colapsos ecológicos em escala nacional.

5 CHUVAS INTENSAS, ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES

As inundações são reconhecidas internacionalmente como o desastre natural que mais causa mortes e deslocamentos populacionais no mundo, superando outros eventos extremos (Marengo *et al*, 2024). O aumento da ocupação humana em áreas suscetíveis a degradação ambiental e o avanço do aquecimento global intensificam esse cenário. Entre 1998 e 2017, mais de 2 bilhões de pessoas foram impactadas por episódios de inundação (UNISDR, 2017), evidenciando que a crise climática deixou de ser uma previsão futura e passou a fazer parte do cotidiano das sociedades.

No Brasil, a realidade não é diferente. Segundo dados da Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2024), 93% dos municípios brasileiros registraram emergência ou estado de calamidade pública relacionados a chuvas intensas, enxurradas ou inundações ao longo da última década. Nesse período os prejuízos econômicos e sociais se acumulam ano após ano.

O aquecimento global altera profundamente o regime de precipitação. O ano de 2024 foi classificado como o mais quente já registrado desde a era pré-industrial. O ano de 2025 iniciou com anomalias de temperatura acima de 1,7 °C (Copernicus, 2025; Fiocruz, 2024). Esse cenário aumenta a frequência de sistemas meteorológicos extremos, resultando em volumes de chuva muito superiores à média histórica, especialmente em regiões já vulneráveis (Fiocruz, 2024).

Do ponto de vista hidro meteorológico, o padrão de distribuição das chuvas nas regiões brasileiras também vem passando por transformações. Estudos do Painel

Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024) confirmam que as Regiões Sul e Sudeste tendem a registrar maior volume pluviométrico nas próximas décadas, enquanto no Norte, Nordeste e parte do Centro-Oeste a tendência é de redução, comprometendo a disponibilidade hídrica. Esses impactos já são observáveis quando se compara a série histórica de 1961–1990 com a de 1991–2020 (Ramalho *et al*, 2024). As consequências dessas alterações ultrapassam o campo ambiental, afetando diretamente a saúde humana e animal.

No Brasil, os desastres associados ao excesso de chuvas já atingiram mais de 91 milhões de pessoas nas últimas três décadas. A contaminação da água por esgoto, lama e resíduos amplia o risco de hepatites virais, diarreias infecciosas, leptospirose e outras doenças de transmissão hídrica. O acúmulo de água parada também cria condições favoráveis à proliferação de mosquitos vetores, como o *Aedes aegypti*, elevando casos de dengue, chikungunya e zika (Fiocruz, 2024).

Além das doenças infecciosas, há registros recorrentes de agravamento de condições crônicas, como hipertensão e diabetes. Isso ocorre devido à perda de medicamentos, dificuldades de deslocamento a postos de saúde e falta de atendimento médico continuado. A saúde mental também é fortemente afetada, sendo o trauma psicológico, o luto e a perda das referências territoriais impactantes para as populações atingidas (Marengo *et al*, 2024).

Nos últimos anos, o Brasil tem vivenciado uma intensificação de eventos hidrometeorológicos extremos, caracterizados por volumes excepcionais de precipitação, alta persistência das chuvas e impactos multissetoriais profundos. Esses episódios, cada vez mais frequentes e severos, revelam a combinação entre anomalias atmosféricas, mudanças no padrão climático e vulnerabilidades históricas associadas ao uso e ocupação do território.

No final de 2021, diversos municípios do Sul da Bahia registraram acumulados de chuva entre 200% e 400% acima da média histórica, provocando enchentes prolongadas e danos generalizados à infraestrutura urbana e rural. A combinação entre a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e uma depressão subtropical manteve a umidade concentrada sobre a região por vários dias, o que intensificou o volume de precipitação (Ramalho *et al.*, 2024).

Petrópolis, na Região Serrana do Rio de Janeiro, apresenta um histórico recorrente de desastres associados a eventos extremos de precipitação. Um marco desse histórico foi a tragédia de 2011, que já havia causado impactos severos na região. Em fevereiro de 2022, um novo episódio extremo reforçou esse padrão: uma tempestade com acumulados superiores a 260 mm em poucas horas provocou enxurradas violentas e centenas de deslizamentos no município. Cerca de um mês depois, outro evento ainda mais intenso ultrapassou o recorde anterior, atingindo aproximadamente 530 mm de chuva em 24 horas. Segundo o Observatório de Clima e Saúde da Fiocruz, “o acúmulo excepcional de água em curtos intervalos produz sobrecarga no solo e favorece movimentos de massa mesmo em áreas previamente consideradas estáveis”. A recorrência desses episódios evidencia falhas estruturais no planejamento territorial e na gestão de riscos, uma vez que parcela expressiva da população reside em encostas e áreas historicamente reconhecidas como de alto risco geológico. Sob a perspectiva da Saúde Única, esses desastres desencadeiam impactos interdependentes sobre a saúde humana, animal e ambiental, incluindo contaminação da água, perda de moradias, aumento de vetores e traumas psicossociais duradouros (Ramalho *et al.*, 2024).

Em fevereiro de 2023, o Litoral Norte de São Paulo vivenciou um dos maiores volumes de chuva já registrados no Brasil em um período de 24 horas. Com acumulados superiores a 600 mm em municípios como Bertioga e São Sebastião. A combinação entre a umidade vinda do oceano, a presença de uma frente fria estacionária e o efeito orográfico da Serra do Mar criaram condições favoráveis para chuvas intensas e persistentes. Além dos alagamentos, o principal impacto foi o elevado número de deslizamentos em áreas de encosta ocupadas por moradias irregulares ou com infraestrutura insuficiente. A topografia íngreme, somada ao solo encharcado, provocou movimentos de massa que destruíram residências e vias de acesso, resultando em dezenas de mortes e milhares de pessoas desalojadas. Houve contaminação hídrica resultando em proliferação de vetores, aumento de doenças respiratórias em abrigos e exposição ampliada a animais peçonhentos deslocados de seu habitat natural. No campo socioambiental, este desastre evidenciou o papel das desigualdades socioespaciais, a maior parte das famílias atingidas ocupava áreas de

risco em morros ou faixas de servidão, frequentemente por falta de alternativas habitacionais (Ramalho *et al.*, 2024).

O estado do Rio Grande do Sul enfrentou, entre abril e maio de 2024, um dos maiores desastres climáticos já registrados no Brasil em termos de extensão territorial e população afetada. Diferentemente de outros episódios marcados por chuvas concentradas em pontos específicos, o evento atingiu uma vasta área do território gaúcho por vários dias consecutivos. Resultando em enchentes históricas, rompimento de infraestrutura e destruição de comunidades inteiras (Marengo *et al.*, 2024).

Os acumulados de chuva ultrapassaram 500 mm em municípios do Vale do Taquari e da Região Metropolitana de Porto Alegre, impulsionados por um bloqueio atmosférico que impediu o deslocamento de frentes frias e favoreceu a formação contínua de sistemas convectivos. Ao todo, mais de 2,3 milhões de pessoas foram afetadas e 478 municípios decretaram estado de emergência. Fora os animais que até hoje, a grande maioria, permanece em abrigos. Do ponto de vista da Saúde Única, os impactos foram incontáveis. Houve aumento no risco de doenças infecciosas, contaminação de rios e reservatórios de água, maior exposição a leptospirose e surtos respiratórios em abrigos superlotados. Paralelamente, a fauna silvestre foi deslocada de seu habitat natural (sem contar as perdas), intensificando o contato entre humanos e animais peçonhentos, abandona de animais domésticos, perdas humanas, desabrigados, além de comprometer populações de espécies aquáticas devido à poluição difusa e ao carreamento de sedimentos (Marengo *et al.*, 2024).

Assim, podemos compreender o motivo de algumas regiões estão mais suscetíveis a desastres climáticos específicos, como inundações. Enquanto nas regiões Sul e Sudeste predominam enchentes, enxurradas e deslizamentos. No Nordeste permanecem secas prolongadas com episódios de chuvas intensas localizadas. E, no Norte, os transbordamentos de grandes bacias hidrográficas tendem a ocorrer em períodos de cheia prolongada. Mas, o impacto maior é sempre o mesmo, em áreas vulneráveis. Intensificando a desigualdade social já existente, aumentando a miséria social (Martinez *et al.*, 2025).

De forma sintética, a intensificação de chuvas extremas, alagamentos e inundações evidencia como as mudanças climáticas potencializam riscos

socioambientais preexistentes, afetando de maneira integrada a saúde humana, animal e ambiental. Esses eventos expõem fragilidades estruturais associadas ao uso e ocupação do território e às desigualdades sociais, que condicionam a magnitude dos impactos observados. Sob a abordagem da Saúde Única, as inundações reforçam a necessidade de respostas articuladas que considerem simultaneamente fatores ambientais, sanitários e sociais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que os eventos climáticos extremos não devem ser compreendidos de forma isolada, mas como expressões interdependentes de um sistema climático em transformação, cujos efeitos se propagam simultaneamente sobre os componentes humano, animal e ambiental. O aumento das temperaturas, a intensificação de secas, a alteração dos regimes hidrológicos, a maior recorrência de distúrbios ambientais e a degradação dos ecossistemas atuam de maneira sinérgica, produzindo impactos cumulativos sobre a biodiversidade, os serviços ecossistêmicos e a saúde coletiva. Esses processos não afetam populações de maneira homogênea. Desigualdades sociais, econômicas e territoriais presentes tanto no interior dos países quanto entre diferentes nações, condicionam a exposição, a sensibilidade e a capacidade de resposta aos riscos climáticos. Grupos socialmente vulnerabilizados, comunidades tradicionais, povos indígenas e países de baixa e média renda tendem a sofrer de forma desproporcional os efeitos da degradação ambiental, apesar de contribuírem menos para as emissões globais e para a intensificação das mudanças climáticas.

Essas assimetrias ampliam os impactos sobre a saúde humana e animal, influenciando desde o acesso a serviços de saúde, saneamento e informação até a capacidade de adaptação de sistemas produtivos e de conservação da biodiversidade. Animais domésticos e silvestres em territórios marcados por desigualdade enfrentam maior estresse térmico, perda de habitat, escassez de recursos e maior exposição a patógenos, enquanto populações humanas nesses mesmos contextos vivenciam insegurança alimentar, aumento de doenças relacionadas ao clima e maior dependência de ecossistemas fragilizados. Nesse

cenário, a interconexão entre degradação ambiental, saúde humana e saúde animal reforça a pertinência do enfoque de Saúde Única, ao evidenciar que a justiça social e ambiental é condição central para a promoção da saúde coletiva.

Assim, compreender a relação entre mudanças climáticas, eventos extremos e saúde em um contexto interdependente, exige uma abordagem sistêmica que incorpore explicitamente as desigualdades intra e interpaíses. Estratégias de mitigação, prevenção e adaptação devem articular políticas ambientais, sanitárias e sociais, fortalecendo a governança ambiental, o ordenamento territorial e a redução de vulnerabilidades estruturais. Somente por meio de ações integradas, baseadas em evidências e orientadas por princípios de equidade, será possível enfrentar os desafios impostos por um clima em rápida transformação, promover a resiliência socioecológica e assegurar a proteção da vida em todas as suas formas.

REFERÊNCIAS

ACEVEDO-WHITEHOUSE, K.; DUFFUS, A. L. J. Effects of environmental change on wildlife health. **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.** 364(1534):3429–38. 2009. DOI:10.1098/rstb.2009.0128.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024: informe anual**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/conjuntura-dos-recursos-hidricos. Acesso em: 17 set. 2026.

ALBOREDO, D. **Impacto das mudanças climáticas na incidência de zoonoses no estado de São Paulo.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2025. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/10/10134/tde-12062025-164042/publico/Derik_Alboredo_corrigida.pdf>. Acesso em: 17 set. 2026.

ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H.; SILVA, C. V. J.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ARAI, E.; AGUIAR, A. P.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; DEETER, M. N.; DOMINGUES, L. G.; GATTI, L.; GLOOR, M.; MALHI, Y.; MARENGO, J. A.; MILLER, J. B.; PHILLIPS, O. L.; SAATCHI, S. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, 9.536, 2018. DOI: 10.1038/s41467-017-02771-y

ARAÚJO, Y. P.; PISMEL, D. de O.; REIS, J. B. C.; ANDERSON, L. O. **É Fogo! Amazônia.** 2. ed. São José dos Campos: SP CEMADEN & É Fogo!, 2024. Disponível em: https://efogo.com.br/EFogo_Amazonia.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

ARCHIBALD, S.; LEHMANN, C. E. R.; GÓMEZ-DANS, J. L.; BRADSTOCK, R. A. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.**, 110, 15, 2013. DOI: 10.1073/pnas.1211466110

ASSAD, M. L. G. O calor pode matar antes de outras ameaças das mudanças climáticas. **Interface: comunicação, saúde, educação** 29:e240450. Botucatu-SP, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/icse/a/jmnpjkf4KNpjMgTwDzfjcfL/?lang=pt>. Acesso em: 17 set. 2026.

BASIRI, S. Interconnected risks: Exploring the nexus of zoonosis and climate change. **Journal of Zoonotic Diseases**, 8(3), 515-523, 2024. DOI: 10.22034/jzd.2024.18076

BOERSMA, J.; ENBODY, E. D.; KARUBIAN, J.; WATTS, H. E.; SCHWABL, H. (2022). Drought disrupts year-round breeding readiness in a tropical songbird. **Avian Conservation and Ecology**, 17(2)44, 2022. DOI: 10.5751/ACE-2343-170244

CABRAL, V.; SANTOS, T. O Oceano Atlântico e as Mudanças Climáticas: Potenciais riscos para a América do Sul e a Europa. In: Weiffen, B.; Marconi, C. A.; Santos, I. A. dos; Tasquetto, L. da S.; Pimenta, M. C. B de S.; Santos, T. **A União Europeia como Ator Global: Desafios e oportunidades lidos desde o Brasil.** São Paulo: Ed. Dialética, p.152-169, 2025.

CAMINHADE, C.; McINTYRE, K. M.; JONES, A. E. Impact of recent and future climate change on vector-borne diseases. **Ann N Y Acad Sci.** Jan;1436(1):157-173, 2019. DOI: 10.1111/nyas.13950

CAMPBELL, S.; REMENYI T. A.; WHITE, C. J.; JOHNSTON, F. H. (2018). Heatwave and health impact research: A global review. **Health & Place** 53 (2018) 210-218, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353829218301205?via%3Dihub. Acesso em: 17 set. 2026.

CAMPOS, E. J. D. O papel do oceano nas mudanças climáticas globais. **Revista USP**, São Paulo, n.103, p.55-66, 2014. Disponível em: https://www.io.usp.br/images/noticias/papel_oceanos_clima.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

CASCIO, W. E. Wildland fire smoke and human health. **Science of the Total Environmental**, 624, 586-595, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.086

CHIA, E. K.; BASSETT, M.; NIMMO, D. G.; LEONARD, S. W. J.; RITCHIE, E. G.; CLARKE, M. F.; BENNETT, A. F. Fire severity and fire-induced landscape heterogeneity affect arboreal mammals in fire-prone forests. **Ecosphere Journal**, 6,10, 1-14, 2015. DOI: https://doi.org/10.1890/ES15-00327.1

CNM, Confederação Nacional de Municípios. **Brasil registrou mais de 4 mil decretos de situação de emergência ou calamidade em 2023**. Brasília: CNM,

2024. Disponível em: https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/brasil-registra-mais-de-4-mil-decretos-de-situacao-de-emergencia-ou-calamidade-em-2023. Acesso em: 17 set. 2026.

CONN, D. B.; MAGALHÃES, R. S. Climate change: A health emergency for humans, animals, and the environment. **One Health**, 19, 100867, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352771424001939. Acesso em: 17 set. 2026.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). **Copernicus confirms 2024 is first year to exceed 1.5 °C above pre-industrial level.** 2025. Disponível em: https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level. Acesso em: 17 set. 2026.

CRAWFORD, B.; MAERZ, J.; TERRELL, V.; MOORE, C. (2022). Population Viability Analysis for a Pond-breeding Amphibian Under Future Drought Scenarios in the southeastern United States. **Global Ecology and Conservation,** v. 36**,** e02119, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02119.

DESTOUMIEUX-GÁRZON, D; MAVINGUI, P.; BOETSCH, G.; BOISSIER, J.; DARRIET, F.; DUBOZ, P.; FRITSCH, C.; GIRAUDOUX, P.; LE ROUX, F.; MORAND, S.; PAILLARD, C.; PONTIER, D.; SUEUR, C.; VOITURON, Y. The one health concept: 10 years old and a long road ahead. **Frontiers in Veterinary Science**, 12:5:14, 2018. DOI: 10.3389/fvets.2018.00014

ELLWANGER, J. H.; KULMANN-LEAL, B.; KAMINSKI, V. L.; VALVERDE-VILLEGAS, J. M.; VEIGA, A. B. G. D.; SPILKI, F. R.; FEARNSIDE, P. M.; CESAR, L; GIATTI, L. L.; WALLAU, G. L.; ALMEIDA, S. E. M.; BORBA, M. R.; HORA, V. P.; CHIES, J. A. B. Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 92(01), e20191375, 2020. DOI: 10.1590/0001-3765202020191375

FAGRE, A. C.; BECKER, D. J.; PULSCHER, L. A.; SIMONIS, M. C.; DUNCAN, C. G. Understanding Climate Change Threats to Vertebrate Wildlife by Studying Ecoimmunology Across Biological Scales. **Integrative and Comparative Biology**, icaf150, 2025. DOI: https://doi.org/10.1093/icb/icaf150

FERRAZ, M. P.; VIDAL, D. G. From Crisis to Collaboration: Tackling Climate Change Health Impacts with One Health and Ecohealth. In: FILHO, W. L.; LOPES, H. S.; LENCASTRE, M. P.; ESTRADA, R.; VIDAL, D. (org.). **Composing Worlds: Humanities, Health and Wellbeing in the XXI Century Towards a More Sustainable World** Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. (pp. 349-386).

FRANÇA, F. M.; BENKWITT, C. E.; PERALTA, G.; ROBINSON, J. P. W.; GRAHAM, N. A. J.; TYLIANAKIS, J. M.; BERENGUER, E.; LEES, A. C.; FERREIRA, J.; LOUZADA, J.; BARLOW, J. Climatic and local stressor interactions threaten tropical forests and coral reefs. **Philosophical Transactions B - The Royal Society Publishing**, 375: 20190116, 2020. Disponível em:

https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/375/1794/20190116/30738/Climatic-and-local-stressor-interactions-threaten. Acesso em: 17 set. 2026.

FRITZEN, C.; DA SILVA, V. M. F. **Guia para Emergências com Mamíferos Aquáticos Amazônicos em Situações de Seca Extrema.** 1 ed. Brasília: ICMBio, 2025, 133 p. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/instituto-chico-mendes-lanca-guia-com-orientacoes-em-emergencias-com-mamiferos-aquaticos-amazonicos-em-situacoes-de-seca-extrema/GuiaparaEmergnciascomMamferosAquticosAmaznicosemSituaesdeSecaExtrema_compressed2.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (Fiocruz). Aumenta risco de doenças infecciosas e acidentes com animais peçonhentos no RS. **Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde.** Brasília, Fiocruz. 14 jun. 2024. Disponível em: https://fiocruz.br/noticia/2024/06/aumenta-risco-de-doencas-infecciosas-e-acidentes-com-animais-peconhentos-no-rs. Acesso em: 17 set. 2026.

GITHEKO, A. K., LINDSAY, S. W.; CONFALONIERI, U. E.; PATZ, J. A. (2000). Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. **Bulletin of the World Health Organization**, 78(9), 1136–1147, 2000. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2560843/. Acesso em: 17 set. 2026.

GONZÁLEZ, T. M.; GONZÁLEZ-TRUJILLO, J. D.; MUÑOZ, A.; ARMENTERAS, D. Efeitos do histórico de incêndios em comunidades animais: uma revisão sistemática. **Ecological Processes**, v.11, 11, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/s13717-021-00357-7. Acesso em: 17 set. 2026.

HORTA, P.; PINHO, P. F.; GOUVÊA, L.; GRIMALDI, G.; DESTRI, G.; MUELLER, C. M.; ROCHA, L.; BARUFI, J. B.; RORIG, L.; ASSIS, J.; CUNHA, L. C. da. Mudanças Climáticas e a zona costeira do Brasil: vulnerabilidades socioambientais e estratégias de ação. **Sustainability in Debate**, Brasília, v.11, n.3, p.425-444. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Guido-Grimaldi/publication/348401527_Climate_change_and_Brazil's_coastal_zone_socio-environmental_vulnerabilities_and_action_strategies/links/6018cbeba6fdcc071bac3796/Climate-change-and-Brazils-coastal-zone-socio-environmental-vulnerabilities-and-action-strategies.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

HUMAN RIGHTS WATCH; INSTITUTO DE ESTUDOS PARA POLÍTICAS DE SAÚDE (IEPS); INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). O ar é insuportável: os impactos das queimadas associadas ao desmatamento da Amazônia brasileira na saúde. **Nova York: Human Rights Watch**, 2020. Disponível em: https://www.hrw.org/sites/default/files/media_2020/08/brazil0820pt_web.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

IGNOTTI, E.; VALENTE, J. G.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; HACON, S. de S.; NETTO, P. A. Impactos na saúde humana de partículas emitidas por queimadas na

Amazônia brasileira. **Revista de Saúde Pública**, 44 (1), fev, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0034-89102010000100013

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report.** Contribuição dos grupos de trabalho I, II e III ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. [Equipe principal de redação, H. Lee e J. Romero (orgs.)]. IPCC, Genebra, Suíça, 184p. 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/. Acesso em: 17 set. 2026.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribuição do grupo de trabalho I para o sexto relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. [Equipe principal de redação: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Editora Universidade de Cambridge, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NY, USA, 2021. DOI:10.1017/9781009157896.2021

JOHNSTON, F. H.; HENDERSON, S. B.; CHEN, Y.; RANDERSON, J. T.; MARLIER, M.; DEFRIES, R. S.; KINNEY, P.; BOWMAN, D. M.; BRAUER, M. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. **Environ Health Perspect**. May;120(5):695-701, 2012. DOI: 10.1289/ehp.1104422.

LEAHY, L.; LEGGE, S. M.; TUFT, K.; McGREGOR, H. W.; BARMUTA, L. A.; JONES, M. E.; JOHNSON, C. N. Amplified predation after fire suppresses rodent populations in Australia's tropical savannas. **Wildlife Research**, 42(8), 705-716, 2015. DOI: https://doi.org/10.1071/WR15011

LENTON, T. M.; MILKOREIT, M.; WILLCOCK, S.; ABRAMS, J. F.; ARMSTRONG McKAY, D. I.; BUXTON, J. E.; DONGES, J. F.; LORIANI, S.; WUNDERLING, N.; ALKEMADE, F.; BARRETT, M.; CONSTANTINO, S.; POWELL, T.; SMITH, S. R.; BOULTON, C. A.; PINHO, P.; DIJKSTRA, H.; PEARCE-KELLY, P.; ROMAN-CUESTA, R. M.; DENNIS, D. (orgs.). **The Global Tipping Points Report 2025**. University of Exeter, Exeter, UK, 2025. Disponível em: https://global-tipping-points.org/. Acesso em: 17 set. 2026.

MALHI, Y.; FRANKLIN, J.; SEDDON, N.; SOLAN, M.; TURNER, M. G.; FIELD, C. B.; KNOWLTON, N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. **Philosophical Transactions B - The Royal Society Publishing**, 375: 20190116, 2020. Disponível em: https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/375/1794/20190104/30552/Climate-change-and-ecosystems-threats. Acesso em: 17 set. 2026.

MAPBIOMAS. Área queimada no Brasil cresce 79% em 2024 e supera os 30 milhões de hectares. **MapBiomas Brasil**, 2025a. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/2025/01/22/area-queimada-no-brasil-cresce-79-em-2024-e-supera-os-30-milhoes-de-hectares/. Acesso em: 17 set. 2026.

MAPBIOMAS. MapBiomas Fogo – Destaques. **MapBiomas Brasil**, 2025b. Disponível em: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-fogo-maps/Mapbiomas-Fogo-Destaques.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

MARENGO, J. A.; DOLIF, G.; CUARTAS, A.; CAMARINHA, P.; GONÇALVES, D.; LUIZ, R.; SILVA, L.; ALVALÁ, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MORAES, O. L.; SOARES, W. R.; NOBRE, C. A. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos Avançados**, vol. 38, n. 112, 2024, pp. 203–227. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012. Acesso em: 17 set. 2026.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts. **International Journal of Climatology**, 36, 1033-1055, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.4420

MARTINEZ, A. S.; PARDAL, A.; TAKAHASHI, C. K.; MARTINS, I. M.; CHRISTOFOLETTI, R. A.; ALBERTI, L.; BUMBEER, J.; RIBEIRO, J. B. Brasil em transformação: o impacto da crise climática. **Caderno Técnico II: Temporadas das águas: o aumento das chuvas extremas**. São Paulo: Programa Maré de Ciência / Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza; 2025. Disponível em: https://oeco.org.br/wp-content/uploads/2025/07/Brasil-em-transformacao-2-Temporadas-das-Aguas-O-Aumento-das-Chuvas-Extremas-1.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

MYERS, S. S.; GAFFIKIN, L.; GOLDEN, C. D.; OSTFELD, R. S.; REDFORD, K. H.; RICKETTS, T. H.; TURNER, W. R.; OSOFSKY, S. A. Human Health impacts of ecosystem alteration. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.**, 110 (47) 18753-18760, 2013. DOI:https://doi.org/10.1073/pnas.1218656110

NOAA, National Centers for Environmental Information. **Monthly Global Climate Report for Annual 2024**. (2025) Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413. Acesso em: 17 set. 2026.

PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas: Base Científica das Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: 2013.

PERES, C. A. Ground fires as agents of mortality in a Central Amazonian forest. **Journal of Tropical Ecology**, 15:535-541, 1999. Escola de ciências ambientais, Universidade de East Anglia, Norwich, Reino Unido. Disponível em: https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/Publicacoes-Impacto/material3os/1999_Peres_Ground_Fires_JTE_DE3os.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

RAMALHO, N. V.; COLLISCHONN, W.; RUHOFF, A.; FILHO, R. C.; BRÊDA, J. P.; WONGCHUIG, S. Comparação de chuvas extremas no Brasil entre 1961 e 2024. **IV**

Encontro Nacional de Desastres, 2024. Disponível em: https://lume.ufrgs.br. Acesso em: 17 set. 2026.

REDDINGTON, C. L.; BUTT, E. W.; RIDLEY, D. A.; ARTAXO, P.; MORGAN, W. T.; COE, H.; SPRACKLEN, D. V. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. **Nature Geoscience**, 8, 768-771, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/ngeo2535

SALVADOR, C.; NIETO, R.; VICENTE-SERRANO, S.; GARCIA-HERRERA, R.; GIMENO, L.; VICEDO-CABRERA, A. (2022). Public Health Implications of Drought in a Climate Change Context: A Critical Review. **Annual Review of Public Health**, 3:44:213-232, 2023. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-071421-051636.

TURNER, M. G.; CALDER, W. J.; CUMMING, G. S.; HUGHES, T. P.; JENTSCH, A.; LaDEAU, S. L.; LENTON, T. M.; SHUMANn, B. N.; TURETSKY, M. R.; RATAJCZAK, Z.; WILLIAMS, J. W.; WILLIAMS, A. P.; CARPENTER, S. R. (2020) Climate change, ecosystems and abrupt change: science priorities. **Philosophical Transactions B - The Royal Society Publishing**, 375: 20190105. 2020. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0105

UNISDR, United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **UNISDR annual report 2017.** Geneva: UNISDR, 2018. Disponível em: https://www.undrr.org/publication/unisdr-annual-report-2017. Acesso em: 10 dez. 2025.

van der WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; van LEEUWEN, T. T.; CHEN, Y.; ROGERS, B. M.; MU, M.; van MARLE, M. J. E.; MONRTON, D. C.; COLLATZ, G. J.; YOKELSON, R. J.; KASIBHATLA, P. S. Global fire emissions estimates during 1997-2016. **Earth System Science Data**, 9, 697-720, 2017. DOI: https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017

VIEIRA, W.; SANTANA, G.; ARZABE, C. Diversity of reproductive modes in anurans communities in the Caatinga (dryland) of northeastern Brazil. **Biodiversity and Conservation**, 18, 55-66. 2008. DOI: https://doi.org/10.1007/s10531-008-9434-0.

WWF-Brasil; SOS Pantanal; Environmental Justice Foundation; Chalana Esperança. **Nota Técnica: Alerta precoce para mitigar impactos da seca no pantanal**. 2024. Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/0107-nota-tecnica---crise-hidrica.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

YASOBANT, S.; LEKHA, K. S.; TRIVED, P.; KRISHNAN, S.; KATOR, C.; KAUR, H.; ADANIYA, M.; SINHA A.; SAXENA, D. Impact of Heat on Human and Animal Health in India: A Landscape Review. **Dialogues in Health,** V.6, 100203, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dialog.2024.100203

DOENÇAS INFECCIOSAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nicole Geraldine de Paula Marques Witt– Universidade Federal do Paraná[1]
Adriane Suzin– Universidade Federal de Uberlândia[2]
Joyce Cândida Thomé Pereira – Centro Universitário Internacional Uninter[3]
Andréia Monique Lermen – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul[4]
Aline Gomes de Lira Furlaneto – Secretaria de Educação do Estado de São Paulo[5]
Vera Lucia Pereira dos Santos – Centro Universitário Internacional Uninter[6]
Larissa Warnavin – Centro Universitário Internacional Uninter; NAILA Tecnologia Ambiental[7]

1 INTRODUÇÃO

> Sabe-se que na Índia e nas regiões do grande mar, as estrelas exercem sua influência particularmente naquele mar e lutam violentamente contra suas águas. Isso cria vapores que escurecem o sol e transformam sua luz em escuridão (Fiack; Straff; Walther, 2023, p. 754 - tradução nossa).

O exemplo citado reflete as múltiplas formas de interpretação dos fenômenos naturais ao longo da história. O mesmo ocorre com a compreensão da relação entre doença e ambiente, que atravessa diferentes períodos e expressa as transformações culturais, científicas e sociais de cada época. Na Antiguidade, embora de modo

[1]Licenciada e Bacharela em Ciências Biológicas, Mestra em Agronomia e doutoranda em Ecologia e Conservação – nicabio@ufpr.br
[2]Licenciada e Bacharela em Ciências Biológicas, Mestra e Doutora em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais – adrianesuzin@gmail.com
[3]Bacharela em Ciências Biológicas, Pós-graduada em vigilância sanitária e microbiologia aplicada – joyce.candida@outlook.com
[4]Engenheira ambiental e sanitarista, Mestra em ambiente e tecnologias sustentáveis, Doutora em microbiologia agrícola e do ambiente –lermenma@gmail.com
[5]Bacharela em geografia - *alineglfurlaneto@yahoo.com*
[6]Licenciada em Ciências Biológicas, Mestra em Morfologia - Área de Concentração em Biologia Celular, Doutora em Medicina Interna. – vera.sa@uninter.com
[7]Bacharela, Licenciada, Mestra e Doutora em geografia – larissa.w@uninter.com

diverso entre os povos, a saúde era majoritariamente entendida em termos religiosos ou mágicos. As doenças eram concebidas como castigos divinos ou efeitos de forças sobrenaturais, sendo tratadas por meio de rituais, feitiços e oferendas (Gottschall, 2007).

Com Hipócrates (460–370 a.C.), surge uma visão naturalista: a saúde passou a ser entendida como equilíbrio entre corpo e elementos da natureza (ar, água, fogo e terra), destacando a importância do ar puro, da água limpa e da alimentação equilibrada para a manutenção do bem-estar (Backes *et al.*, 2010; Busato, 2016). O corpo, nesta concepção, era constituído de partes básicas, os “homores”, que circulavam através de vasos, entre órgãos internos. Se esses “homores” entrassem em desequilíbrio (devido a mudanças no clima, excesso de bebida ou de alimento) a doença era estabelecida (Gottschall, 2007).

No período seguinte, durante a Idade Média, predominou a explicação religiosa, com as epidemias associadas à punição divina ou a “maus ares” (miasmas) e não a algum agente externo ou mesmo desregulação do corpo. Foi nesse contexto que, no século XIV, a Europa passou por uma das maiores tragédias da sua história, a pandemia de peste negra. Chamada também de peste bubônica, é uma doença causada pela bactéria gram-negativa *Yersinia pestis* e transmitida pela pulga do rato urbano, que dizimou 1/4 da população europeia e atingiu fortemente outros continentes. As explicações para o adoecimento da população eram, comumente, atribuídas à justiça divina associada ao ar estragado, podre, impuro, ou seja, aos miasmas. Nesta concepção, pessoas doentes ou corpos em putrefação, produziam vapores malignos que eram transportados para outros lugares. Ao respirar este ar as pessoas ficariam doentes (Martins *et al.*, 1997).

Os princípios de transmissão de patógenos de doenças infecciosas entre humanos, animais e meio ambiente eram inimagináveis para os estudiosos da época (Fiack; Straff; Walther, 2023). Ainda que não houvesse conhecimento científico sobre o ciclo epidemiológico, a epidemia da peste bubônica já refletia claramente esta interação. Somente no final do século XIX, Alexandre Yersin identificou o agente etiológico. Em seus estudos em Hong Kong, Yersin observou a relação direta entre a morte de ratos e os óbitos humanos, fechando a cadeia de infecção entre roedores, pulgas, bactérias e pessoas. Essa descoberta possibilitou o controle da propagação

da doença e ilustra como os processos biológicos e societários estão profundamente interligados (Fiack; Straff; Walther, 2023). Tal exemplo antecipa a lógica contemporânea da abordagem de Saúde Única, que reconhece a necessidade de ações colaborativas e interdisciplinares para enfrentar os desafios atuais e futuros relacionados às doenças infecciosas e não infecciosas.

Com o Renascimento e o avanço das ciências, o corpo humano passou a ser objeto de estudo racional, e no século XIX, com Pasteur e John Snow, consolidou-se a teoria microbiana: cada doença teria um agente etiológico específico. Esse modelo biomédico fortaleceu o controle de epidemias por meio de vacinas e soros, mas reduziu o papel do ambiente a um segundo plano (Pignatti, 2004; Busato, 2016).

Somente no século XX, com a teoria ecológica das doenças e a noção de multicausalidade, a interação entre agente, hospedeiro e ambiente voltou ao centro do debate. Nesse contexto, surge o conceito de patobiocenose, formulado por Pavlovsky (1939 *apud* Pignatti, 2004), segundo o qual os agentes patogênicos existem e circulam em determinados ambientes naturais (biocenoses). Quando interagem com o conjunto de seres vivos desses ecossistemas, formam a patobiocenose, ou seja, um sistema ecológico que mantém a circulação do agente. O ser humano, ao adentrar esses ambientes, pode ser incorporado ao ciclo, tornando-se portador da doença (Pignatti, 2004).

De forma complementar, o Complexo Patogênico formulado pelo geógrafo Maximilien Sorre, evidencia que desequilíbrios entre fatores biológicos, sociais e ambientais podem condicionar determinada localidade à ocorrência de processos patogênicos e, consequentemente, à disseminação de doenças (Guimarães; Catão; Casagrande, 2018). Em outras palavras, o processo saúde-doença não depende unicamente do agente etiológico, mas da interação equilibrada e resiliente entre três planos fundamentais, o físico (fatores naturais), o social (alterações antrópicas) e o biológico (características dos seres vivos).

Pode-se considerar, portanto, que a dinâmica das doenças transmissíveis é influenciada por múltiplos fatores interdependentes. Além das condições ambientais, como clima, vegetação e hidrologia; incluem-se fatores socioeconômicos, como migrações e densidade populacional, e aspectos médico-sociais, entre eles o nível de imunidade da população, a eficiência dos sistemas de saúde e a eficácia dos

programas de controle de doenças infectocontagiosas. Todos esses fatores, condicionados pelo ciclo biológico dos agentes patogênicos e pela sua capacidade de transmissão, compõem o conjunto de elementos epidemiológicos essenciais para o estudo e a compreensão das doenças transmissíveis.

Dessa forma, a história epidemiológica de uma região é fundamental para compreender a incidência e a persistência de determinadas enfermidades. No entanto, esse histórico é frequentemente negligenciado em estudos e análises sobre os impactos das mudanças climáticas, especialmente em países tropicais, onde tais doenças continuam representando desafios significativos para a promoção da saúde pública (Queiroz *et al.*, 2020).

Diante disso, na contemporaneidade, a relação entre doença e ambiente assume novas configurações, marcadas pelas transformações sociais, econômicas e ambientais do século XX e início do XXI. A intensificação da globalização ampliou a mobilidade de pessoas, animais, mercadorias e patógenos, acelerando a disseminação de epidemias em escala mundial. Esse processo, no entanto, não ocorre de forma isolada, estando diretamente articulado ao avanço sobre áreas naturais, por meio do desmatamento e da fragmentação de habitats, que ampliam o contato entre populações humanas e patógenos silvestres.

Nesse cenário, a pandemia de COVID-19 constitui um exemplo paradigmático em que um vírus originado em um ciclo zoonótico local disseminou-se rapidamente por todos os continentes, evidenciando, simultaneamente, os efeitos da conectividade global e da intensificação dessas interfaces ecológicas. Doenças como ebola e influenza aviária igualmente ilustram essa dinâmica, na qual agentes anteriormente restritos a determinadas biocenoses passam a explorar novos hospedeiros, impulsionados pelas cadeias globais de circulação e consumo.

Paralelamente, as mudanças climáticas intensificam esses processos. O aumento das temperaturas e as alterações nos regimes de precipitação ampliam a distribuição de vetores como o *Aedes aegypti*, favorecendo a expansão de doenças como a dengue, chikungunya e zika. A escassez hídrica e a degradação dos solos comprometem a segurança alimentar, aumentando riscos de desnutrição e de doenças relacionadas ao consumo de água contaminada. Além disso, eventos extremos, como enchentes, secas e ondas de calor, impactam diretamente a saúde

humana, tanto por desastres e deslocamentos populacionais quanto pela intensificação de doenças respiratórias, cardiovasculares e transtornos mentais.

A poluição constitui outro fator central. De acordo com a *Lancet Commission on Pollution and Health* (Landrigan, 2017), a poluição do ar, da água e do solo é responsável por cerca de nove milhões de mortes anuais no mundo, afetando de forma desproporcional populações pobres e vulneráveis. Esse quadro evidencia a sobreposição entre degradação ambiental e desigualdades sociais, configurando um cenário de injustiça climática e sanitária.

Em resposta a essas transformações, consolidam-se abordagens integrativas em saúde. O conceito de Saúde Única ou Uma Só Saúde (One Health) propõe a articulação entre saúde humana, animal e ambiental, especialmente no enfrentamento de zoonoses e na promoção da segurança alimentar. Já a Saúde Planetária amplia essa perspectiva ao reconhecer a degradação ambiental e as mudanças climáticas como ameaças sistêmicas à estabilidade das sociedades humanas, demandando cooperação transdisciplinar e respostas em escala global (USP, s/d). Ambas convergem ao afirmar que a saúde deve ser compreendida como parte de um sistema interdependente que integra natureza, sociedade e economia.

Assim, a contemporaneidade explicita a interdependência entre saúde e ambiente, na qual os processos de adoecimento não podem ser atribuídos exclusivamente a agentes etiológicos isolados, mas devem ser compreendidos à luz de dinâmicas globais de mudança ambiental e desigualdade social. Nesse contexto, enfrentar os desafios da saúde no Antropoceno implica também questionar os fundamentos do modelo de desenvolvimento vigente, cuja pressão sobre os sistemas naturais compromete os limites planetários e a própria sustentação da vida humana.

2 RISCOS DE DOENÇAS SUSCETÍVEIS AO CLIMA

A Organização Mundial da Saúde (OMS) em conjunto com outras instituições internacionais, reconhece as mudanças climáticas globais como um dos principais fatores responsáveis pela ampliação da disseminação de doenças transmissíveis, incluindo tanto as de natureza contagiosa quanto aquelas transmitidas por vetores (Blair, 2018; Romanello *et al.*, 2022). Entre os efeitos mais preocupantes está o

aumento do risco de emergências zoonóticas e enteroparasitoses que refletem o desequilíbrio crescente entre os sistemas ecológicos e sanitários.

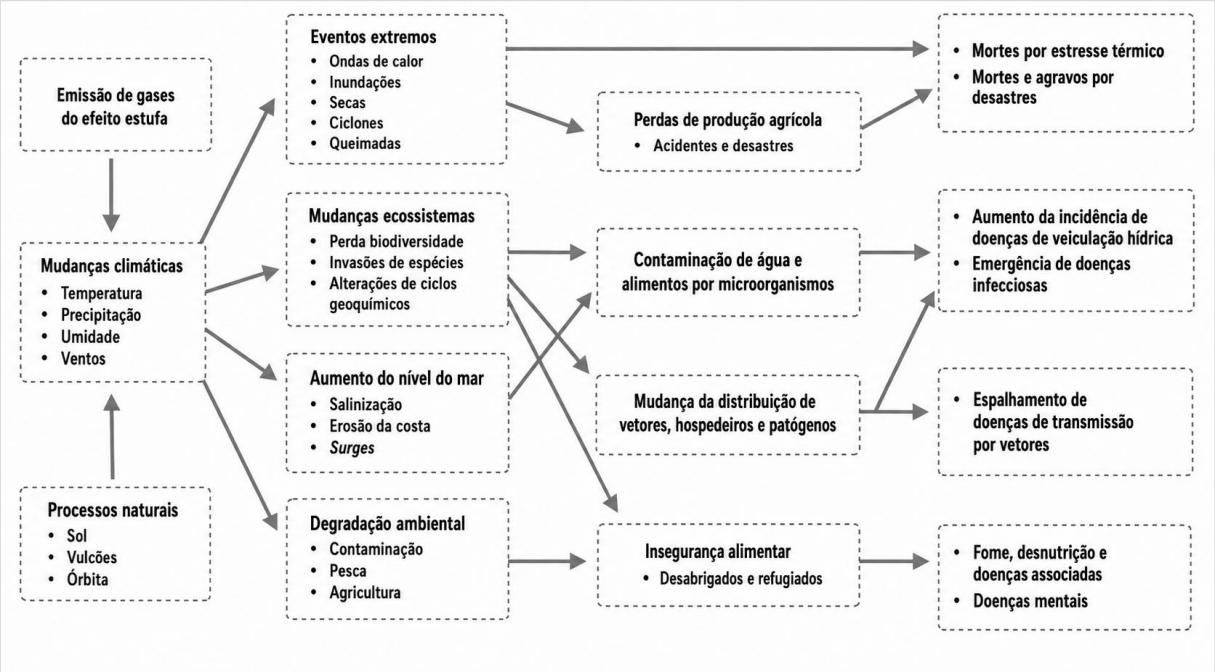
Nesse sentido, as mudanças climáticas podem ser compreendidas como processos amplos de alteração dos ecossistemas e da saúde humana decorrentes de eventos extremos do clima, como o aumento da temperatura e a intensificação do efeito estufa. Fenômeno que, embora faça parte da regulação natural do planeta, tem sido intensificado pela atividade antrópica. Tais impactos atuam de forma significativa sobre o arranjo espacial, já que interferem diretamente no perfil demográfico, socioeconômico e cultural, gerando, além da degradação ambiental, processos de racismo climático, agravando as condições de saúde da população exposta e da dinâmica patogênica (Barcellos *et al.,* 2009).

O Brasil, classificado como o quinto maior país em extensão territorial do mundo, possui aproximadamente 8,5 milhões de km². A predominância de seu território em baixas latitudes confere-lhe características climáticas majoritariamente tropicais, condicionando a diversidade ambiental e ecológica observada em suas diferentes regiões. Essa amplitude geográfica favorece uma expressiva diversidade climática, abrangendo zonas de clima equatorial na região Norte, tropical nas áreas centrais e litorâneas, semiárido no Nordeste e subtropical no Sul (Brasil, 2020). O país é considerado altamente suscetível às mudanças climáticas em razão do desmatamento, das queimadas, da perda de biodiversidade, da poluição, da urbanização desordenada e dos impactos costeiros decorrentes da elevação do nível do mar. Biomas como a Amazônia e o Cerrado desempenham papel essencial na regulação climática e na manutenção da biodiversidade. Entretanto, as pressões ambientais advindas da exploração insustentável dos recursos naturais têm comprometido a integridade dos ecossistemas, tornando sua conservação um requisito fundamental para a promoção da sustentabilidade, o equilíbrio ecológico e a mitigação dos riscos associados à transmissão de doenças.

Nesse cenário, as políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas devem contemplar medidas associadas ao controle da disseminação de doenças, assumindo que o território, o povo e a história epidemiológica influenciam as tomadas de decisão. Assim sendo, o poder público tem papel estratégico na prevenção de futuras crises sanitárias.

Para atingir esse objetivo, é fundamental considerar a capacidade dos sistemas de saúde de prever, adaptar, reagir, superar e/ou reabilitar as dinâmicas que desencadeiam os processos de insalubridade ambiental, como as destacadas na Figura 1. Dessa forma, é possível operacionalizar sistemas de resiliência sanitária com base nas características sociodemográficas e ambientais de uma dada localidade. Isso permite o reconhecimento de riscos e vulnerabilidades diante das mudanças climáticas e a possibilidade de mobilização de estratégias dos serviços de vigilância epidemiológicas e de saúde com maior eficiência e bons prognósticos (Bispo Júnior, 2022).

Figura 1 – Possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre as condições de saúde



Fonte: McMichael, Woodruff e Hales, 2006 *apud* Barcellos *et al.* (2009).

No esquema apresentado (Figura 1), observa-se que as mudanças climáticas podem intensificar a ocorrência de doenças transmissíveis, favorecer o surgimento de outros processos de adoecimento e comprometer dimensões essenciais do bem-estar humano, como a segurança alimentar e a saúde mental. Essa perspectiva dialoga com o pensamento de Maximilien Sorre (1880-1962), segundo o qual os fatores antrópicos podem atuar como elementos moduladores, amplificando ou mitigando a vulnerabilidade de uma população aos agravos presentes em determinado território

(Ferreira, 1991). Assim, a interação entre condições ambientais alteradas pelo clima e determinantes sociais reforça a complexidade dos impactos sobre a saúde coletiva.

Nesse sentido, os impactos ao ambiente e saúde, não são homogêneos no território e nem entre indivíduos. Iniquidades ambientais muitas vezes estão associadas e são fortemente influenciadas por processos de racismo ambiental, que determina a exposição desproporcional de riscos e vulnerabilidades da população menos favorecida socioeconomicamente impactando a acessibilidade a serviços de saúde, saneamento básico e alimentação de qualidade (Brasil, 2025a). Sendo assim, para uma abordagem de estratégias de prevenção, mitigação e resiliência em emergências sanitárias faz-se necessário diferenciar a definição de “população vulnerável” e de “povo vulnerabilizado”, já que a primeira corresponde a todos os indivíduos do local afetado, e a segunda refere-se àqueles indivíduos segregados do acesso às condições básicas de salubridade e/ou associados a outras demandas de saúde que os tornam mais fragilizados e sensíveis ao risco climático (Brasil, 2024a).
Por fim, considerando as mudanças climáticas como impulsionadoras de crises sanitárias, serão apresentadas a seguir, as possíveis intersecções entre alterações climáticas e a disseminação de doenças, com ênfase em zoonoses e enteroparasitoses. Essa análise reforça a importância da abordagem de Saúde Única (*One Health*), que reconhece a indivisibilidade entre saúde humana, animal e ambiental, propondo respostas colaborativas e integradas frente aos desafios sanitários do Antropoceno[8].

2.1 VIROSES

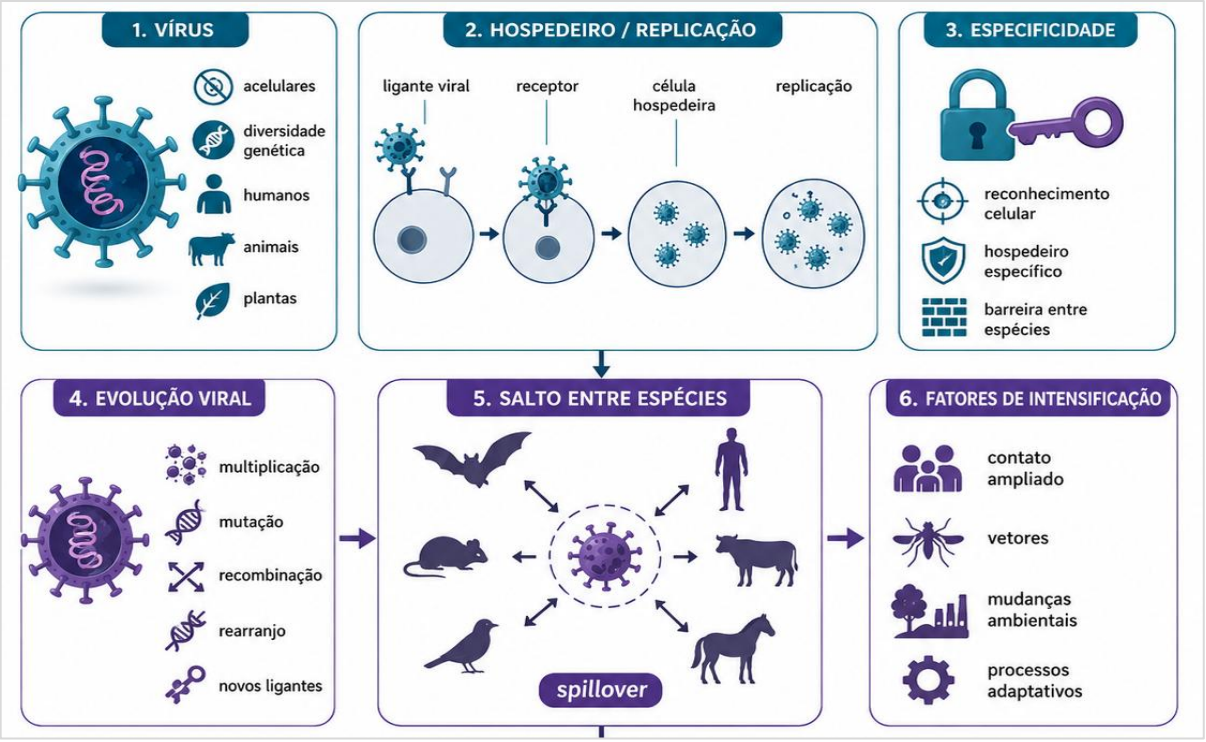
Os vírus, organismos acelulares dotados de grande diversidade genética e ecológica, são os agentes etiológicos das viroses que afetam humanos, animais e plantas. Incapazes de se replicar de forma independente, dependem do metabolismo celular do hospedeiro para completar seu ciclo biológico, o que explica tanto sua ampla

[8] Antropoceno: termo cunhado pelo ecólogo Eugene F. Stoermer na década de 1980 e popularizado por Paul J. Crutzen e Stoermer a partir de 2000, para designar o período em que as atividades humanas passaram a exercer influência significativa sobre o sistema terrestre, incluindo o clima, os ecossistemas e os ciclos biogeoquímicos. Embora amplamente empregado na literatura científica, o Antropoceno não é formalmente reconhecido como uma época na Escala do Tempo Geológico.

capacidade de disseminação quanto a variedade de manifestações clínicas das viroses. Ao mesmo tempo, devido a obrigatoriedade de invadir células (via ligante viral e receptor celular), para ativar o seu metabolismo e replicação, parte dos vírus tendem a ter hospedeiros específicos, o que por muitas vezes limita a transmissão entre espécies distintas (Tortora; Funke; Case, 2012).

No entanto, mecanismos evolutivos como a elevada capacidade de multiplicação associado às taxas de mutação, recombinação e rearranjo genético, favorece que certos vírus, mais frequentemente os vírus de RNA, produzam novas proteínas ligantes e passem a reconhecer receptores celulares de outras espécies. Esses eventos são intensificados pelo contato ampliado entre espécies, pela presença de vetores, por mudanças ambientais e processos adaptativos. Deste conjunto, as mudanças climáticas e suas interfaces são promotoras do aumento da disseminação viral e possibilidade saltatória entre espécies. (Figura 2).

Figura 2 – Ciclo viral



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Dentre as doenças virais mais impactadas pelas mudanças climáticas, estão as arboviroses. Grupo de doenças causadas por vírus transmitidos por artrópodes

hematófagos, como mosquitos e carrapatos, denominados arbovírus (*Arthropod-borne virus*). Essa designação refere-se não apenas ao fato de esses vírus utilizarem artrópodes como vetores, mas também ao envolvimento desses organismos em parte do ciclo de replicação viral (Rust, 2012; Donalisio; Freitas; Von Zuben, 2017). Tais enfermidades representam um dos maiores desafios para a saúde pública global, sobretudo em regiões tropicais e subtropicais, onde as condições ambientais favorecem a proliferação dos vetores responsáveis pela transmissão (Lima-Camara, 2016; Brasil, 2023a).

Os arbovírus que causam doenças em humanos e outros animais de sangue quente são membros de diversas famílias, sendo que as mais importantes são: *Peribunyaviridae*, *Phenuiviridae*, *Nairoviridae*, *Togaviridae*, *Flaviviridae*, *Reoviridae* e, em menor proporção, *Rhabdoviridae* (ICTV, 2025).

A família anteriormente denominada *Bunyaviridae*, atualmente dividida por *Peribunyaviridae*, *Phenuiviridae*, *Hantaviridae* e *Nairoviridae*, inclui diversos vírus de importância epidemiológica. Dentro dessas famílias estão arbovírus com RNA que infectam vertebrados, invertebrados e plantas (Elliott, 2008; Bowden *et al.*, 2013). Os gêneros com maior importância zoonótica são *Nairovirus, Phlebovirus, Hantavirus, Orthobunyavirus* e *Tospovirus* (Elliott, 2008). Esses vírus são transmitidos por mosquitos, flebotomíneos e carrapatos, com exceção do gênero *Hantavirus*, que infecta roedores e são transmitidos por inalação de aerossóis dos dejetos destes animais (Mayo Clinic, 2024; CDC, 2023).

O gênero *Nairovirus* (Nairoviridae) inclui sete espécies que são aceitas pelo Comitê Internacional de Taxonomia de Vírus (Kuhn *et al.*, 2016; ICTV, 2025). O nairovírus mais importante com impacto na saúde pública é o vírus da febre hemorrágica da Crimeia-Congo transmitido por carrapatos (CCHFV), que causa uma febre hemorrágica viral frequentemente letal na Ásia Ocidental, nos Bálcãs, no sul da Europa e na maior parte da África (WHO, 2025). Atualmente, a sua distribuição tem se expandido para áreas mais ao norte da Europa devido ao aumento das temperaturas (WHO, 2025).

O gênero *Phlebovirus* (Phenuviridae) inclui vírus que infectam mamíferos, incluindo animais de criação e humanos. Vários membros do gênero *Phlebovirus* causam epidemias epizoóticas em animais de criação e humanos (ICTV, 2025).

Muitos destes eventos, como o aumento do número de casos da Febre do Vale do Rift (FVR) no leste e sul da África, estão relacionados a chuvas intensas e inundações que ampliam criadouros de mosquitos (Anyamba *et al.*, 2019).

A nível de Brasil, o gênero de vírus com maior relevância é o *Orthobunyavirus* (Peribunyaviridae). O qual inclui o vírus Oropouche, arbovírus transmitido pelo *Culicoides paraensis*, um inseto conhecido popularmente como maruim, mosquito-pólvora ou polvinha, causador da Febre Oropouche (Silva, 2024; Brasil, 2025b). Após picar uma pessoa ou um animal infectado, o vírus fica no inseto por alguns dias e quando esse inseto pica uma pessoa saudável, pode passar o vírus para ela (Brasil, 2025b). Condições climáticas mais quentes e úmidas favorecem a expansão geográfica do vetor e o aumento da taxa de replicação viral (Lowe *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2024).

Da família *Togaviridae* o gênero *Alphavirus* inclui os arbovírus Chikungunya e Mayaro e diversos vírus que acometem outros animais ocasionando episódios graves de encefalites, como em equinos (Chen *et al.*, 2018).

A febre chikungunya é uma doença de origem zoonótica causada pelo vírus Chikungunya (CHIKV), cujo ciclo silvestre em partes da África envolve mosquitos do gênero *Aedes* e primatas não-humanos, enquanto em países como o Brasil, onde o vírus convive com *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*, predomina um ciclo urbano de transmissão (Fiocruz, 2013; 2014). Desde os primeiros casos registrados no Brasil em 2010, o país assistiu, entre 2017 e 2024, a um aumento progressivo e espacialmente heterogêneo dos casos, acompanhando a tendência regional nas Américas, onde 410.754 casos foram notificados em 2023 (OPAS, 2024). Essa escalada tem sido fortemente associada às mudanças climáticas, que atuam como determinante ambiental primário ao favorecer a proliferação de *A. aegypti* (Heath; Alves; Bonsall, 2025). Estudos epidemiológicos e modelos espaciais indicam que o aumento das temperaturas acelera o ciclo de vida do vetor e reduz o período de incubação extrínseca do vírus, enquanto eventos climáticos extremos como o El Niño e padrões irregulares de precipitação ampliam a disponibilidade de criadouros (Mbaika *et al.*, 2016; Delrieu *et al.*, 2023; Doeurk *et al.*, 2025). Um exemplo relevante é a expansão da transmissão para áreas anteriormente consideradas de baixa adequação climática, como a região Sul do Brasil, onde o progressivo aumento de temperaturas e maior

umidade, associado à dinâmica de urbanização, criam condições favoráveis à transmissão autóctone, reforçando a necessidade de políticas públicas que incorporem a vulnerabilidade socioambiental em um contexto de urbanização acelerada (Heath; Alves; Bonsall, 2025)

A doença de Mayaro é uma enfermidade transmitida principalmente por mosquitos do gênero *Haemagogus* e com sintomas semelhantes aos da febre chikungunya e da dengue, como febre, dor de cabeça, mialgia, artralgia e exantema. Geralmente, a doença é autolimitada. Embora raras, manifestações graves, como poliartrite crônica, hemorragia, miocardite e problemas neurológicos, já foram registradas (Acosta-Ampudia *et al.*, 2018; CDC, 2024). Com ciclo epidemiológico semelhante ao da febre amarela silvestre, o vírus (MAYV) causador da doença Mayaro circula nas florestas do norte do Brasil desde o registro do primeiro surto em 1955. Sendo considerada uma zoonose silvestre, a espécie humana atua como hospedeiro ocasional. No entanto, estudos evidenciam a possibilidade de infecção do *Aedes aegypti* pelo MAYV o que poderia favorecer a transmissão urbana (Brasil, 2025c). Além disso, uma expedição realizada na Amazônia ao longo da rodovia BR-319, que liga Porto Velho (RO) a Manaus (AM), detectou a presença do vírus Mayaro em mosquitos e humanos nas proximidades. Pesquisas como estas evidenciam que intervenções em ambientes com alta biodiversidade, como a Floresta Amazônica, aumentam o contato da população com microrganismos causadores de doenças (Tallmann, 2025).

A família *Flaviviridae*, especialmente o gênero *Flavivirus,* reúne diversos arbovírus de importância médica, sendo algumas espécies causadoras de encefalites e outras de febres hemorrágicas em humanos e animais. No Brasil, vários destes arbovírus têm sido identificados como importantes agentes causadores de infecções em humanos. Entre eles, os de maior importância epidemiológica e de impacto para a saúde pública são os vírus da dengue, o Zika vírus e o vírus da febre amarela (Silva *et al.*, 2023).

A dengue é uma doença viral aguda que geralmente apresenta evolução benigna na maioria das pessoas (Brasil, 2024b). Pode se manifestar de duas maneiras clínicas: Dengue Clássico e Febre Hemorrágica do Dengue (FHD)/Síndrome do Choque do Dengue (SCD). Trata-se da virose urbana mais prevalente no mundo

(Brasil, 2016a; OPAS/OMS, 2024). Ocorre principalmente em regiões tropicais e subtropicais, onde o ambiente propicia a proliferação do mosquito *Aedes aegypti* (Fiocruz, 2024). A dengue é provocada pelo flavivírus (DENV) mais relevante no Brasil, com indícios de sua presença no país há muitos anos. O DENV é composto por quatro sorotipos: DENV-1, DENV-2, DENV-3 e DENV-4 (Agência Brasil, 2025; SES-DF, 2025), o que favorece a disseminação, pois após a infecção a pessoa torna-se imune a apenas o sorotipo infectante.

Outro flavivírus transmitido pelo *A. aegypti* de importância médica é o Zika vírus (ZIKV) causador da zika, uma doença viral febril aguda (Brasil, 2024b). Apesar da principal forma de transmissão ser a vetorial, há evidências de transmissão sexual, vertical e transfusional (Fiocruz, 2024; CDC, 2023). A doença costuma apresentar evolução benigna, com manifestações como febre baixa, exantema, artralgia e conjuntivite; no entanto, tornou-se um importante problema de saúde global após a emergência dos surtos de 2015–2016, associados à ocorrência de síndrome congênita do Zika e complicações neurológicas, como a síndrome de Guillain-Barré (OPAS/OMS, 2016; Brasil, 2017). O vírus circula predominantemente em regiões tropicais e subtropicais, onde fatores climáticos e socioambientais favorecem a proliferação do vetor e ampliam sua capacidade de transmissão.

Em contrapartida, a febre amarela é uma doença viral aguda, de caráter hemorrágico, causada pelo flavivírus da febre amarela (YFV) A enfermidade apresenta dois ciclos epidemiológicos distintos: silvestre, no qual o vírus circula entre primatas não humanos e mosquitos dos gêneros *Haemagogus* e *Sabethes*, e urbano, envolvendo a transmissão por *Aedes aegypti* (Brasil, 2024b). Embora o Brasil não registre transmissão urbana desde 1942, o ciclo silvestre permanece ativo e responsável por surtos recorrentes, especialmente em áreas de expansão da fronteira agrícola e fragmentação florestal. A febre amarela é endêmica em regiões tropicais da África e das Américas, e seu impacto em saúde pública é amplificado pela elevada letalidade em casos graves e pela necessidade de cobertura vacinal ampla para prevenção de epidemias (OPAS/OMS, 2024).

Além das arboviroses, infecções por vírus entéricos como rotavírus e norovírus, permanecem entre as principais causas de morbidade em regiões tropicais, onde fatores climáticos, socioeconômicos e sanitários se combinam para favorecer sua

transmissão (WHO, 2023). Evidências indicam que mudanças climáticas globais como aumento da temperatura, variações na umidade e eventos extremos, especialmente enchentes ampliam a persistência ambiental desses patógenos, favorecendo sua disseminação hídrica e fecal-oral (IPCC, 2022; Levy *et al.*, 2016). Em países de baixa e média renda, esses fenômenos agravam vulnerabilidades já existentes relacionadas ao abastecimento de água e ao tratamento de esgoto. No Brasil, onde persistem desigualdades marcantes em infraestrutura de saneamento, estudos têm demonstrado maior circulação de vírus gastroentéricos após episódios de chuvas intensas e inundações, sobretudo em áreas periféricas urbanas e comunidades ribeirinhas. Esse quadro reforça a urgência de políticas integradas de saneamento básico, vigilância ambiental e adaptação climática para mitigar os efeitos das mudanças ambientais na transmissão de enteropatógenos (Brasil, 2024b).

A família Rhabdoviridae compreende quatro subfamílias, 56 gêneros e 434 espécies de vírus de RNA fita simples (ICTV, 2025), entre os quais o gênero *Lyssavirus* se destaca por incluir o agente etiológico da raiva, uma zoonose viral quase sempre fatal que afeta diversos mamíferos, incluindo humanos. A enfermidade provoca inflamação aguda no sistema nervoso central e, na ausência de intervenção pós-exposição, evolui tipicamente para óbito. A transmissão ocorre por meio do contato da saliva de animais infectados, sobretudo pela mordedura, mas também por arranhaduras ou lambeduras em mucosas ou pele lesionada (Warrell; Warrell, 2004; Fisher *et al.*, 2018; Brasil, 2025d). Nos últimos anos, a expansão geográfica de *Desmodus rotundus*, principal reservatório silvestre do vírus na América Latina, tem sido associada às mudanças climáticas, que promovem alterações nos padrões de temperatura e precipitação. Modelagens ecológicas indicam que essas mudanças ampliam a adequação climática e estendem a área potencial de ocorrência da espécie, possibilitando sua dispersão para regiões anteriormente inadequadas (Subedi *et al.*, 2022; Neves *et al.*, 2024). Esse deslocamento intensifica o contato entre morcegos hematófagos, fauna doméstica, fauna silvestre e populações humanas, elevando o risco de *spillover* do vírus da raiva. No contexto brasileiro, processos como desmatamento, fragmentação de habitats e expansão agropecuária interagem com o aquecimento climático, criando um cenário propício para o surgimento de casos em áreas historicamente consideradas de baixo risco, o que reforça a necessidade de

vigilância epidemiológica fortalecida, ampliação da cobertura vacinal e políticas integradas entre saúde pública, conservação ambiental e ordenamento territorial (Farias, 2021).

Por fim, estas viroses em conjunto evidenciam a interface crítica entre saúde pública, urbanização desordenada, degradação ambiental e mudanças climáticas. O aumento de temperaturas, a intensificação de eventos climáticos extremos e a maior variabilidade de chuvas ampliam a área de ocorrência de vetores, elevando o risco de transmissão de arboviroses para regiões anteriormente consideradas menos adequadas, incluindo partes do Sudeste e do Sul do Brasil. Da mesma forma, enteroparasitoses de veiculação hídrica tendem a se agravar em cenários de enchentes, contaminação de recursos hídricos e falhas no saneamento, enquanto a raiva, especialmente aquela associada à expansão geográfica de *Desmodus rotundus*, pode se tornar mais frequente em áreas rurais e periurbanas pressionadas por mudanças ambientais e climáticas que intensificam o contato entre humanos, animais domésticos e fauna silvestre. Esse cenário reforça a necessidade de políticas públicas integradas que considerem vulnerabilidade socioambiental, vigilância epidemiológica, manejo ambiental e adaptação climática como eixos estruturantes para o enfrentamento sustentável das viroses no país.

2.2 BACTERIOSES

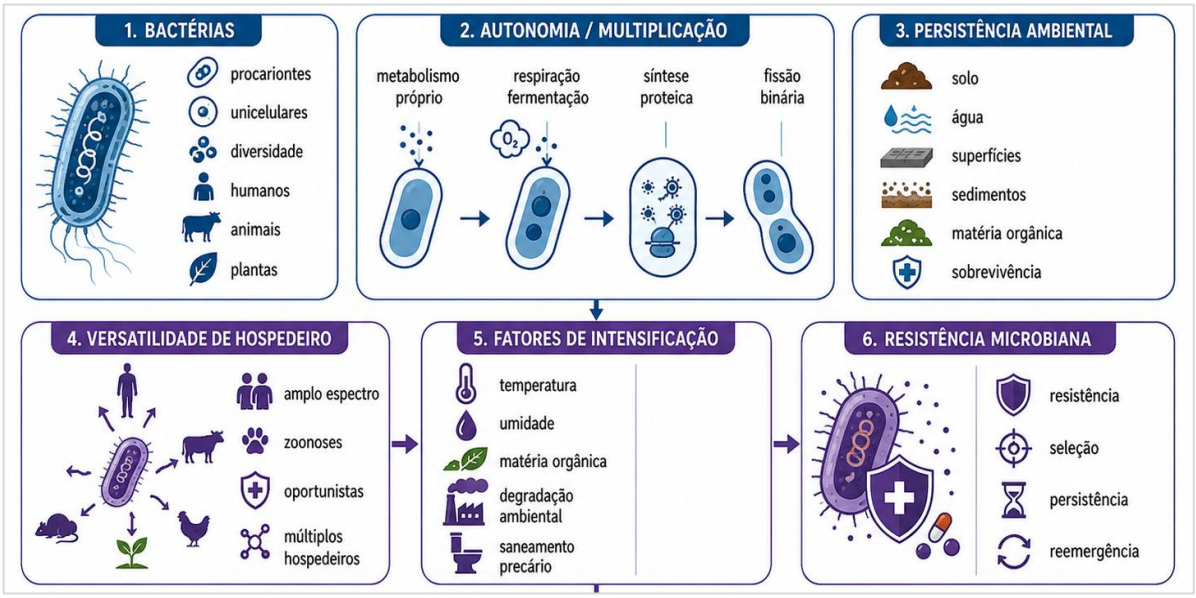
As bacterioses são doenças causadas por bactérias, organismos procariontes unicelulares pertencentes ao domínio *Bacteria*, caracterizados pela ausência de núcleo verdadeiro e de organelas membranosas. Apesar de apresentarem estrutura celular simples, as bactérias exibem grande diversidade morfológica, metabólica e ecológica, o que lhes confere elevada plasticidade adaptativa em diferentes ambientes (Nogueira; Silva Filho, 2015).

Diferentemente dos vírus, que são parasitas intracelulares obrigatórios e dependem completamente da maquinaria metabólica do hospedeiro para se replicar, as bactérias são, em sua maioria, organismos autônomos, capazes de realizar processos metabólicos próprios, como respiração, fermentação e síntese proteica. Essa autonomia lhes permite sobreviver e multiplicar-se em substratos ambientais,

como solo, água, superfícies orgânicas e sedimentos, mesmo na ausência de um hospedeiro (Tortora; Funke; Case, 2012).

Outra característica importante é que muitas espécies bacterianas não apresentam especificidade restrita de hospedeiro, podendo infectar diferentes organismos, inclusive humanos, animais e plantas. Essa versatilidade ecológica amplia seu potencial epidemiológico, favorecendo a ocorrência de zoonoses e infecções oportunistas em múltiplos contextos (Tortora; Funke; Case, 2012). Em condições ambientais favoráveis — como aumento de temperatura, umidade e disponibilidade de matéria orgânica —, algumas bactérias patogênicas podem manter-se viáveis e ativas por longos períodos fora do organismo hospedeiro, o que contribui para sua persistência ambiental e capacidade de reemergência (Figura 3).

Figura 3 – Bacterioses e Mudanças Climáticas.



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Essas características, associadas à resistência microbiana tornam as bacterioses um importante desafio de saúde pública, especialmente em cenários de mudanças climáticas e degradação ambiental, que alteram a dinâmica ecológica das populações bacterianas e ampliam o risco de disseminação de doenças infecciosas (OMS, 2023; Kounatidis *et al.*, 2025).

Dentre elas, destaque para as zoonoses leptospirose e febre maculosa e as de ciclo fecal-oral cólera e febre tifóide, todas de notificação compulsória em território

nacional e que, podem ter a disseminação amplificada mediante eventos extremos agravados pelo aumento da temperatura média da Terra.

A lepstopirose é uma zoonose bacteriana emergente causada por espiroquetas do gênero *Leptospira* encontrada na urina de animais infectados, sendo considerada a zoonose bacteriana mais comum em todo o mundo (Baharom *et al.*, 2023; Lau *et al.,* 2010). Os sinais clínicos desta doença variam de sintomas semelhantes aos da gripe até manifestações graves, como insuficiência renal, hepática e hemorragia pulmonar grave (Lau *et al.*, 2010). Os humanos adquirem a doença quando em contato direto com hospedeiros reservatórios ou quando expostos de forma indireta a água e solo contaminado (Baharom *et al.*, 2023). Fatores como, exposição à água contaminada, deficiências de infraestrutura, saneamento inadequado e exposição ocupacional estão associados à transmissão dessa doença (Baharom *et al.*, 2023). Recentemente, em 2024, com as enchentes ocorridas no Rio Grande do Sul, Ranieri *et al.* (2025) verificaram um aumento de 10 vezes no número de casos e de 6 vezes no número de mortes causadas por leptospirose, quando comparado com o mesmo período de 2023. Esses mesmos autores verificaram uma forte correlação entre as taxas de incidência da doença e a porcentagem da população que tiveram domicílios inundados, indicando que foram expostos a essa bactéria também durante os esforços de limpeza. Em um estudo similiar realizado no estado de Santa Catarina, Silva *et al.* (2022) analisaram as tendências de incidência da leptospirose entre 2000 e 2015 em seis municípios. Os pesquisadores observaram que picos de incidência coincidiram com grandes desastres naturais no estado (2008 e 2011), ocorrendo no mesmo mês ou no mês imediatamente seguinte aos desastres, com uma tendência maior de ocorrer nos meses do verão. Em conjunto, esses estudos evidenciam que eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e inundações, aumentam o risco de surtos de leptospirose, uma vez que colocam a bactéria e seus hospedeiros em contato mais próximo com os humanos.

O aumento das temperaturas médias, a maior irregularidade das chuvas e a elevação da umidade relativa criam condições favoráveis à sobrevivência e reprodução de artrópodes, como os carrapatos. No contexto brasileiro, essas mudanças têm sido associadas à expansão de bacterioses, como a febre maculosa brasileira, causada pela bactéria *Rickettsia rickettsii* e transmitida principalmente por

carrapatos do gênero *Amblyomma* (Nogueira *et al.*, 2022; Bezerra-Santos *et al.*, 2023). Paralelamente, observa-se também um impacto sobre espécies de importância veterinária, como *Rhipicephalus microplus*, cujo ciclo de vida tende a se acelerar em condições mais quentes e úmidas, resultando em um aumento do número de gerações anuais e na maior pressão parasitária sobre os hospedeiros (Nicaretta *et al.*, 2021). Essa intensificação dos ciclos biológicos pode contribuir para o aumento da resistência acaricida, tornando o controle químico menos eficiente. Assim, o cenário de aquecimento global não apenas favorece a expansão geográfica e temporal dos carrapatos, mas também potencializa a disseminação de patógenos bacterianos e o risco de transmissão de zoonoses, exigindo estratégias integradas de vigilância e manejo que considerem os impactos das mudanças climáticas na interface entre saúde animal, humana e ambiental.

Outra doença mundialmente importante e muito debatida quando se discute Saúde Única e mudanças climáticas, mas que não é uma zoonose, é a cólera. Essa enfermidade é causada pela bactéria *Vibrio cholerae*, um bacilo gram-negativo que reside naturalmente em ecossistemas aquáticos (Asadgol *et al.*, 2020; Christaki *et al.*, 2020). A cólera é classicamente transmitida pela ingestão de água ou alimentos contaminados (Asadgol *et al.*, 2020; Christaki *et al.*, 2020; Brasil, 2010a). A bactéria pode ser encontrada livre ou em associação com o zooplâncton, em particular os copépodes (Colwell; Huq, 1994). As mudanças climáticas, como o aumento da temperatura, que favorecem os florescimentos de fitoplâncton e consequentemente de zooplâncton levam ao aumento da população de *V. cholerae*, elevando o risco de infecção em humanos que consomem água não tratada (Colwell; Huq, 1994; Lipp; Huq; Colwell, 2002). Ao mesmo tempo, as chuvas fortes e inundações podem saturar e comprometer sistemas de saneamento e tratamento de águas, resultando na contaminação de fontes de água potável e aumento da exposição humana ao patógeno (Girotto *et al.*, 2024). Aumentos no número de casos de cólera foram observados durante ou imediatamente após períodos de chuvas intensas e altas temperaturas em diversas regiões da África e da América Latina (Girotto *et al.*, 2024; Lipp; Huq; Colwell, 2002).

Mundialmente, a África possui uma tendência consistente de aumento na mortalidade devido à cólera. Entre 2000 e 2015, a região respondeu por 83% das

mortes globais relacionadas a essa enfermidade (Lessler *et al.*, 2018). Trabalhos apontam que o acesso limitado a água e saneamento, juntamente com o aumento da temperatura e precipitação, são fatores críticos que aumentam o risco de surtos de cólera (Girotto *et al.*, 2024). Na América Latina, a doença ressurgiu no Peru em 1991 e se espalhou pelo continente. Esse surto foi associado a um evento El Niño que causou aquecimento das águas e florescimentos de fitoplâncton que sustentou populações de zooplâncton, especialmente os copépodes, facilitando a amplificação de cepas de *V. cholerae* (Lipp; Huq; Colwell, 2002). O Brasil viveu uma epidemia de cólera nessa mesma década, que se iniciou no Estado do Amazonas e se alastrou, sobretudo para a região Norte e Nordeste (Gerolomo; Penna, 1999). Este fenômeno é explicado, na maioria, pelas condições precárias de saneamento ambiental, o que facilitou a implantação e disseminação do vibrião. Na Amazônia, ocorreu uma sazonalidade da doença com picos coincidindo com a diminuição nos níveis de água dos rios da região (Gerolomo; Penna, 1999), reforçando a hipótese de que o *Vibrio cholerae* possa estar estabelecido em algum nicho ecológico da região amazônica. Atualmente o número de casos está controlado no país, no entanto, condições ambientais como elevada precipitação seguido de inundações e enchentes associadas a precariedade do sistema de esgotamento sanitário podem aumentar a incidência e prevalência da doença em algumas regiões do país.

Com ciclo epidemiológico semelhante, a febre tifoide, causada pela bactéria gram-negativa *Salmonella enterica* sorotipo Typhi (*Salmonella* Typhi) também é uma enfermidade que tem a propagação do agente patogênico alterada pelas mudanças climáticas (Jia *et al.*, 2024). Transmitida por alimentos e água contaminada com fezes humanas, a presença da *Salmonella* está fortemente associada às condições de saneamento e higiene pessoal (Brito *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2024). Inclusive, a febre tifoide é considerada uma doença-sentinela e um importante indicador de vulnerabilidade socioambiental, pois sua ocorrência revela falhas no saneamento básico, na segurança alimentar e na infraestrutura de abastecimento de água e tratamento de esgoto, refletindo profundas desigualdades sociais e ambientais (Brasil, 2023b).

Embora sua incidência no Brasil tenha diminuído nas últimas décadas (Brasil, 2010b; Brito *et al.*, 2020), em países da África e do Sudoeste Asiático a sua incidência

é alta, resultando em mais de 100.000 mortes anuais (Walker *et al.*, 2023), sendo um dos agentes de transmissão hídrica mais comuns nessas localidades (Jia *et al.*, 2024). Porém, mediante a gravidade da doença e o mecanismo de disseminação, a febre tifoide continua sendo monitorada pelo Sistema Nacional de Vigilância Epidemiológica.

No contexto das mudanças climáticas, diversos estudos apontam que o aumento da temperatura, a elevação do nível do mar e os extremos climáticos como enchentes, secas prolongadas com subsequente contaminação de mananciais aceleram a prevalência e aumentam o risco de reemergência da febre tifóide e de outras doenças transmitida pela água em comunidades expostas (Liu *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2023; Jia *et al.*, 2024). Além disso, a elevação das temperaturas médias favorece a sobrevivência e replicação de *S. Typhi* em ambientes aquáticos e alimentos, intensificando a possibilidade de surtos em áreas tropicais e subtropicais. Dessa forma, a febre tifóide ilustra como as alterações climáticas e a degradação ambiental interagem com determinantes sociais da saúde, exigindo estratégias integradas de vigilância epidemiológica, saneamento e adaptação climática. Ao mesmo tempo, devido ao aumento das taxas de infecção por febre tifoide, a *S. Typhi* está cada vez mais resistente aos antimicrobianos, incluindo os de primeira linha amplamente prescritos — cloranfenicol, cotrimoxazol e amoxicilina (Jia *et al.*, 2024).

Infelizmente este é um problema e uma preocupação global que se estende a vários outros agentes patogênicos. De acordo com a OMS (2023), a resistência antimicrobiana (RAM) é reconhecida como uma das dez maiores ameaças globais à saúde pública, que deverá causar cerca de 10 milhões de mortes anualmente até 2050. Nesse cenário, ressalta-se o papel das mudanças climáticas no desenvolvimento da RAM.

De acordo com a revisão de escopo realizada por Salgueiro *et al.* (2024), as mudanças climáticas, ao provocarem aquecimento e variações térmicas, podem modificar ecossistemas e alterar a distribuição de comunidades microbianas, afetando as interações entre bactérias e outros organismos. Tais alterações, associadas a modificações na temperatura, nos padrões de precipitação e nos sistemas ecológicos, podem favorecer a troca de genes de resistência entre espécies bacterianas distintas e ampliar a disseminação de doenças transmissíveis, levando ao aumento do uso —

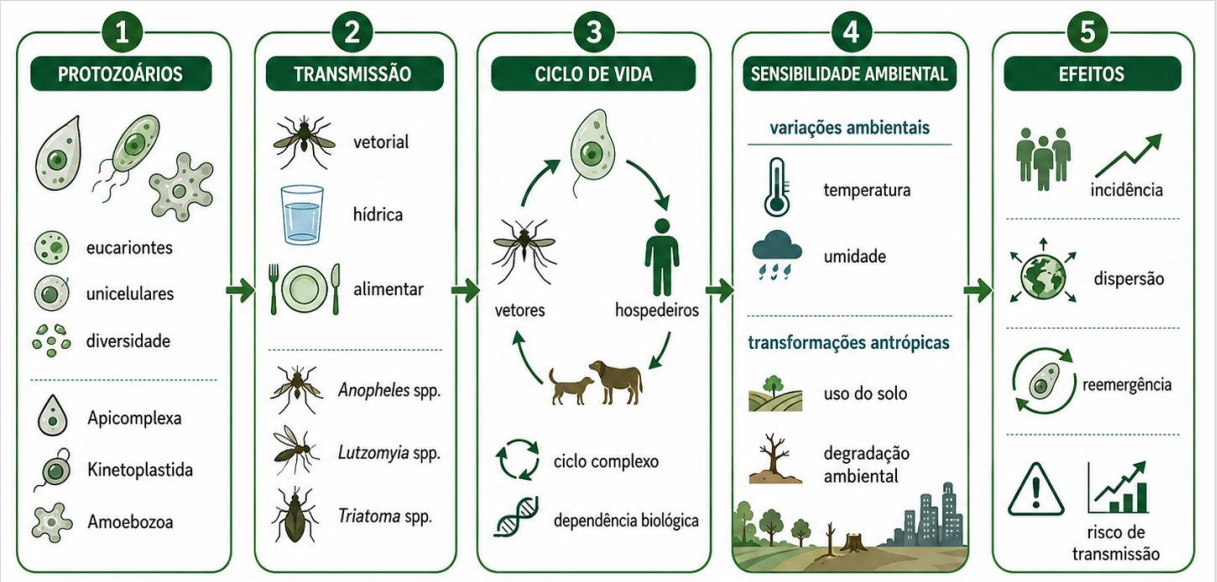
e, por vezes, do uso inadequado — de antibióticos, o que potencializa o desenvolvimento da resistência antimicrobiana. Além disso, a transmissão de genes de resistência a antibióticos (GRAs) é mais provável durante eventos climáticos extremos, uma vez que a água contaminada pode entrar mais facilmente no abastecimento alimentar (Irfan; Almotiri; AlZeyadi, 2022; Jia *et al*, 2024).

Diante desse cenário, as bacterioses representam um grupo de enfermidades de alta relevância para a saúde pública contemporânea, cuja dinâmica de transmissão e impacto epidemiológico vêm sendo fortemente influenciados pelas mudanças climáticas e pela degradação ambiental. As evidências científicas demonstram que o aquecimento global, o aumento da umidade e os eventos climáticos extremos modificam os habitats microbianos, ampliando as oportunidades de contato entre agentes patogênicos, reservatórios e seres humanos. Essas transformações exigem uma abordagem integrada, interdisciplinar e preventiva, em consonância com os princípios da Saúde Única, reconhecendo a interdependência entre saúde humana, animal e ambiental. Ademais, o avanço da resistência antimicrobiana reforça a necessidade de vigilância contínua, uso racional de antibióticos e fortalecimento das políticas de saneamento e adaptação climática. Dessa forma, compreender a ecologia das bacterioses sob o prisma das mudanças globais é fundamental para promover respostas mais adequadas frente aos desafios emergentes da saúde planetária.

2.3 PROTOZOOSES

Protozooses são doenças causadas por protozoários, microrganismos unicelulares eucarióticos que apresentam ampla diversidade morfológica e fisiológica (Neves, 2016). Esses agentes etiológicos pertencem a diferentes grupos taxonômicos, como *Apicomplexa*, *Kinetoplastida* e *Amoebozoa*, e podem ser transmitidos por múltiplas vias, incluindo a vetorial, hídrica e alimentar. Muitos desses agentes etiológicos dependem de hospedeiros para completar o ciclo de vida, frequentemente envolvendo vetores artrópodes, como mosquitos (*Anopheles* spp.), flebotomíneos (*Lutzomyia* spp.) e triatomíneos (*Triatoma* spp.) (WHO, 2023). (FIGURA 4)

Figura 4 – Protozooses e Mudanças Climáticas



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Nesse contexto, diversas protozoonoses sensíveis às variações ambientais e às transformações antrópicas têm apresentado alterações em seus padrões de incidência e dispersão. Entre elas, destaca-se a malária, que representa uma das mais graves, ocasionada por espécies do gênero *Plasmodium* spp. e transmitida por insetos do gênero *Anopheles* spp. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2024), foram notificados cerca de 263 milhões de casos em 2023, resultando em aproximadamente 597 mil óbitos, sobretudo em países da África Subsaariana, o que evidencia a persistência da doença como um importante desafio global. No âmbito nacional, a malária apresenta maior incidência na Região Norte, onde, entre os anos de 2013 e 2023, foram notificados 1.642.714 casos na região amazônica, dos quais aproximadamente 86% foram atribuídos ao *Plasmodium vivax* (Reis *et al.*, 2025). A dinâmica de transmissão nessa região é determinada pelas especificidades ecológicas e socioeconômicas, as quais variam conforme os padrões de ocupação territorial. Áreas destinadas a atividades econômicas extrativistas, agrícolas, urbanas, periurbanas e reservas indígenas apresentam perfis distintos de transmissão, uma vez que envolvem populações humanas com características demográficas, sociais e econômicas diversas (Lana *et al.,* 2017). As estratégias de eliminação da malária na Amazônia enfrentam limitações significativas, entre as quais se destacam o desmatamento acelerado e o crescimento das atividades de garimpo, fatores que

induzem transformações ambientais que favorecem a expansão vetorial e sustentam a cadeia de transmissão (Meireles *et al.*, 2022).

Outra doença preocupante é a doença de Chagas, causada pelo protozoário *Trypanosoma cruzi*, transmitida principalmente por insetos hematófagos pertencentes aos gêneros *Triatoma, Rhodnius e Panstrongylus*. Estima-se que entre 6 e 7 milhões de pessoas estejam atualmente infectadas em nível global, com maior concentração de casos na América Latina, especialmente no Brasil, Bolívia e Argentina (WHO, 2024b). No Brasil, foram notificados 2.777 casos agudos da doença entre os anos de 2010 e 2020, sendo a Região Norte responsável por 84% dessas notificações. Dentre os estados da região, o Pará concentrou o maior número de registros, totalizando 1.996 casos agudos (Reis *et al.*, 2025). A partir de 2021, observa-se crescimento nas notificações, associada principalmente à transmissão oral, vinculada à ingestão de alimentos contaminados (Oliveira *et al.*, 2025). O deslocamento de populações humanas e animais domésticos de áreas rurais para centros urbanos, somado à capacidade dos vetores de se estabelecerem em ambientes periféricos em decorrência de alterações ambientais provocadas por desmatamento e urbanização, tem contribuído para a continuidade do ciclo de transmissão. Embora a prevalência permaneça elevada na Região Norte, episódios de transmissão oral, expansão urbana e casos de infecção congênita configuram desafios adicionais que exigem ações estratégicas mais eficazes voltadas à prevenção e ao controle (Cucunubá *et al.*, 2024).

A leishmaniose é uma doença infecciosa de evolução crônica, causada por protozoários do gênero *Leishmania* spp., transmitida ao ser humano por meio da picada de fêmeas de flebotomíneos infectados. Clinicamente, manifesta-se predominantemente em duas formas: visceral e tegumentar. A forma visceral, também conhecida como calazar, representa a forma mais comum, prevalente e severa da enfermidade, correspondendo a cerca de 68% dos casos. Caracteriza-se pelo comprometimento de órgãos internos, como fígado, baço e medula óssea, podendo evoluir para óbito quando não tratada adequadamente (Schröder *et al.*, 2023). Já a forma tegumentar apresenta-se nas variantes cutânea, mucosa e mucocutânea, com lesões ulcerativas de diferentes intensidades que acometem a pele e estruturas cartilaginosas da nasofaringe, frequentemente associadas a desfiguração e evolução prolongada. A doença está presente nas Américas, África Oriental e do Norte, bem

como nas regiões Oeste e Sudeste da Ásia, figurando entre as dez principais doenças tropicais negligenciadas (DTNs) e sendo endêmica em 99 países (OPAS, 2020). Sua distribuição geográfica está fortemente associada a fatores socioeconômicos, ambientais e climáticos, que influenciam diretamente sua dinâmica epidemiológica (OPAS, 2020). O Brasil destaca-se entre os países com maior número de casos registrados, especialmente da forma visceral, cuja transmissão ocorre principalmente por meio do flebotomíneo *Lutzomyia longipalpis*, tendo o cão doméstico (*Canis familiaris*) como principal reservatório. No contexto nacional, a leishmaniose visceral é endêmica nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, e observa-se uma crescente expansão da transmissão em áreas urbanas, impulsionada por alterações ambientais decorrentes do desmatamento, da urbanização desordenada e da capacidade de adaptação do vetor a ambientes peridomiciliares. Tais fatores têm contribuído para o aumento da incidência em zonas urbanas e periurbanas, evidenciando a complexa interação entre determinantes ecológicos, sociais e ambientais na manutenção e disseminação do ciclo de transmissão (Schröder *et al.,* 2023).

Assim como a Leishmaniose, a Toxoplasmose também se destaca entre as protozooses de importância clínica e epidemiológica. Trata-se de uma doença infecciosa sistêmica causada pelo parasita intracelular obrigatório *Toxoplasma gondii*, amplamente distribuída em regiões de clima quente e úmido. Sua prevalência varia conforme as características geográficas, fatores culturais e hábitos alimentares das populações (Mello *et al.*, 2022). Trata-se de uma zoonose, tendo os felídeos como hospedeiro definitivo e os demais vertebrados homeotérmicos como intermediários. A colonização parasitária em humanos ocorre principalmente pela ingestão de cistos presentes em água e alimentos contaminados, especialmente em carne crua, mal cozida e hortaliças irrigadas com água contaminada, além do contato direto com gatos, solo ou esterco contendo cistos. Embora muitos casos sejam assintomáticos, a doença torna-se particularmente preocupante em gestantes, pois pode causar infecção congênita, levando a aborto, morte neonatal, parto prematuro ou malformações congênitas (Mello *et al.*, 2022). Com as mudanças climáticas, observa-se um agravamento na dinâmica de transmissão da doença, pois o aumento da temperatura, a intensificação das chuvas, as enchentes e a maior instabilidade ambiental favorecem a dispersão dos oocistos no solo e nos recursos hídricos,

ampliando o risco de contaminação da água e dos alimentos (Kumar *et al.*, 2024; Carmo *et al.*, 2025).

Com ciclo independente de outros animais, as infecções por protozoários de transmissão intestinal (ciclo fecal-oral) apresentam ampla distribuição geográfica e ocorrem em todas as regiões do mundo, embora sua prevalência seja influenciada por fatores ambientais, domésticos, nutricionais e pelas condições de infraestrutura e saneamento. Entre os principais fatores de risco está a falta de acesso à água potável e ao saneamento básico adequado. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2023) em 2023, cerca de 26% da população mundial - aproximadamente 2 bilhões de pessoas, não tinham acesso a serviços de água potável, enquanto 46% da população mundial, cerca de 3,6 bilhões de pessoas, não contavam com saneamento adequado, situação que favorece a disseminação de protozooses intestinais e representa um grave problema de saúde pública global.

A colonização parasitária ocorre principalmente pela ingestão de cistos ou oocistos presentes em fezes, solo, água ou alimentos contaminados. Entre as espécies mais prevalentes associadas às enteroparasitoses destacam-se *Entamoeba histolytica* e *Giardia intestinalis*, capazes de comprometer o estado nutricional do hospedeiro, afetando, sobretudo, a absorção e o metabolismo de macro e micronutrientes. Como consequência, essas infecções podem provocar diarreia crônica, anemia ferropriva e subnutrição, resultando em atraso no crescimento, prejuízos ao desenvolvimento neuropsicomotor, redução da função imunológica e diminuição da capacidade produtiva e intelectual (Silva *et al.*, 2016).

A disseminação dos agentes etiológicos de doenças de transmissão fecal-oral veiculadas pela água e alimentos contaminados, pode ser significativamente ampliada por eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e inundações, que favorecem a contaminação de corpos hídricos e sistemas de abastecimento (Levy *et al.*, 2016; Cann *et al.*, 2013). Em regiões com saneamento básico insuficiente, a alta precipitação pode transportar patógenos entéricos para fontes de consumo humano, elevando a incidência de diferentes enfermidades (WHO, 2023; IPCC, 2022).

As protozooses representam um desafio significativo à saúde pública, especialmente em contextos marcados por desigualdades sociais, pela precariedade em saneamento básico e pelas intensas transformações ambientais. A persistência e

a expansão dessas doenças indicam a necessidade urgente de políticas públicas integradas, respaldadas na vigilância epidemiológica contínua, no fortalecimento da atenção básica à saúde e no incentivo à pesquisa científica direcionada à compreensão dos determinantes ecológicos e sociais.

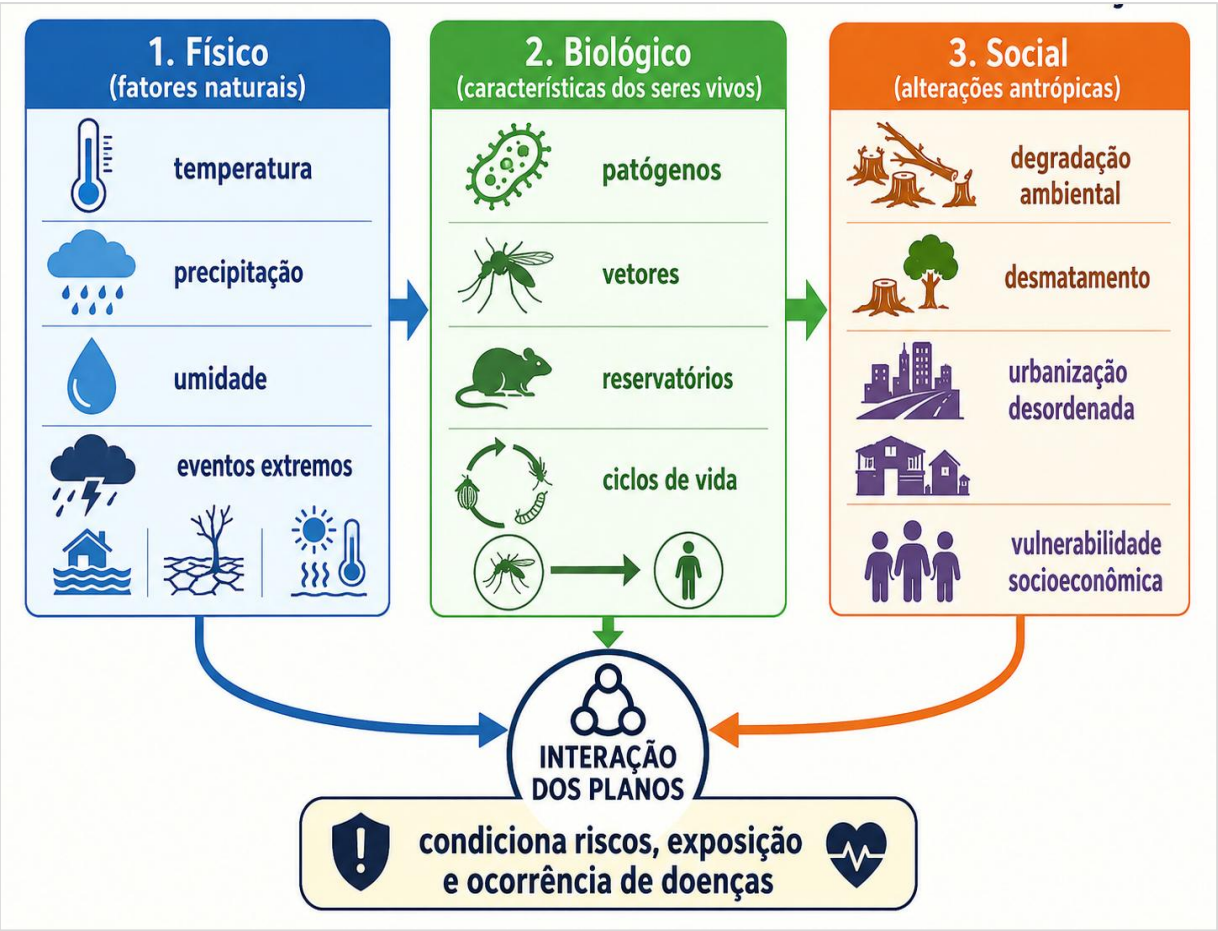
3 ADAPTAÇÃO DO SISTEMA DE VIGILÂNCIA EPIDEMIOLÓGICA FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As profundas transformações socioambientais que caracterizam o Antropoceno exigem que, no Brasil, o Sistema Único de Saúde (SUS) reformule suas estratégias tradicionais de atuação. Uma vez compreendido que os aspectos demográficos, climáticos, ambientais e epidemiológicos são intrinsecamente indissociáveis, torna-se imperativo traçar estratégias e planos de adaptação que fortaleçam a resiliência sanitária e a capacidade de resposta dos serviços de saúde frente às emergências climáticas (Bispo Júnior, 2022; Barcellos *et al.*, 2009). Nesse contexto, a vigilância epidemiológica e a vigilância de zoonoses deixam de ser meras instâncias de registro reativo de casos humanos para se tornarem sistemas dinâmicos e preditivos de salubridade ambiental e territorial.

3.1 ELO CONCEITUAL: DA SAÚDE ÚNICA AO COMPLEXO PATOGÊNICO TERRITORIAL

Para que a adaptação da vigilância epidemiológica seja efetiva, ela deve dialogar diretamente com os marcos teóricos que fundamentam a relação entre saúde e ambiente discutidos neste capítulo. A fundamentação clássica do “Complexo Patogênico” de Maximilien Sorre e da “Patobiocenose” de Pavlovsky adquire renovada relevância no cenário das mudanças climáticas (Guimarães; Catão; Casagrande, 2018; Pignatti, 2004). O processo saúde-doença não se restringe à interação isolada entre um agente etiológico e um hospedeiro, mas é condicionado pelo equilíbrio dinâmico entre três planos: Físico, Biológico e Social. (FIGURA 5)

Figura 5 – Três planos do processo saúde-doença



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

No contexto do aquecimento global, as alterações no plano físico (como a elevação da temperatura média terrestre e a maior frequência de secas e inundações extremas) repercutem de forma imediata no plano biológico. Isso acelera o ciclo de vida e expande a distribuição geográfica de vetores e reservatórios silvestres (como mosquitos *Aedes spp*., carrapatos *Amblyomma* e morcegos *Desmodus rotundus*), propiciando o surgimento de patógenos em áreas anteriormente consideradas indenes (Heath; Alves; Bonsall, 2025; Subedi *et al.*, 2022).

Portanto, a reestruturação da vigilância epidemiológica deve ser ancorada na abordagem de Saúde Única (One Health), integrando sistematicamente dados de saúde humana, animal e ambiental (Fiack; Straff; Walther, 2023). Essa integração conceitual e operacional permite antecipar as ameaças sistêmicas à saúde planetária, transformando a vigilância epidemiológica em uma ferramenta de governança adaptativa e intersetorial.

3.2 O PAPEL DAS UNIDADES DE VIGILÂNCIA DE ZOONOSES (UVZ) E A DINÂMICA DE VIGILÂNCIA ATIVA E PASSIVA

A operacionalização das ações de vigilância ocorre de forma descentralizada no âmbito local, onde as especificidades territoriais se manifestam. Historicamente estruturadas a partir da década de 1990 para apoiar a prevenção e o controle de agravos zoonóticos e acidentes por animais peçonhentos, as Unidades de Vigilância de Zoonoses (UVZ) do SUS — respaldadas por normas técnicas federais como as Portarias MS/SAS nº 758 e MS/GM nº 1.138 de 2014 — constituem os principais braços executores dessa dinâmica territorial (Brasil, 2014). Frente às mudanças climáticas, o funcionamento das UVZ deve ser potencializado por meio de um equilíbrio estratégico entre as vigilâncias ativa e passiva. (FIGURA 6).

Figura 6 – Operacionalização integrada do Sistema de Vigilância Zoossanitária



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

3.2.1 Vigilância Ativa

Consiste na busca e identificação precoce de riscos biológicos antes que eles se convertam em casos humanos de doença. Sob a égide climática, a vigilância ativa traduz-se no monitoramento sistemático de:

- Vetores e sua adequação climática: monitorar a densidade e dispersão de *Aedes aegypti* e *A. albopictus* frente ao aumento de temperaturas e regimes de chuva que criam novos criadouros (Heath; Alves; Bonsall, 2025).
- Reservatórios biológicos: acompanhar a expansão territorial de morcegos hematófagos (*Desmodus rotundus*), cuja dispersão é estimulada pelo aquecimento global e pela fragmentação florestal, aumentando o risco de *spillover* do vírus da raiva (Subedi *et al.*, 2022; Neves *et al.*, 2024).
- Qualidade ecológica da água e do solo: coletar amostras ambientais para detectar a proliferação de bactérias oportunistas como *Leptospira spp*. após episódios de precipitação extrema ou o monitoramento de fitoplâncton/zooplâncton que serve de nicho para *Vibrio cholerae* em ecossistemas aquáticos (Lipp; Huq; Colwell, 2002; Ranieri *et al.*, 2025).

3.2.2 Vigilância Passiva

Articula-se por meio da recepção de notificações de suspeitas de zoonoses e do recebimento de animais mortos ou sintomáticos entregues pela população ou por clínicas veterinárias. Para sua adaptação climática, a vigilância passiva deve incorporar sistemas digitais ágeis de notificação em tempo real, integrando dados laboratoriais públicos e privados e canais de comunicação social rápidos que permitam aos serviços de saúde detectar e conter surtos locais logo após desastres socioambientais, como enchentes e inundações.

A partir das políticas públicas de saúde e sanitárias, o funcionamento da vigilância zoossanitária, em primeira instância uma localidade, deve manter uma vigilância ativa em consonância com políticas nacionais para ampliar ações subsidiadas por normas e padrões com rigor técnico de manejo a fim de identificar precocemente riscos zoonóticos em escala nacional, regional ou emergentes, com

articulação entre órgãos de monitoramento animal, através da análise de informações disponibilizadas na mídia, laboratórios e instituições relacionadas a saúde animal. Através da vigilância passiva operacionaliza-se a detecção precoce dos casos e inicia-se práticas de mitigação do processo de transmissibilidade, é na vigilância passiva que se ocorre a notificação de casos por população e instituições através da recepção dos animais e canais de comunicação de identificação de zoonoses.

Com a conjunta atuação ativa e passiva da Vigilância zoosanitária pode-se desenvolver estratégias de prevenção envolvendo educação em saúde, manejo sustentável do ambiente, vacinação, adaptadas ao contexto epidemiológico local, de modo que proporcione o controle do risco iminente das zoonoses incidentes e/ou prevalentes, buscando interromper os ciclos de transmissão e reduzir casos, garantindo ajustes até a redução mínima ou eliminação das zoonoses.

3.3 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO: O PLANO NACIONAL DE ADAPTAÇÃO (PNA) E A TRANSVERSALIDADE NO SUS

A articulação entre a política climática e as ações de saúde coletiva no Brasil ganhou marco institucional com o estabelecimento do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) em 2016, desenhado em consonância com a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) (Brasil, 2016b). Sob a coordenação técnica da atual Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente (SVSA) do Ministério de Saúde, o PNA atua como elemento integrador entre as diretrizes nacionais e as respostas municipais.

A inserção da agenda climática na vigilância em saúde estrutura-se a partir de eixos estratégicos transversais, voltados a prover sustentabilidade e resiliência ao sistema:

- Gestão Integrada da Informação: Cruzamento e unificação de bancos de dados de saúde (SINAN, SIVEP-Malária) com sistemas meteorológicos (INMET, CEMADEN) e ambientais (PRODES/INPE), permitindo que a variação climática seja incorporada como variável preditiva de saúde.

- Sensibilização, Capacitação e Educação em Saúde: Formação continuada de profissionais da atenção básica e agentes de combate a endemias sobre os impactos das mudanças climáticas no perfil das doenças infecciosas e parasitárias locais.

- Fortalecimento da Transversalidade do Conhecimento: Estímulo à pesquisa transdisciplinar que associe a ecologia de patógenos com a dinâmica de vulnerabilidade social frente aos extremos do clima.

- Ações de Mitigação e Adaptação Territorial: Planejamento e estruturação de respostas locais sustentáveis, assegurando o abastecimento de água potável, a destinação adequada de resíduos e a proteção de mananciais em cenários de secas prolongadas ou inundações severas.

Dessa forma, o saneamento ambiental de qualidade e a vigilância em saúde passam a ser compreendidos como os principais aliados estratégicos no enfrentamento e bloqueio de emergências zoonóticas e enteroparasitárias hídricas.

3.4 EQUIDADE FRENTE À CRISE CLIMÁTICA: "POVOS VULNERABILIZADOS" E RACISMO AMBIENTAL

Diante dos diversos agravantes da insalubridade ambiental que incidem sobre a vida humana, o Sistema Único de Saúde estrutura suas ações por meio da Vigilância Epidemiológica, que assim como a Vigilância de Zoonoses é um braço atuante do Sistema Nacional de Vigilância em Saúde, sendo sua finalidade, desenvolver ações capazes de orientar, identificar e prevenir os determinantes e condicionantes da saúde individual e coletiva. A organização e operacionalização da Vigilância Epidemiológica está respaldada na Lei nº 8.080/1990, também conhecida como Lei Orgânica da Saúde, que tem por objetivo realizar ações de proteção e recuperação da Saúde (Brasil, 1990).

A operacionalização da Vigilância Epidemiológica ocorre de forma descentralizada e articula-se entre os três níveis de gestão do SUS, municipal,

estadual e federal, permitindo respostas pertinentes e sensíveis a cada território. Essa descentralização fortalece o princípio da equidade, pois possibilita a adaptabilidade às características socioambientais de diferentes populações e locais, contribuindo para o enfrentamento de desigualdades estruturais, portanto, atenuando os condicionantes sociais, econômicos e ambientais do processo de saúde-doença (Brasil, 2009).

Sendo assim, quando se trata das mudanças climáticas como multiplicador das crises e agravos de saúde a instrumentalização da Vigilância Epidemiológica incorpora a abordagem One Health (Saúde Única), integrando os dados de saúde animal e climáticos, ou seja, é capaz de identificar a origem e traçar estratégias de mitigação do problema de risco ou vulnerabilidade epidemiológico, através de etapas de que envolvem a coleta, análise e processamento de dados e ações de intervenção, além de monitorar e promover programas de prevenção, já que se é possível correlacionar padrões climáticos com o aumento dos casos de doenças, como por exemplo as enteroparasitoses.

Como evidenciado na distribuição geográfica das arboviroses, bacterioses e protozooses, os impactos climáticos sobre a saúde coletiva não são homogêneos (Barcellos *et al.*, 2009). Para operacionalizar planos de adaptação socialmente justos, a vigilância deve diferenciar com clareza os conceitos de:

- População vulnerável: o conjunto de indivíduos que residem em áreas expostas a riscos climáticos físicos gerais (como planícies de inundação ou encostas).

- Povos vulnerabilizados: grupos sociais histórica e estruturalmente segregados do acesso às condições básicas de salubridade, infraestrutura urbana, saneamento básico adequado, alimentação de qualidade e serviços de saúde de alta resolução (Brasil, 2024a; Brasil, 2025a).

Essa vulnerabilização sistêmica reflete processos profundos de racismo ambiental e climático, que expõem de forma desproporcional populações negras, indígenas, ribeirinhas e periféricas aos piores impactos da degradação ecológica e do clima (Brasil, 2025a).

Essa disparidade fica evidente ao observarmos a dinâmica das doenças analisadas anteriormente no capítulo:

As enteroparasitoses e a febre tifoide atuam como verdadeiras doenças-sentinela da precariedade habitacional e do saneamento básico ineficiente (Brito *et al.*, 2020; Brasil, 2023b). Quando eventos de precipitação extrema saturam os sistemas de esgotamento sanitário frágeis das periferias, são as populações vulnerabilizadas que sofrem o impacto direto do contato fecal-oral com águas de enchente contaminadas por patógenos hídricos (Levy *et al.*, 2016; Girotto *et al.*, 2024).

Surtos de leptospirose associados a grandes inundações no Rio Grande do Sul (2024) e Santa Catarina (2008/2011) demonstraram uma correlação direta entre o número de infecções/óbitos e a parcela da população exposta durante as inundações de seus domicílios precários e nos esforços subsequentes de limpeza de lama contaminada, revelando desigualdades agudas de moradia e proteção social (Ranieri *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2022).

A persistência da malária na região amazônica está intrinsecamente ligada ao desmatamento descontrolado e à expansão desenfreada de garimpos ilegais que alteram profundamente as biocenoses locais e expõem diretamente populações tradicionais e reservas indígenas a maiores taxas de transmissão por vetores *Anopheles spp*. (Meireles *et al.*, 2022; Lana *et al.*, 2017).

Portanto, a adaptação do sistema de vigilância epidemiológica passa necessariamente pelo combate ativo ao racismo ambiental, priorizando o contingenciamento de recursos e a implementação de infraestrutura de saneamento, monitoramento ambiental e proteção de recursos hídricos justamente nos territórios e comunidades que sofrem com a negligência histórica do Estado.

3.5 FERRAMENTAS TECNOLÓGICAS DE RESILIÊNCIA: GEOPROCESSAMENTO E A PLATAFORMA ADAPTA BRASIL MCTI

Para transitar de um modelo puramente retrospectivo e reativo para um modelo prospectivo e preditivo, a vigilância epidemiológica contemporânea necessita incorporar ferramentas modernas de análise de dados geoespaciais e modelagem ecológica. O uso de técnicas de geoprocessamento (Sistemas de Informação

Geográfica - SIG) permite cruzar variáveis geográficas, demográficas e climáticas no nível da rua e do bairro, facilitando a identificação espacial de novos eixos de transmissão de patógenos (Guimarães; Catão; Casagrande, 2018).

Nesse horizonte tecnológico, destaca-se a relevância da plataforma nacional AdaptaBrasil MCTI. Elaborada e apoiada em parceria com a Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente (SVSA) do Ministério da Saúde, a plataforma disponibiliza e atualiza indicadores consolidados de risco e vulnerabilidade para setores estratégicos brasileiros frente aos cenários de mudanças climáticas vigentes e futuras (para as décadas de 2030 e 2050) (Figura 7).

Figura 7 – Fluxo de modelagem preditiva integrando dados climáticos e sanitários para mitigação de riscos



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

Nas Figuras 8 e 9, ao comparar os dados espaciais disponibilizados na plataforma para o Índice de Risco para inundações, enxurradas e alagamentos sob cenários futuros pessimistas (por exemplo, *projections* para 2030) com os mapas do Índice de Vulnerabilidade no cenário presente, constata-se que grandes porções do território nacional (especialmente as regiões centro-norte e as periferias metropolitanas litorâneas) já exibem elevados níveis de vulnerabilidade socioambiental e tendem a continuar altamente expostas a riscos severos.

Figura 8 e Figura 9 – Mapa de índice de risco para inundações, enxurradas e alagamentos e Mapa de índice de vulnerabilidade



Fonte: Sistema Adapta Brasil MCTI (2025).

O cruzamento sistemático desses indicadores na rotina de planejamento do SUS viabiliza intervenções preventivas direcionadas, tais como: (i) Prevenção de surtos de arboviroses e leptospirose: identificando previamente quais bairros de alto risco para inundações e alta densidade populacional devem receber intervenções pré-chuvas de desobstrução de galerias pluviais, controle de roedores e manejo ambiental de criadouros de mosquitos; (ii) Segurança da água de abastecimento: monitorando previamente áreas com previsão de secas severas que forçam a captação de água de fontes alternativas contaminadas, direcionando preventivamente ações de cloração de água domiciliar e distribuição de filtros; (iii) Previsão de estresse pós-traumático e transtornos mentais: acionando previamente as redes de atenção psicossocial nos territórios identificados com maior probabilidade de desastres de grande magnitude, como deslizamentos de terra ou inundações repentinas.

Portanto, é de suma relevância que haja ações de monitoramento, identificação e resiliência frente aos condicionantes climáticos aos determinantes da saúde, justamente para que haja o fortalecimento das instituições destinadas ao

enfrentamento, de modo que possam criar e utilizar ferramentas como o geoprocessamento para prever e antecipar a identificação de riscos para coibir a vulnerabilidade da população exposta.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A trajetória histórica da compreensão das doenças infecciosas revela um movimento cíclico que, no Antropoceno, atinge o seu ápice de complexidade. Se na Antiguidade e na Idade Média o processo saúde-doença era atribuído a forças sobrenaturais ou aos desequilíbrios elementares e miasmáticos, a consolidação do modelo biomédico e da teoria microbiana no século XIX tendeu a isolar o patógeno de seu contexto socioecológico, reduzindo a epidemiologia a uma relação linear de causa e efeito. No entanto, as crises sanitárias contemporâneas evidenciam que os agentes etiológicos não operam no vácuo. Como demonstrado ao longo deste capítulo, as dinâmicas de transmissão de vírus, bactérias e protozoários são indissociáveis das profundas transformações biofísicas provocadas pelas atividades humanas em escala global.

Ao resgatar os conceitos clássicos do Complexo Patogênico de Maximilien Sorre e da Patobiocenose de Pavlovsky, este texto buscou fundamentar teoricamente a indissociabilidade entre os planos físico, biológico e social. No cenário atual de aquecimento global, alteração dos regimes de precipitação e degradação de biomas essenciais, como a Amazônia e o Cerrado, assistimos a uma reconfiguração acelerada das áreas de adequação ecológica para vetores e reservatórios silvestres. A expansão das arboviroses em direção ao Sul do país, a ampliação da área de ocorrência de morcegos hematófagos transmissores da raiva (*Desmodus rotundus*), a interiorização de leishmanioses e a persistência ambiental de enteropatógenos após eventos extremos de inundação são evidências empíricas de que o clima atua como um potente modulador e amplificador de riscos biológicos.

Todavia, a maior contribuição desta análise reside na constatação de que o risco climático não se distribui de maneira homogênea sobre o território. As emergências zoonóticas e hídricas detalhadas revelam-se como doenças-sentinela da desigualdade estrutural brasileira. A distinção entre população vulnerável e povos

vulnerabilizados impõe uma reflexão ética e política sobre a prática epidemiológica: os impactos das mudanças climáticas são severamente amplificados pelo racismo ambiental e climático, pela segregação espacial e pelo histórico *deficit* de saneamento básico que aflige as periferias urbanas, comunidades ribeirinhas e territórios indígenas. Os picos históricos de leptospirose após desastres em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, os surtos de febre tifoide e cólera, e a persistência da malária e da doença de Chagas na Amazônia associadas ao garimpo e ao desmatamento expõem a ferida aberta da injustiça socioambiental.

Frente a esse panorama desalentador, a Saúde Única (One Health) e a Saúde Planetária emergem não apenas como paradigmas conceituais, mas como imperativos operacionais de sobrevivência. A adaptação do Sistema de Vigilância Epidemiológica frente à crise climática exige que o SUS migre definitivamente de uma postura reativa de resposta a surtos para um modelo preditivo, proativo e preventivo. Isso passa obrigatoriamente por: (i) Fortalecimento das Unidades de Vigilância de Zoonoses e sua integração transversal com órgãos de monitoramento ambiental e animal; (iii) Operacionalização de Tecnologias de Resiliência, utilizando ferramentas de geoprocessamento e cruzamento de cenários projetivos de risco, para mapear vulnerabilidades locais antes que os desastres ocorram; (iii) Efetivação de Políticas de Equidade, ancoradas na descentralização e capilaridade do SUS, que priorizem a infraestrutura de saneamento básico e ações de saúde pública nos territórios habitados pelos grupos mais desprotegidos frente à variabilidade do clima; (iv) Mitigação do Avanço da Resistência Antimicrobiana (RAM), que, amplificada pelo aquecimento global e pela degradação ecossistêmica, ameaça anular décadas de conquistas médicas e farmacológicas se não for abordada por uma perspectiva intersetorial de governança.

Em última análise, as dinâmicas de saúde no Antropoceno nos convocam a uma redefinição profunda do nosso modelo de desenvolvimento econômico. O enfrentamento sustentável das zoonoses e das doenças sensíveis ao clima no século XXI não se limitará à eficácia de vacinas, tratamentos clínicos ou controle químico de vetores. Ele dependerá, fundamentalmente, da nossa capacidade coletiva de mitigar a pressão sobre as fronteiras planetárias, conservar a biodiversidade, garantir a justiça

climática e estruturar sistemas de saúde pública universais que sejam, ao mesmo tempo, ecologicamente integrados e socialmente justos.

REFERÊNCIAS

ACOSTA-AMPUDIA, Y. *et al.* Mayaro: an emerging viral threat? **Emerging Microbes & Infections**, v. 7, n. 1, p. 163, 2018.

AGÊNCIA BRASIL. **Dengue: entenda o que são os sorotipos da doença e por que o tipo 3 é o que mais preocupa atualmente no Brasil**. Brasília: Agência Brasil, 2025.

ANYAMBA, A. *et al.* Rift Valley fever Risk Mapping and Prediction: Progress, Challenges and Future Opportunities. In: GEOVET 2019, 2019, Davis. **Conference Abstracts...** Davis: Frontiers in Veterinary Science, 2019.

ASADGOL, Z. *et al.* How climate change can affect cholera incidence and prevalence? A systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 34906–34926, 2020.

BACKES, M. T. S. *et al.* Noções de natureza e derivações para a saúde: uma incursão na literatura. **Physis: Revista de Saúde Coletiva**, v. 20, n. 3, p. 729-751, 2010.

BAHAROM, M. *et al.* Environmental and occupational factors associated with leptospirosis: a systematic review. **Heliyon**, v. 10, n. 1, e23473, 2023.

BARCELLOS, C. *et al.* Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos sobre as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009.

ACOSTA-AMPUDIA, Y. *et al.* Mayaro: an emerging viral threat? **Emerging Microbes & Infections**, v. 7, n. 1, p. 163, 2018.

AGÊNCIA BRASIL. **Dengue: entenda o que são os sorotipos da doença e por que o tipo 3 é o que mais preocupa atualmente no Brasil**. Brasília: Agência Brasil, 2025.

ANYAMBA, A. *et al.* Rift Valley fever Risk Mapping and Prediction: Progress, Challenges and Future Opportunities. In: GEOVET 2019, 2019, Davis. **Conference Abstracts...** Davis: Frontiers in Veterinary Science, 2019.

ASADGOL, Z. *et al.* How climate change can affect cholera incidence and prevalence? A systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 34906–34926, 2020.

BACKES, M. T. S. *et al.* Noções de natureza e derivações para a saúde: uma incursão na literatura. **Physis: Revista de Saúde Coletiva**, v. 20, n. 3, p. 729-751, 2010.

BAHAROM, M. *et al.* Environmental and occupational factors associated with leptospirosis: a systematic review. **Heliyon**, v. 10, n. 1, e23473, 2023.

BARCELLOS, C. *et al.* Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos sobre as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009.

BEZERRA-SANTOS, M. A. *et al.* Emerging parasites and vectors in a rapidly changing world: from ecology to management. **Acta Tropica**, v. 238, 106746, 2023.

BISPO JÚNIOR, J. P. A resiliência do Sistema Único de Saúde brasileiro no contexto da pandemia de COVID-19: como fortalecer? **Cadernos de Saúde Pública**, v. 38, n. 10, e00097522, 2022.

BLAIR, J. A climate for antibiotic resistance. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 6, p. 460–461, 2018.

BOWDEN, T. A. *et al.* Orthobunyavirus ultrastructure and the curious tripodal glycoprotein spike. **PLOS Pathogens**, v. 9, n. 5, e1003374, 2013.

BRASIL. [Lei Orgânica da Saúde (1990)]. **Lei nº 8.080, de 19 de setembro de 1990**. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde... Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 set. 1990.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: MCTI, 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Guia de vigilância epidemiológica**. 7. ed. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual integrado de vigilância epidemiológica da cólera**. 2. ed. Brasília, DF: Editora do Ministério da Saúde, 2010a.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual integrado de vigilância e controle da febre tifoide**. Brasília, DF: Editora do Ministério da Saúde, 2010b.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 1.138, de 23 de maio de 2014**. Define as ações e serviços de vigilância em saúde de zoonoses no âmbito do SUS. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Diretrizes nacionais para prevenção e controle de epidemias de dengue**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2016a.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Guia de vigilância em saúde**. 6. ed. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2023a.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Com previsão de aumento de casos, Ministério da Saúde coordena ações de enfrentamento das arboviroses**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2023b.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Dengue**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024a.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Mudanças climáticas para profissionais de saúde: guia de bolso**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024b.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Oropouche**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2025b.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Febre do Mayaro**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2025c.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Raiva: o que é, causas, sintomas, tratamento e prevenção**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2025d.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome *et al.* **Marco de referência de sistemas alimentares e clima para as políticas públicas**. Versão para consulta pública. Brasília, DF: MDS, 2025a.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: Volume 1 - Estratégia geral**. Brasília, DF: MMA, 2016b.

BRITO, G. P. *et al.* Typhoid fever in CARMO, E. L. *et al.* Environmental influence and *Toxoplasma gondii* infection in the Amazon: contribution of the Evandro Chagas Institute (Pará, Brazil). **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 16, 2025.

BUSATO, I. M. S. **Epidemiologia e processo saúde-doença**. 1. ed. Curitiba: InterSaberes, 2016.

CARMO, E. L. *et al.* Environmental influence and *Toxoplasma gondii* infection in the Amazon: contribution of the Evandro Chagas Institute (Pará, Brazil). **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 16, 2025.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). **Hantavirus: prevention**. Atlanta: CDC, 2023.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). **Mayaro virus: data and maps for Mayaro**. Atlanta: CDC, 2024.

CHEN, R. *et al.* ICTV Virus Taxonomy Profile: *Togaviridae*. **Journal of General Virology**, v. 99, n. 6, p. 761–762, 2018.

CHRISTAKI, E. *et al.* The impact of climate change on cholera: a review on the global status and future challenges. **Atmosphere**, v. 11, n. 5, art. 449, p. 1–11, 2020.

COLWELL, R. R.; HUQ, A. Environmental reservoir of *Vibrio cholerae*, the causative agent of cholera. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 740, p. 44–54, 1994.

CUCUNUBÁ, Z. M. *et al.* The epidemiology of Chagas disease in the Americas. **The Lancet Regional Health – Americas**, v. 37, 100881, 2024.

DELRIEU, M. *et al.* Temperature and transmission of chikungunya, dengue, and Zika viruses: a systematic review of experimental studies on *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. **Current Research in Parasitology & Vector-Borne Diseases**, v. 4, 100139, 2023.

DONALISIO, M. R.; FREITAS, A. R. A.; VON ZUBEN, A. P. B. Arboviroses emergentes no Brasil: desafios para a clínica e implicações para a saúde pública. **Revista de Saúde Pública**, v. 51, n. 30, p. 1-6, 2017.

DOEURK, I. *et al.* Impact of temperature on survival, development and longevity of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Phnom Penh, Cambodia. **Parasites & Vectors**, v. 18, n. 362, 2025.

ELLIOTT, R. M. Bunyaviruses: General Features. In: MAHY, B. W. J.; Van Regenmortel, M. H. V. **Encyclopedia of Virology**. 3th ed. San Diego, California: Elsevier Academic Press, 2008. p. 391-399.

FARIAS, V. A. M. **Raiva humana no Brasil: análise histórica e cenários futuros segundo os níveis de aquecimento global**. 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Saúde Coletiva) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

FENG, Y. *et al.* An integrated nationwide genomics study reveals transmission modes of typhoid fever in China. **Epidemiology**, v. 14, e01333-23, 2023.

FERREIRA, M. U. Epidemiologia e geografia: o complexo patogênico de Max. Sorre. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 7, n. 3, p. 301–309, 1991.

FIACK, S.; STRAFF, W.; WALTHER, B. One Health: Gesundheit von Mensch, Tier und Umwelt. **Bundesgesundheitsblatt**, v. 66, p. 591–592, 2023.

FIOCRUZ. **Chikungunya**. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, 2013.

FIOCRUZ. **Vírus Chikungunya**. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, 2014.

FIOCRUZ. **Dengue: o que é, causas, sintomas, tratamento e prevenção**. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, 2024.

FISHER, C. R. *et al.* The spread and evolution of rabies virus. **Nature Reviews Microbiology**, v. 26, n. 4, p. 241–255, 2018.

GEROLOMO, M.; PENNA, M. L. F. Os primeiros cinco anos da sétima pandemia de cólera no Brasil. **Informe Epidemiológico do SUS**, v. 8, n. 3, p. 49–58, 1999.

GIROTTO, C. D. *et al.* Analysis of environmental factors influencing endemic cholera risks in sub-Saharan Africa. **Science of the Total Environment**, v. 926, 171896, 2024.

GOTTSCHALL, C. A. M. **Medicina hipocrática: antes, durante e depois**. Porto Alegre: Stampa, 2007.

GUIMARÃES, R. B.; CATÃO, R. C.; CASAGRANDE, B. C. Raciocínio geográfico e complexos patogênicos atuais: análise comparativa da Dengue e da Leishmaniose Tegumentar Americana. **Confins**, v. 37, 2018.

HEATH, K.; ALVES, L. M.; BONSALL, M. B. Climate change, urbanisation and transmission potential: *Aedes aegypti* mosquito projections forecast future arboviral

disease hotspots in Brazil. **PLOS Neglected Tropical Diseases**, v. 19, n. 9, e0013415, 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

INTERNATIONAL COMMITTEE ON TAXONOMY OF VIRUSES (ICTV). **Genus: Phlebovirus**. In: ICTV. ICTV Report: Family Phenuiviridae. 2025.

IRFAN, M.; ALMOTIRI, A.; ALZEYADI, Z. A. Antimicrobial resistance and its drivers: a review. **Antibiotics**, v. 11, art. 1362, 2022.

JIA, C. *et al.* Climate change affects the spread of typhoid pathogens. **Microbial Biotechnology**, v. 17, n. 2, e14417, 2024.

KOUNATIDIS, D. C. *et al.* Antimicrobial resistance in the era of climate change: why we should all embrace and integrate the One Health approach in clinical practice? **Antibiotics**, v. 14, n. 10, 1042, 2025.

KUHN, J. H. *et al.* Genomic characterization of the genus *Nairovirus* (Family *Bunyaviridae*). **Viruses**, v. 8, n. 6, p. 164, 2016.

KUMAR, N. *et al.* Climate change and its impact on parasitic diseases of animals. In: **Climate change and agriculture**. Delhi: AkiNik Publications, 2024. p. 45-63.

LANA, R. M. *et al.* Caracterização socioeconômica e demográfica de uma região endêmica de malária no Brasil por meio de análise de correspondência múltipla. **Malaria Journal**, v. 16, p. 397, 2017.

LANDRIGAN, P. J. Air pollution and health. **The Lancet Public Health**, v. 2, n. 1, p. e4-e5, 2017.

LAU, C. L. *et al.* Climate change, flooding, urbanisation and leptospirosis: fuelling the fire? **Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 104, p. 631–638, 2010.

LESSLER, J. *et al.* Mapping the burden of cholera in sub-Saharan Africa and implications for control: an analysis of data across geographical scales. **The Lancet**, v. 391, n. 10133, p. 1908–1915, 2018.

LEVY, K. *et al.* Untangling the impacts of climate change on waterborne diseases: a systematic review of relationships between diarrheal diseases and temperature, rainfall, flooding, and drought. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 10, p. 4905–4922, 2016.

LIMA-CAMARA, T. N. Emerging arboviruses and new challenges for public health in Brazil. **Revista de Saúde Pública**, v. 50, p. 36, 2016.

LIPP, E. K.; HUQ, A.; COLWELL, R. R. Effects of global climate on infectious disease: the cholera model. **Clinical Microbiology Reviews**, v. 15, n. 4, p. 757–770, 2002.

LIU, Z. *et al.* Association between floods and typhoid fever in Yongzhou, China: effects and vulnerable groups. **Environmental Research**, v. 167, p. 718-724, 2018.

LOWE, R. *et al.* The 2023 resurgence of Oropouche fever in the Amazon region. **The Lancet Infectious Diseases**, v. 24, p. 10-12, 2023.

MARTINS, R. A. *et al.* **Contágio: história da prevenção das doenças transmissíveis**. São Paulo: Moderna, 1997.

MAYO CLINIC. **Hantavirus pulmonary syndrome: symptoms & causes**. Rochester: Mayo Clinic, 2024.

MBAIKA, S. *et al.* Vector competence of *Aedes aegypti* in transmitting Chikungunya virus: effects and implications of extrinsic incubation temperature on dissemination and infection rates. **Virology Journal**, v. 13, n. 114, 2016.

MEIRELES, A. *et al.* Diversidade de anofelinos em focos de malária urbanos e periurbanos: comparação entre armadilhas alternativas e efeitos sazonais em uma cidade da Amazônia Ocidental Brasileira. **Malaria Journal**, v. 21, p. 258, 2022.

MELLO, C. *et al.* Perfil epidemiológico da toxoplasmose em gestantes e soroprevalência nacional. **Arquivos Catarinenses de Medicina**, v. 51, p. 71–88, 2022.

NEVES, D. **Parasitologia humana**. 13. ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 2016.

NEVES, J. M. M. *et al.* Modeling of human rabies cases in Brazil in different future global warming scenarios. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 21, n. 2, 212, 2024.

NICARETTA, J. E. *et al. Rhipicephalus microplus* seasonal dynamic in a Cerrado biome, Brazil: an update data considering global warming. **Veterinary Parasitology**, v. 296, 109506, 2021.

NOGUEIRA, A. V.; SILVA FILHO, G. N. **Microbiologia**. Florianópolis: Biologia/EaD/UFSC, 2015.

NOGUEIRA, B. C. F. *et al.* Soft and hard ticks (Parasitiformes: Ixodida) on humans: a review of Brazilian biomes and the impact of environmental change. **Acta Tropica**, v. 234, 106598, 2022.

OLIVEIRA, L. *et al.* Doença de Chagas no Brasil: análise de 12 anos (2012 a 2023). **Brazilian Journal of Health Review**, v. 8, e79357, 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **46% da população global vive sem acesso a saneamento básico**. Nova York: ONU News, 2023.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Aumento da resistência a antibióticos ameaça avanços da medicina**. Genebra: OMS, 2023.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). **Leishmaniose**. Brasília, DF: OPAS, 2020.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). **Atualização epidemiológica: Chikungunya na Região das Américas**. Brasília, DF: OPAS, 2024.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS); ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Dengue**. Brasília, DF: OPAS/OMS, 2024.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS); ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Alerta epidemiológico: infecção pelo vírus Zika**. Washington, DC: OPAS/OMS, 2016.

PIGNATTI, M. G. Saúde e ambiente: as doenças emergentes no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 1, p. 133-147, 2004.

QUEIROZ, T. C. C. *et al.* Relação das mudanças climáticas com o aumento da incidência de doenças tropicais. In: **Saúde em foco: temas contemporâneos**. São Paulo: Editora Científica Digital, 2020. v. 3, p. 45-58.

RANIERI, T. M. *et al.* Leptospirosis cases during the 2024 catastrophic flood in Rio Grande do Sul, Brazil. **Pathogens**, v. 14, n. 4, p. 393, 2025.

REIS, I. *et al.* Co-occurrence of malaria and Chagas disease in the Brazilian Amazon: the need for integrated health surveillance. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 41, n. 1, e00042124, 2025.

ROMANELLO, M. *et al.* The 2022 report of the *Lancet* Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. **The Lancet**, v. 400, n. 10363, p. 1619–1654, 2022.

RUST, R. S. Human arboviral encephalitis. **Seminars in Pediatric Neurology**, v. 19, n. 3, p. 130-151, 2012.

SALGUEIRO, F. M. *et al.* Climate change and antibiotic resistance: a scoping review. **Environmental Microbiology Reports**, v. 16, n. 5, e70008, 2024.

SCHRÖDER, T. *et al.* Neglected diseases in Brazil: space-temporal trends and public policies. In: FALCÓN-LEZAMA, J.; TAPIA-CONYER, R. (Org.). **Neglected tropical diseases**. Londres: IntechOpen, 2023. v. 1, p. 1-22.

SECRETARIA DE ESTADO DE SAÚDE DO DISTRITO FEDERAL (SES-DF). **Sorotipos da dengue: conheça as variações do vírus transmitido pelo *Aedes aegypti***. *Brasília, DF: SES-DF, 2025.*

SILVA, A. E. P. *et al.* Temporal trends in leptospirosis incidence and association with climatic and environmental factors in the state of Santa Catarina, Brazil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, n. 3, p. 849-860, 2022.

SILVA, A. S. *et al.* Arboviroses com ênfase nas transmitidas por mosquitos. In: LEMOS, E. R. S. *et al.* (Org.). **Tópicos em virologia**. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2023. p. 233-260.

SILVA, J. V. *et al.* Factors associated with gastrointestinal parasitic infections among young population in Northeast Brazil. **Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology**, v. 2016, 6239434, 2016.

SILVA, J. W. P. Vírus Oropouche: epidemiologia, vetores e diagnóstico. **Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences**, v. 6, n. 7, p. 10-20, 2024.

SISTEMA ADAPTABRASIL MCTI. **Mapas de risco e vulnerabilidade às mudanças climáticas**. Brasília, DF: MCTI, 2025.

SUBEDI, D. *et al.* Ecological and socioeconomic factors in the occurrence of rabies: a forgotten scenario. **Infectious Disease Reports**, v. 14, n. 6, p. 979-986, 2022.

TALLMANN, H. **Expedição na Amazônia investiga a disseminação de vírus emergentes e reemergentes**. Campinas: Jornal da Unicamp, 2025.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 10. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **O que é saúde planetária?** São Paulo: IEA-USP, [s.d.]. Disponível em: https://saudeplanetaria.iea.usp.br/pt/o-que-e-saude-planetaria/. Acesso em: 3 set. 2026.

WALKER, J. *et al.* Assessing the global risk of typhoid outbreaks caused by extensively drug resistant *Salmonella* Typhi. **Nature Communications**, v. 14, 6502, 2023.

WARRELL, M. J.; WARRELL, D. A. Rabies and other lyssavirus diseases. **The Lancet**, v. 363, n. 9413, p. 959-969, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **World malaria report 2023**. Genebra: WHO, 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **World malaria report 2024**. Genebra: WHO, 2024a.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Chagas disease (also known as American trypanosomiasis)**. Genebra: WHO, 2024b.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Crimean-Congo haemorrhagic fever**. Genebra: WHO, 2025

QUALIDADE DO AR, ILHAS DE CALOR URBANO E MORBIMORTALIDADE

Mariana Andreotti Dias – Universidade do Estado do Rio de Janeiro [1]
Francisco Jablinski Castelhano – Universidade Federal do Rio Grande do Norte[2]

1 INTRODUÇÃO

Vivemos um tempo em que respirar tornou-se um ato político e, em muitas cidades, um ato de resistência. A atmosfera, que deveria representar o bem comum por excelência, vem sendo sistematicamente degradada por processos urbanos e industriais que transformam o ar — esse fluido invisível e essencial — em vetor de adoecimento e desigualdade. A crise ambiental que se desenha nas cidades contemporâneas é também uma crise de humanidade, na medida em que revela o modo como nossas escolhas produtivas e configurações socioespaciais ferem o direito fundamental à vida e à saúde.

Ao longo das últimas décadas, a ciência tem evidenciado com crescente precisão as conexões entre a poluição atmosférica e os padrões de morbimortalidade urbana. Partículas finas como o material particulado ($PM^{2.5}$ e PM^{10}), óxidos de nitrogênio (NO_2), ozônio troposférico (O_3) e compostos orgânicos voláteis formam uma mistura complexa de poluentes que afeta diretamente o sistema respiratório, cardiovascular e imunológico das populações urbanas (REQUIA *et al.*, 2025; BARBOSA *et al.*, 2024; DIAS & CASTELHANO, 2024; CASTELHANO *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2022; WHO, 2021). Esses efeitos são agravados pela configuração

[1]Doutora em Geografia – Pesquisadora Visitante no Programa de Pós-graduação em Geografia da UERJ – marianaandreotti@gmail.com
[2]Doutor em Geografia – Professor Adjunto do Departamento de Geografia da UFRN – fjcastelhano@gmail.com

térmica das cidades, onde a substituição da cobertura vegetal por concreto e asfalto gera as chamadas Ilhas de Calor Urbano (ICU) — áreas em que as temperaturas médias podem superar em vários graus as regiões menos densamente construídas, produzindo desconforto térmico, aumento no consumo energético e riscos adicionais à saúde.

O Sexto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas, o AR6, produzido por 234 pesquisadores de múltiplas nacionalidades e publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*International Panel on Climate Change* – IPCC) atesta que a estabilidade físico-química da atmosfera encontra-se em risco, sofrendo alterações intensas por conta da atividade humana, sobretudo pela queima de combustível fóssil (DIAS e CASTELHANO, 2025).

Tais processos, longe de se distribuírem de forma homogênea, reproduzem e aprofundam desigualdades socioespaciais. Como lembra Mendonça (2001), a crise ambiental contemporânea não pode mais ser compreendida e nem resolvida segundo perspectivas que dissociam sociedade e natureza.

Assim, discutir qualidade do ar, conforto térmico urbano e a consequente saúde humana implica reconhecer a sobreposição de vulnerabilidades ambientais e sociais — fenômeno particularmente evidente em países desiguais como o Brasil, onde o acesso desigual à infraestrutura urbana, equipamentos sanitários e aos espaços verdes determina quem respira melhor, quem sofre mais e quem morre antes.

A relação entre ambiente urbano, poluição e saúde constitui, portanto, um campo privilegiado para a análise socioambiental. Como argumenta Mendonça (2001), a geografia contemporânea deve se debruçar sobre a interface entre o natural e o social, pois é nesse entrelaçamento que se materializam os principais problemas ambientais. Essa abordagem permite compreender que a “morbimortalidade” não é apenas um indicador epidemiológico, mas um espelho das injustiças ambientais que moldam os territórios urbanos.

Crises sanitárias, sociais e ambientais fazem parte da história das sociedades humanas e possuem um fator em comum, o ímpeto desenvolvimentista. A perspectiva e modus operandi “desenvolvimento econômico a todo custo” destina investimentos públicos às grandes obras e inviabiliza recursos para prevenir e evitar catástrofes.

Modificar o quadro atual das mudanças climáticas exige reduzir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, o que demanda não apenas inovações tecnológicas, mas também transformações profundas nas estruturas políticas, econômicas, sociais e culturais que organizam a sociedade. (DIAS e CASTELHANO, 2024).

Estudos recentes reforçam essa perspectiva:

Em escala regional, a pesquisa de Dias *et al.* (2024), identifica ampla vulnerabilidade socioambiental no semiárido setentrional nordestino, ao mostrar que as populações com menor escolaridade, piores condições habitacionais e menor acesso à coleta de lixo são também aquelas mais expostas a poluentes atmosféricos e penalidades climáticas, o que evidencia “sobreposições de riscos e vulnerabilidades”.

Em escala nacional, Damasceno da Silva *et al.* (2023) demonstram que a presença de áreas verdes pode reduzir hospitalizações por doenças crônicas como o diabetes em determinadas regiões, enquanto em outras o efeito é inverso, revelando a complexidade dos contextos ambientais e socioeconômicos que moldam a relação entre natureza urbana e saúde.

A crise da qualidade do ar e o avanço das ilhas de calor urbano são, assim, manifestações locais de um mesmo fenômeno global: a transformação química e térmica da atmosfera em escala planetária. Relembrando o relatório AR6 do IPCC (2021) sabemos que ele já alertava que as cidades concentram as maiores emissões de gases de efeito estufa e que seus microclimas estão alterando significativamente os regimes térmicos e a composição do ar, criando ambientes insalubres especialmente para grupos populacionais vulneráveis — crianças, idosos e pessoas com doenças crônicas.

De posse de todos esses pontos problemáticos – sobretudo, em relação a relação qualidade do ar, ilhas de calor urbano e morbimortalidade - pretende-se neste capítulo discutir e evidenciar os processos que intensificam tais fenômenos nos centros urbanos, apontando estratégias de mitigação e adaptação.

Nas seções seguintes, analisaremos:

- As relações entre poluição atmosférica, composição de partículas e impactos na saúde humana em ambientes urbanos, destacando os

mecanismos fisiológicos e epidemiológicos da exposição a poluentes e o papel das desigualdades socioambientais nesse processo;

- Os efeitos das ilhas de calor urbano sobre o conforto térmico, doenças respiratórias, cardiovasculares e mortalidade associada, com exemplos de estudos de caso no Brasil e em outras regiões tropicais;
- As estratégias de mitigação e adaptação urbana, voltadas à melhoria da qualidade do ar e à redução dos riscos à saúde, considerando políticas públicas, soluções baseadas na natureza e planejamento urbano sustentável.

A reflexão proposta parte da compreensão de que respirar ar limpo e viver em conforto térmico são dimensões inalienáveis da dignidade humana. Assim, este capítulo se insere no esforço coletivo de “reaprender o que é viver em sociedade, e principalmente, em comunhão com tudo que nos cerca” (DIAS e CASTELHANO, 2024, p. 8), reafirmando que a luta por justiça ambiental é, em essência, uma luta pelo direito à vida.

2 A ATMOSFERA URBANA E A POLUIÇÃO DO AR: QUÍMICA, FONTES E DESIGUALDADE

A poluição atmosférica constitui um dos principais problemas ambientais associados ao processo de urbanização contemporânea. De maneira geral, entende-se por poluição do ar a introdução de substâncias ou energia na atmosfera em concentrações capazes de provocar danos à saúde humana, aos ecossistemas e aos materiais, ou ainda interferir no bem-estar das populações (OKE, 1987; CASTELHANO, 2021).

Embora frequentemente associada à modernidade industrial, a poluição atmosférica não é um fenômeno exclusivamente recente. Há registros históricos de problemas relacionados à qualidade do ar desde a Antiguidade, associados a atividades como curtumes, fundições metálicas e queima de combustíveis sólidos em centros urbanos da Grécia e do Império Romano. No entanto, foi a partir da Revolução Industrial que a intensificação da produção energética baseada na queima de combustíveis fósseis ampliou significativamente as emissões atmosféricas,

consolidando a poluição do ar como um problema ambiental urbano de grande escala (CASTELHANO, 2021; WHO, 2021).

O crescimento acelerado das cidades, associado à industrialização, à expansão da frota de veículos automotores e ao aumento do consumo energético, transformou a atmosfera urbana em um ambiente complexo, caracterizado pela presença simultânea de diversos poluentes químicos e partículas em suspensão. Nesse contexto, compreender a natureza dos poluentes, suas fontes emissoras e os processos de dispersão e transformação química torna-se fundamental para a análise da qualidade do ar e de seus impactos socioambientais.

2.1 PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS URBANOS

A composição química da atmosfera urbana resulta da interação entre emissões naturais e, sobretudo, fontes antrópicas. Entre os principais poluentes atmosféricos monitorados em ambientes urbanos destacam-se o material particulado (MP), os óxidos de nitrogênio (NOx), o dióxido de enxofre (SO_2), o ozônio troposférico (O_3) e o monóxido de carbono (CO), considerados indicadores fundamentais da qualidade do ar em diversos sistemas de monitoramento ambiental.

O material particulado (MP) consiste em uma complexa mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na atmosfera sob a forma de partículas sólidas ou gotículas líquidas em suspensão. Essas partículas podem ter origem natural — como poeiras transportadas pelo vento, pólen, sal marinho ou partículas provenientes de incêndios florestais — ou resultar de atividades humanas, como processos industriais, geração de energia, queimadas, construção civil e emissões veiculares (BRAGA, *et al.*, 2001; VIEIRA, 2009).

Do ponto de vista físico, o material particulado é classificado principalmente de acordo com o diâmetro aerodinâmico das partículas. As partículas grossas apresentam diâmetro superior a 10 micrômetros (MP10), enquanto as partículas finas, com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (MP2,5), possuem maior capacidade de penetração no sistema respiratório humano, sendo consideradas particularmente perigosas para a saúde (WHO, 2021).

Outro grupo relevante de poluentes é representado pelos óxidos de nitrogênio (NOx), que incluem principalmente o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2). Esses compostos são formados principalmente durante processos de combustão em altas temperaturas, como aqueles que ocorrem em motores de veículos, usinas termoelétricas e sistemas industriais. Uma vez emitidos na atmosfera, esses gases participam de diversas reações químicas que contribuem para a formação de poluentes secundários, incluindo o ozônio troposférico (VIEIRA, 2009).

O dióxido de enxofre (SO_2), por sua vez, é um gás incolor produzido principalmente pela queima de combustíveis fósseis contendo enxofre, como carvão mineral e óleo combustível. As atividades industriais e as refinarias de petróleo figuram entre as principais fontes emissoras desse poluente, que pode reagir com partículas presentes no ar e com o vapor d'água atmosférico, contribuindo para a formação de sulfatos e precipitações ácidas (VIEIRA, 2009).

Já o ozônio troposférico (O_3) diferencia-se por ser um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente por fontes de poluição. Ele é formado por reações fotoquímicas entre compostos orgânicos voláteis (COV) e óxidos de nitrogênio na presença de radiação solar. Em ambientes urbanos intensamente poluídos, essas reações podem gerar concentrações elevadas de ozônio, compondo o fenômeno conhecido como smog fotoquímico (VIEIRA, 2009).

O monóxido de carbono (CO), por sua vez, é um gás incolor e inodoro produzido principalmente pela combustão incompleta de combustíveis fósseis. Em áreas urbanas, os veículos automotores representam a principal fonte desse poluente, especialmente em situações de tráfego intenso ou congestionamentos, onde a combustão ocorre de forma menos eficiente (VIEIRA, 2009).

2.2 POLUENTES PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

Do ponto de vista químico, os poluentes atmosféricos podem ser classificados em primários e secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de poluição, como o monóxido de carbono (CO), o dióxido de enxofre (SO_2), os óxidos de nitrogênio (NOx) e o material particulado (MP) emitido por processos industriais ou veículos automotores.

Já os poluentes secundários são formados na atmosfera por meio de reações químicas envolvendo substâncias previamente emitidas. Entre os exemplos mais conhecidos estão o ozônio troposférico (O_3), os nitratos e sulfatos presentes em aerossóis atmosféricos e diversos compostos resultantes de reações fotoquímicas (VIEIRA, 2009).

Essas transformações químicas tornam a poluição atmosférica um fenômeno altamente dinâmico, cuja intensidade e distribuição espacial dependem não apenas das emissões diretas, mas também de fatores meteorológicos, da radiação solar e das características físicas do ambiente urbano.

2.3 FONTES DE EMISSÃO E DINÂMICA DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

As fontes emissoras de poluentes atmosféricos podem ser classificadas, de maneira geral, em fontes naturais e fontes antrópicas. As fontes naturais incluem processos como erupções vulcânicas, tempestades de poeira, incêndios naturais e emissões biogênicas de compostos orgânicos.

Entretanto, nas áreas urbanas contemporâneas, predominam as fontes antrópicas, associadas principalmente às atividades industriais, ao transporte motorizado, à geração de energia e à queima de resíduos. Essas fontes podem ainda ser classificadas como estacionárias ou móveis. As fontes estacionárias correspondem a instalações fixas, como chaminés industriais, usinas termoelétricas e sistemas de incineração. Já as fontes móveis incluem veículos automotores, aeronaves, locomotivas e embarcações, que liberam poluentes ao longo de suas trajetórias (VIEIRA, 2009).

Além da emissão direta de poluentes, a dinâmica da poluição atmosférica envolve processos complexos de dispersão, transformação e remoção dessas substâncias na atmosfera. Segundo a abordagem sistêmica do clima urbano (SCU) proposta por Monteiro (1976), a qualidade do ar em um determinado local resulta da interação entre fatores determinantes — como as fontes emissoras — e fatores condicionantes, que regulam a dispersão e transformação dos poluentes, incluindo a circulação atmosférica, a turbulência do ar, a umidade e a precipitação (CASTELHANO, 2021).

Nesse sentido, a poluição atmosférica deve ser compreendida como um fenômeno multidimensional, que envolve simultaneamente aspectos físicos, químicos, climáticos e socioespaciais. A circulação dos ventos, a topografia urbana, a densidade das edificações e a presença de áreas verdes influenciam diretamente a dispersão ou concentração de poluentes na atmosfera urbana, podendo agravar ou amenizar episódios de poluição do ar.

2.4 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E DESIGUALDADE SOCIOESPACIAL

A distribuição da poluição do ar nas cidades raramente ocorre de maneira homogênea. Diferentes estudos demonstram que a exposição aos poluentes atmosféricos tende a ser maior em áreas densamente urbanizadas, próximas a grandes eixos viários ou regiões industriais (OLIVEIRA *et al.*, 2025; VANDENINDEN *et al.*, 2025; CHE *et al.*, 2023). Nessas áreas, frequentemente habitadas por populações de menor renda, a combinação entre intensa circulação de veículos, menor presença de vegetação e condições habitacionais precárias intensifica os níveis de exposição ambiental.

No caso da Região Metropolitana de São Paulo, por exemplo, estudos indicam que veículos automotores são responsáveis por grande parte das emissões urbanas de poluentes atmosféricos, incluindo cerca de 97% das emissões de monóxido de carbono e aproximadamente 65% dos óxidos de nitrogênio (CETESB, 2019). A estrutura urbana e os padrões de mobilidade também contribuem para a desigual distribuição desses poluentes, uma vez que populações periféricas percorrem longas distâncias diariamente em direção às áreas centrais da cidade, aumentando sua exposição à poluição atmosférica (CHIQUETTO *et al.*, 2021).

Esse padrão evidencia que a poluição do ar não é apenas um problema ambiental ou tecnológico, mas também uma questão profundamente social e territorial. A organização do espaço urbano, a distribuição das atividades econômicas e os modelos de mobilidade influenciam diretamente quem está mais exposto aos poluentes e quem possui melhores condições de proteção ambiental.

Dessa forma, compreender a qualidade do ar nas cidades exige uma abordagem integrada que considere simultaneamente os processos físico-químicos da atmosfera,

as dinâmicas urbanas e as desigualdades socioambientais que moldam a exposição da população aos riscos ambientais.

3 POLUIÇÃO DO AR E IMPACTOS NA SAÚDE: MORBIDADE, MORTALIDADE E VULNERABILIDADES SOCIOAMBIENTAIS

A deterioração da qualidade do ar representa um dos principais fatores ambientais associados ao adoecimento e à mortalidade prematura nas cidades contemporâneas. Nas últimas décadas, um amplo conjunto de evidências epidemiológicas tem demonstrado que a exposição crônica ou aguda a poluentes atmosféricos está diretamente relacionada ao aumento da incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e metabólicas, bem como ao agravamento de condições clínicas preexistentes (REQUIA *et al.*, 2024; DAMASCENO DA SILVA *et al.*, 2023; DIAS e CASTELHANO, 2024).

Em escala global, a Organização Mundial da Saúde estima que milhões de mortes prematuras estejam associadas anualmente à exposição à poluição do ar, evidenciando a magnitude desse problema para a saúde pública (WHO, 2021).

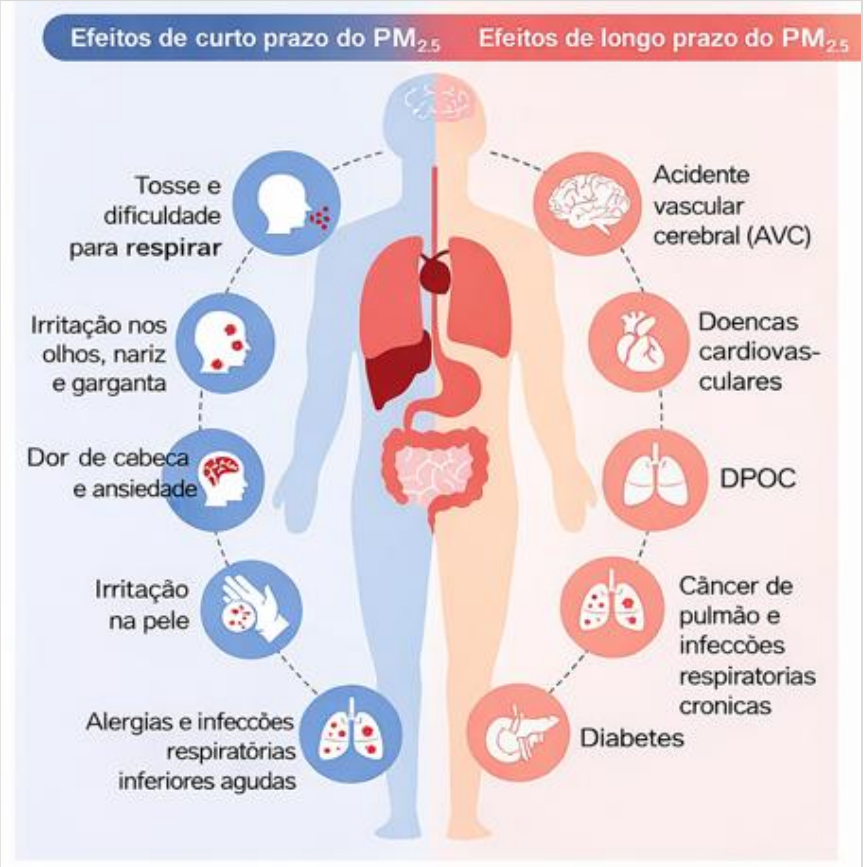
Os impactos da poluição atmosférica sobre a saúde humana decorrem principalmente da inalação de partículas e gases presentes na atmosfera urbana. Ao penetrar no organismo, esses poluentes podem desencadear processos inflamatórios, alterações no sistema imunológico, estresse oxidativo e disfunções metabólicas que afetam diferentes sistemas fisiológicos. Os efeitos variam de acordo com o tipo de poluente, sua concentração, o tempo de exposição e as condições individuais das populações expostas, como idade, estado nutricional e presença de doenças pré-existentes.

3.1 EFEITOS FISIOLÓGICOS DA EXPOSIÇÃO A POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Entre os poluentes mais associados a impactos na saúde humana destaca-se o material particulado fino (PM2,5), considerado um dos contaminantes atmosféricos mais perigosos para o organismo. Devido ao seu reduzido diâmetro aerodinâmico, essas partículas conseguem penetrar profundamente nas vias respiratórias (Figura 1), alcançando os alvéolos pulmonares e, em alguns casos, atravessando a barreira

pulmonar e atingindo a corrente sanguínea. Esse processo pode desencadear efeitos de curto e longo prazos, como inflamações sistêmicas, alterações na coagulação sanguínea e danos ao endotélio vascular, aumentando o risco de eventos cardiovasculares.

Figura 1 – Efeitos do material particulado fino da saúde humana



Adaptado de Basith *et al.*, (2022).

Os óxidos de nitrogênio (NOx) e o ozônio troposférico (O_3) também exercem efeitos significativos sobre o sistema respiratório. Esses gases possuem forte potencial oxidante e podem causar irritação das vias aéreas, inflamação pulmonar e redução da função respiratória. A exposição prolongada a esses poluentes está associada ao aumento da incidência de doenças como asma, bronquite crônica e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), além de agravar quadros respiratórios em indivíduos vulneráveis.

O monóxido de carbono (CO), por sua vez, apresenta um mecanismo de toxicidade distinto. Ao ser inalado, esse gás liga-se à hemoglobina com afinidade

muito superior à do oxigênio, formando carboxihemoglobina e reduzindo a capacidade do sangue de transportar oxigênio para os tecidos. Em concentrações elevadas, essa condição pode provocar hipóxia celular, afetando principalmente o sistema nervoso central e o sistema cardiovascular.

O dióxido de enxofre (SO_2) também possui efeitos irritantes sobre as vias respiratórias, podendo desencadear broncoconstrição, tosse e agravamento de doenças respiratórias, especialmente em crianças, idosos e indivíduos com doenças pulmonares preexistentes. Esses efeitos demonstram que a poluição atmosférica atua de forma sistêmica no organismo humano, afetando simultaneamente múltiplos sistemas fisiológicos.

3.2 MORBIDADE ASSOCIADA À POLUIÇÃO DO AR

A relação entre poluição atmosférica e morbidade manifesta-se principalmente por meio do aumento da incidência e agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Diversos estudos epidemiológicos demonstram que episódios de elevação da concentração de poluentes atmosféricos estão associados ao aumento de atendimentos hospitalares, internações e procura por serviços de saúde (DAMASCENO DA SILVA, 2023; DIAS E CASTELHANO, 2024;2025; MOORE, 2023; PEREIRA, 2023).

Entre as doenças respiratórias mais frequentemente associadas à exposição à poluição do ar destacam-se as infecções respiratórias agudas, as crises asmáticas, a bronquite e a doença pulmonar obstrutiva crônica. Crianças e idosos constituem grupos particularmente vulneráveis a esses efeitos (DIAS E CASTELHANO, 2024), uma vez que apresentam maior sensibilidade fisiológica e, em muitos casos, sistemas imunológicos mais fragilizados.

Além dos efeitos respiratórios, a poluição atmosférica tem sido cada vez mais associada a doenças cardiovasculares. A exposição prolongada a partículas finas e gases poluentes pode provocar alterações na pressão arterial, inflamação vascular e aumento da coagulação sanguínea, fatores que contribuem para o desenvolvimento de hipertensão, infarto do miocárdio e acidentes vasculares cerebrais.

Estudos recentes, (MOORE *et al.*, 2024; REQUIA *et al.*, 2024; DIAS e CASTELHANO, 2024), também têm identificado relações entre poluição atmosférica e outras condições de saúde, incluindo diabetes, declínio cognitivo e complicações gestacionais. Esses achados ampliam a compreensão da poluição do ar como um determinante ambiental de saúde, cuja influência se estende para além dos sistemas respiratório e cardiovascular.

3.3 MORTALIDADE ATRIBUÍVEL À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Além de contribuir para o aumento da morbidade, a poluição atmosférica está associada à mortalidade prematura em diferentes regiões do mundo. Episódios históricos de poluição extrema, como o smog ocorrido em Londres em 1952 e o episódio de poluição em Donora, nos Estados Unidos, em 1948, evidenciaram de forma dramática a relação entre concentração de poluentes atmosféricos e aumento imediato da mortalidade.

Desde então, estudos epidemiológicos têm demonstrado que mesmo níveis moderados de poluição atmosférica podem produzir impactos significativos na mortalidade populacional. A exposição crônica a partículas finas, por exemplo, tem sido associada ao aumento do risco de mortalidade por doenças cardiovasculares, respiratórias e câncer de pulmão.

Estima-se que uma parcela significativa das mortes prematuras em áreas urbanas esteja relacionada à exposição prolongada a poluentes atmosféricos. Esse impacto é particularmente expressivo em grandes centros urbanos, onde a combinação entre elevada densidade populacional, intensa circulação de veículos e concentração de atividades industriais resulta em altos níveis de poluição atmosférica.

3.4 VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL E DESIGUALDADE NA EXPOSIÇÃO AOS RISCOS

Embora a poluição atmosférica afete amplamente as populações urbanas, seus impactos não se distribuem de forma homogênea no espaço. Diferentes estudos demonstram que grupos socialmente vulneráveis tendem a apresentar maior

exposição aos poluentes e menor capacidade de proteção frente aos riscos ambientais (SLESINSKI *et al.*, 2025; REQUIA e CASTELHANO, 2023; DI FONZO *et al.*, 2022).

Essa desigualdade decorre, em grande medida, da própria organização socioespacial das cidades. Em muitas metrópoles, populações de baixa renda concentram-se em áreas periféricas ou próximas a infraestruturas urbanas de grande impacto ambiental, como rodovias, zonas industriais e corredores logísticos. Nessas regiões, a combinação entre maior exposição à poluição do ar, menor presença de áreas verdes e condições habitacionais precárias intensifica os riscos à saúde.

A estrutura urbana marcada pela segregação socioespacial contribui para que populações periféricas enfrentem longos deslocamentos diários em sistemas de transporte frequentemente congestionados, aumentando o tempo de exposição à poluição atmosférica e a outros fatores de estresse ambiental. Esse padrão evidencia como as desigualdades sociais e territoriais influenciam diretamente os níveis de vulnerabilidade ambiental e sanitária da população.

Além das desigualdades socioeconômicas, características demográficas também influenciam a vulnerabilidade aos efeitos da poluição atmosférica. Crianças, idosos, gestantes e indivíduos com doenças crônicas apresentam maior sensibilidade fisiológica à exposição a poluentes, tornando-se grupos prioritários em políticas de saúde pública voltadas à redução dos riscos ambientais.

3.5 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA COMO QUESTÃO DE JUSTIÇA AMBIENTAL

Diante desse cenário, a poluição do ar deve ser compreendida não apenas como um problema ambiental ou sanitário, mas também como uma questão de justiça ambiental. A distribuição desigual dos riscos associados à poluição atmosférica reflete processos históricos de urbanização, políticas de planejamento territorial e desigualdades estruturais que moldam o acesso aos recursos ambientais e à qualidade de vida nas cidades (DIAS E CASTELHANO, 2024).

Nesse sentido, discutir morbimortalidade associada à poluição do ar implica reconhecer que os impactos ambientais não são socialmente neutros. As populações mais vulneráveis tendem a sofrer de maneira mais intensa os efeitos da degradação

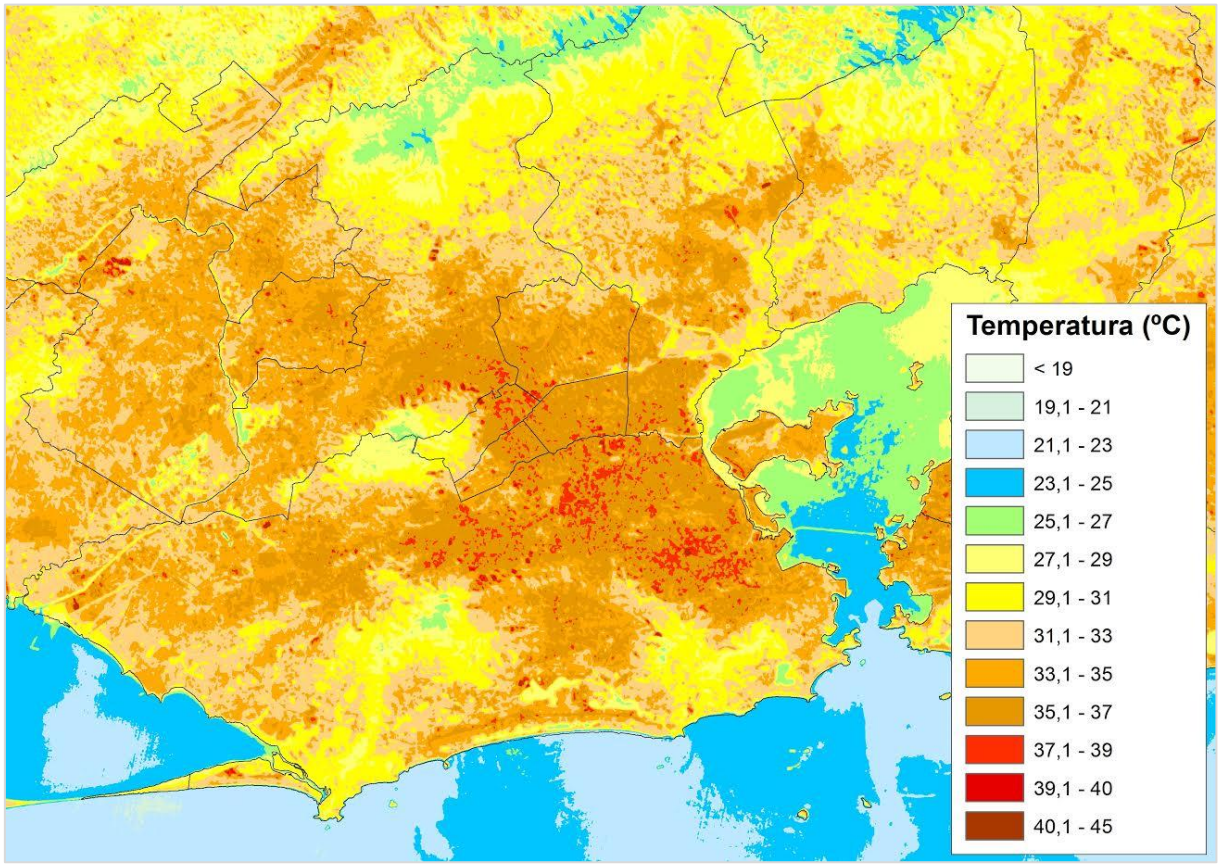
ambiental, evidenciando a necessidade de políticas públicas integradas que articulem saúde, planejamento urbano e gestão ambiental.

Assim, compreender as relações entre poluição atmosférica, saúde e desigualdade socioambiental constitui um passo fundamental para a construção de cidades mais justas, resilientes e ambientalmente sustentáveis.

4 ILHAS DE CALOR URBANO, CLIMA URBANO E SAÚDE

A intensificação das temperaturas nas cidades é um dos fenômenos mais estudados no campo da climatologia urbana nas últimas décadas. Conhecido como Ilha de Calor Urbana (ICU), esse processo ocorre quando áreas urbanizadas apresentam temperaturas significativamente mais elevadas do que suas áreas rurais ou periurbanas circundantes (Figura 2).

Figura 2 – Ilhas de calor no Rio de Janeiro



Fonte: Instituto Pereira Passos (IPP)

Estudos recentes demonstram que a interação entre mudanças climáticas globais e processos locais de urbanização cria condições microclimáticas capazes de elevar significativamente a temperatura do ar e da superfície urbana, produzindo impactos diretos sobre o conforto térmico e a saúde da população. (ANJOS *et al.*, 2025; ARAÚJO *et al.*, 2025; CASTELHANO, 2025).

Nesse contexto, as ilhas de calor urbanas devem ser compreendidas como resultado de um processo socioecológico complexo, no qual a forma urbana, o uso do solo, a densidade populacional e as atividades econômicas moldam as condições climáticas locais. Esse entendimento reforça a necessidade de analisar as cidades não apenas como espaços físicos, mas como sistemas socioambientais dinâmicos que influenciam diretamente os padrões de exposição ambiental das populações.

4.1 BASES TEÓRICAS DA CLIMATOLOGIA URBANA E FORMAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR

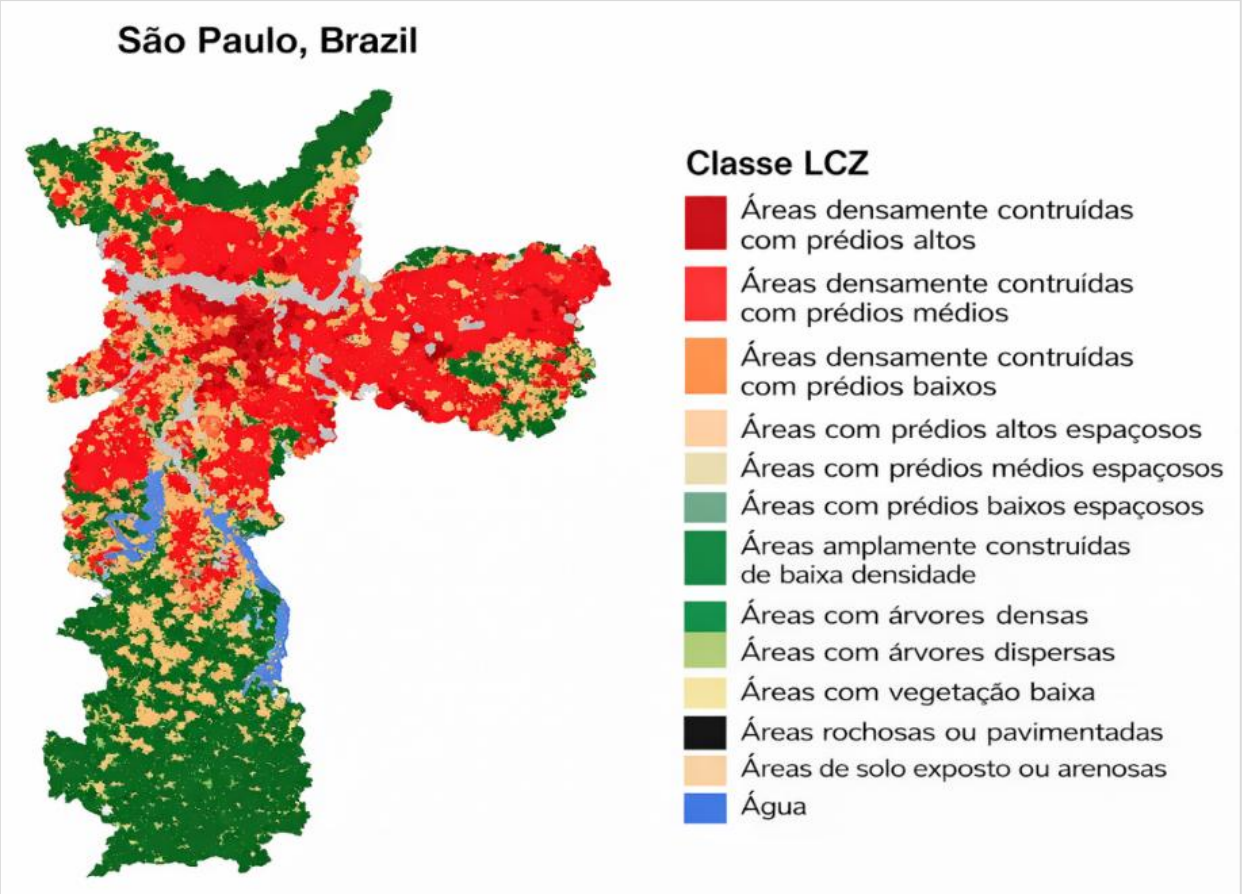
A climatologia geográfica e seu recorte no urbano tem buscado compreender como as transformações no uso e cobertura da terra alteram o balanço energético das cidades. A substituição de superfícies naturais por materiais urbanos — como concreto, asfalto e telhados metálicos — modifica significativamente as propriedades térmicas da superfície, aumentando a capacidade de absorção e armazenamento de calor durante o dia e retardando sua dissipação durante a noite.

Esse processo altera o balanço radiativo urbano e reduz a evapotranspiração, um mecanismo natural de resfriamento associado à presença de vegetação e corpos d’água. Como resultado, áreas urbanizadas tendem a apresentar temperaturas noturnas mais elevadas, o que reduz a capacidade de recuperação térmica do organismo humano após períodos de calor intenso.

A intensificação das ilhas de calor também está relacionada à morfologia urbana. Cidades com alta densidade de edificações e ruas estreitas podem formar “cânions urbanos”, que dificultam a circulação do vento e aumentam o aprisionamento de radiação térmica. Essa configuração espacial contribui para a formação de microclimas urbanos mais quentes e menos ventilados.

Metodologias e modelagens, como as LCZs (Local Climate Zones) (Figura 3) contribuem para o refinamento na identificação dos processos e possibilitam diagnósticos mais fidedignos da realidade.

Figura 3 – Classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) e a análise de Ilhas de Calor Urbanas (ICU)



Adaptado de Anjos *et al.*, (2025).

4.2 ILHAS DE CALOR URBANO E MORBIMORTALIDADE

O aumento da temperatura nas cidades exerce efeitos diretos sobre o conforto térmico da população, influenciando a percepção de bem-estar, a produtividade e a saúde humana. O conforto térmico resulta da interação entre diferentes fatores ambientais, como temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Quando esses elementos se combinam de forma desfavorável — situação comum em áreas urbanas densamente impermeabilizadas ou durante eventos de

calor extremo — a capacidade do organismo humano de manter o equilíbrio térmico pode ser comprometida.

Nessas condições, o corpo precisa intensificar mecanismos fisiológicos de termorregulação, como o aumento da sudorese e da circulação sanguínea periférica, para dissipar o calor corporal. Em ambientes urbanos caracterizados por altas temperaturas, baixa ventilação e intensa absorção de calor pelas superfícies construídas, esses mecanismos podem tornar-se insuficientes, resultando em estresse térmico. Esse quadro pode desencadear sintomas como fadiga, desidratação, tontura e exaustão térmica, podendo evoluir, em situações extremas, para insolação e disfunções orgânicas graves.

Estudos demonstram que espaços verdes urbanos desempenham papel importante na mitigação das ilhas de calor e na melhoria da qualidade ambiental das cidades (BARBOSA *et al.*, 2024; DAMASCENO DA SILVA *et al.*, 2023). Além da regulação térmica, pesquisas indicam que áreas verdes podem contribuir para a diminuição simultânea da temperatura do ar, da concentração de poluentes atmosféricos e do estresse ambiental experimentado pelas populações urbanas, fatores que influenciam diretamente a ocorrência de doenças cardiovasculares e respiratórias (OLIVEIRA *et al.*, 2025; DAMASCENO DA SILVA *et al.*, 2023; YANG *et al.*, 2022).

Os impactos das ilhas de calor urbano sobre a saúde pública são amplamente documentados na literatura científica. A exposição prolongada a temperaturas elevadas está associada ao aumento de hospitalizações e mortalidade relacionadas a doenças cardiovasculares, respiratórias e metabólicas. Durante eventos de calor extremo, o sistema cardiovascular precisa trabalhar mais intensamente para dissipar o calor corporal, o que pode provocar sobrecarga fisiológica, especialmente em idosos e indivíduos com doenças crônicas.

Diversos estudos também demonstram que a exposição simultânea a altas temperaturas e poluentes atmosféricos pode intensificar os riscos de doenças cardiorrespiratórias e aumentar as taxas de mortalidade em ambientes urbanos (CASTELHANO *et al.*, 2025; REQUIA *et al.*, 2024). Em contextos específicos, como durante a pandemia de COVID-19, evidências indicam que regiões com maiores níveis de poluição atmosférica apresentaram também maiores taxas de mortalidade

associadas à doença, sugerindo a existência de interações complexas entre condições climáticas, poluição do ar e vulnerabilidades sociais (DAMASCENO DA SILVA *et al.*, 2023; DIAS, 2024b; DIAS e CASTELHANO, 2024).

Os efeitos combinados entre clima urbano e poluição atmosférica também podem afetar diferentes estágios do ciclo de vida. Pesquisas recentes apontam que a exposição a poluentes atmosféricos — frequentemente intensificados em ambientes urbanos — está associada a desfechos adversos ao nascimento, como baixo peso ao nascer. Um estudo nacional realizado no Brasil identificou associação entre exposição à poluição do ar e baixo peso ao nascer em mais de dez milhões de registros de nascimento entre 2001 e 2018 (MOORE *et al.*, 2024).

Assim como ocorre com a poluição atmosférica, os impactos das ilhas de calor urbano não se distribuem de forma homogênea entre os diferentes grupos sociais. A vulnerabilidade ao calor depende de fatores como condições socioeconômicas, características demográficas, infraestrutura urbana e acesso a serviços de saúde. Populações de baixa renda frequentemente residem em áreas com maior densidade construtiva, menor presença de vegetação e elevada impermeabilização do solo, o que intensifica a exposição ao calor urbano e reduz a capacidade de adaptação a eventos climáticos extremos.

Além disso, fatores sociodemográficos — como idade, escolaridade, acesso a serviços de saúde e condições de moradia — podem ampliar os impactos ambientais sobre a saúde. Estudos realizados no semiárido nordestino indicam que a sobreposição entre vulnerabilidades sociais e ambientais aumenta significativamente a suscetibilidade das populações aos efeitos combinados da poluição atmosférica e da variabilidade climática (DIAS, 2024a).

Essas desigualdades evidenciam que os riscos associados às ilhas de calor urbano devem ser compreendidos sob a perspectiva da justiça ambiental e climática, uma vez que diferentes grupos sociais apresentam capacidades distintas de exposição, adaptação e resiliência frente aos riscos ambientais.

Diante da intensificação das temperaturas urbanas e de seus impactos sobre a saúde pública, o planejamento urbano torna-se elemento central para a mitigação das ilhas de calor e para a promoção de cidades mais resilientes. Estratégias como a ampliação de áreas verdes, a criação de corredores ecológicos, o uso de materiais

urbanos com maior refletância térmica e a incorporação de soluções baseadas na natureza no desenho urbano podem contribuir para a redução das temperaturas nas cidades e para a melhoria das condições ambientais.

Nesse contexto, a integração entre planejamento urbano, políticas ambientais e políticas de saúde pública torna-se fundamental para enfrentar os desafios impostos pela crise climática nas cidades contemporâneas. A construção de cidades mais resilientes exige abordagens interdisciplinares que articulem conhecimentos da climatologia urbana, epidemiologia ambiental, geografia da saúde e planejamento territorial.

5 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO URBANA PARA MELHORIA DA QUALIDADE DO AR E REDUÇÃO DOS RISCOS À SAÚDE

A intensificação da poluição atmosférica, das ilhas de calor urbano e dos eventos climáticos extremos impõe desafios significativos para a saúde pública nas cidades contemporâneas. Diante desse cenário, torna-se fundamental desenvolver estratégias integradas de mitigação e adaptação urbana, capazes de reduzir a exposição da população a riscos ambientais e fortalecer a resiliência dos sistemas urbanos.

As políticas de mitigação e adaptação são frequentemente tratadas como dimensões complementares no enfrentamento das mudanças climáticas. Enquanto a mitigação busca reduzir as causas estruturais das alterações climáticas — especialmente por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa —, a adaptação envolve ações voltadas à redução da vulnerabilidade das populações e dos sistemas urbanos aos impactos já em curso. Estudos recentes indicam que a integração dessas duas dimensões pode produzir importantes co-benefícios ambientais e de saúde pública, incluindo a melhoria da qualidade do ar, a redução da exposição ao calor e a diminuição da morbimortalidade associada a fatores ambientais (OFREMU, *et al.*, 2025).

Nesse contexto, as cidades assumem papel central nas estratégias globais de enfrentamento da crise climática. Isso ocorre porque os centros urbanos concentram grande parte da população mundial, das atividades econômicas e das emissões atmosféricas. Ao mesmo tempo, são também os territórios onde os impactos

ambientais se manifestam de forma mais intensa, tornando o planejamento urbano uma ferramenta fundamental para reduzir riscos ambientais e promover ambientes urbanos mais saudáveis.

Entre as principais estratégias de mitigação das ilhas de calor urbano destaca-se o desenvolvimento de infraestruturas urbanas resilientes ao calor, que incorporam princípios de climatologia urbana ao planejamento e desenho das cidades.

Pesquisas recentes têm proposto a implementação de planos de gestão do calor urbano (Urban Heat Management Plans – UHMP), que combinam medidas estruturais e não estruturais voltadas à redução da temperatura urbana e à proteção da população frente a eventos de calor extremo. Esses planos incluem ações de planejamento urbano, gestão ambiental, infraestrutura verde, monitoramento climático e políticas de saúde pública integradas (CUI *et al.*, 2024).

Entre as principais estratégias estruturais destacam-se: ampliação da cobertura vegetal urbana; criação de parques e corredores ecológicos; implantação de telhados verdes e paredes vegetadas; utilização de materiais urbanos de alta refletância (*cool roofs e cool pavements*); preservação de corpos d'água urbanos.

Essas intervenções atuam diretamente sobre o balanço energético das cidades, reduzindo a absorção de calor pelas superfícies urbanas e aumentando processos naturais de resfriamento, como evapotranspiração e sombreamento.

Além das intervenções físicas, as estratégias não estruturais incluem sistemas de alerta para ondas de calor, campanhas de conscientização pública, monitoramento climático urbano e desenvolvimento de políticas intersetoriais que integrem planejamento urbano, saúde pública e gestão ambiental.

5.1 INFRAESTRUTURA VERDE E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS URBANOS

A ampliação da infraestrutura verde urbana constitui uma das estratégias mais eficazes para reduzir simultaneamente os efeitos das ilhas de calor e da poluição atmosférica.

Áreas verdes urbanas desempenham múltiplas funções ecológicas e sociais, incluindo: redução da temperatura do ar e da superfície; absorção de poluentes

atmosféricos; aumento da infiltração de água no solo; melhoria da qualidade do ar; promoção do bem-estar físico e mental da população.

Além disso, árvores e vegetação urbana atuam como filtros naturais de partículas atmosféricas, contribuindo para a remoção de poluentes como material particulado (PM2.5), dióxido de nitrogênio (NO_2) e ozônio troposférico.

No contexto das mudanças climáticas, a infraestrutura verde também desempenha papel estratégico na promoção de soluções baseadas na natureza (*nature-based solutions*), que buscam integrar processos ecológicos ao planejamento urbano. Essas soluções têm sido amplamente recomendadas por organismos internacionais como estratégias capazes de reduzir riscos climáticos e promover cidades mais resilientes.

5.2 POLÍTICAS DE QUALIDADE DO AR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Outro eixo central das estratégias de mitigação envolve a implementação de políticas públicas voltadas à redução da poluição atmosférica, especialmente nos setores de transporte, energia e indústria.

A literatura científica demonstra que grande parte da poluição do ar em áreas urbanas está associada à queima de combustíveis fósseis, utilizada em sistemas de transporte, geração de energia e processos industriais. Essas emissões liberam diversos poluentes atmosféricos, incluindo material particulado, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, que afetam diretamente a saúde humana.

Nesse sentido, políticas de transição energética — como a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, a eletrificação da mobilidade urbana e o incentivo ao transporte público sustentável — constituem instrumentos fundamentais para reduzir emissões atmosféricas e mitigar impactos ambientais.

Além disso, estratégias de planejamento urbano voltadas à mobilidade sustentável, como a criação de ciclovias, corredores de transporte coletivo e zonas de baixa emissão, podem contribuir significativamente para a redução da poluição atmosférica nas cidades.

5.3 SISTEMAS DE SAÚDE E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A intensificação dos impactos ambientais associados às mudanças climáticas exige também adaptações nos sistemas de saúde pública. Eventos climáticos extremos, como ondas de calor, episódios de poluição atmosférica e incêndios florestais, podem aumentar significativamente a demanda por serviços de saúde.

Nesse contexto, torna-se fundamental fortalecer os sistemas de vigilância em saúde ambiental e desenvolver mecanismos institucionais capazes de responder aos novos desafios sanitários impostos pela crise climática. Estudos indicam que as mudanças ambientais e climáticas têm potencial para ampliar a incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e transmitidas por vetores, além de pressionar significativamente a capacidade operacional dos sistemas de saúde (CASTRO *et al.*, 2024).

A integração entre políticas ambientais e políticas de saúde pública constitui, portanto, elemento central para reduzir vulnerabilidades e ampliar a capacidade de resposta dos sistemas de saúde frente aos impactos ambientais.

Entre as principais estratégias de adaptação destacam-se: implementação de sistemas de alerta precoce para ondas de calor; monitoramento epidemiológico associado a variáveis climáticas; fortalecimento da atenção primária em saúde ambiental; capacitação de profissionais de saúde para lidar com eventos climáticos extremos; integração entre vigilância epidemiológica e monitoramento ambiental.

A literatura recente enfatiza que políticas urbanas isoladas são insuficientes para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos. Em vez disso, torna-se necessário adotar abordagens sistêmicas que integrem planejamento territorial, políticas ambientais, mobilidade urbana, infraestrutura verde e saúde pública.

A integração entre estratégias de mitigação e adaptação pode gerar benefícios múltiplos, incluindo: redução das emissões de gases de efeito estufa; melhoria da qualidade do ar; redução da exposição ao calor urbano; diminuição de riscos à saúde pública; promoção de justiça ambiental e climática.

Dessa forma, o planejamento urbano orientado pela perspectiva da saúde planetária e da sustentabilidade urbana constitui um dos caminhos mais promissores para enfrentar os desafios impostos pela crise climática nas cidades contemporâneas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade do ar e as condições térmicas do ambiente urbano configuram dimensões centrais da saúde ambiental nas cidades contemporâneas. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a poluição atmosférica e o fenômeno das ilhas de calor urbano resultam de processos estruturais associados à urbanização, à intensificação das atividades econômicas e ao uso intensivo de combustíveis fósseis. Esses processos alteram a composição química da atmosfera e o balanço energético das cidades, produzindo condições ambientais capazes de afetar diretamente a saúde humana, especialmente em contextos de elevada densidade populacional e intensa circulação de veículos.

Os efeitos da poluição do ar e do aumento das temperaturas urbanas manifestam-se em diferentes níveis do processo saúde-doença. A literatura científica tem demonstrado associações consistentes entre exposição a poluentes atmosféricos e aumento da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, bem como maior ocorrência de hospitalizações e mortalidade prematura. Da mesma forma, a intensificação do calor urbano pode agravar o estresse térmico e aumentar a vulnerabilidade fisiológica de determinados grupos populacionais, particularmente idosos, crianças e indivíduos com doenças crônicas. Esses efeitos tendem a ser potencializados quando altas temperaturas e poluentes atmosféricos atuam simultaneamente, configurando cenários de risco ampliado à saúde pública.

Outro aspecto fundamental discutido neste capítulo refere-se à distribuição desigual desses riscos no espaço urbano. A exposição à poluição atmosférica e ao calor urbano não ocorre de forma homogênea entre os diferentes grupos sociais. Condições de moradia, acesso a áreas verdes, padrões de mobilidade e localização das atividades econômicas influenciam diretamente a intensidade da exposição ambiental das populações. Nesse sentido, as relações entre qualidade do ar, clima urbano e saúde evidenciam a importância de incorporar a perspectiva da vulnerabilidade socioambiental e da justiça ambiental na análise e na formulação de políticas públicas voltadas à melhoria das condições ambientais nas cidades.

Diante desse cenário, o enfrentamento dos impactos da poluição atmosférica e das ilhas de calor urbano exige estratégias integradas de planejamento urbano, gestão ambiental e saúde pública. Medidas como ampliação da infraestrutura verde, promoção da mobilidade sustentável, transição energética e desenvolvimento de sistemas de monitoramento ambiental e vigilância em saúde constituem instrumentos importantes para reduzir riscos ambientais e promover ambientes urbanos mais saudáveis. A articulação entre essas estratégias pode contribuir para a construção de cidades mais resilientes às mudanças climáticas e mais capazes de garantir condições ambientais adequadas à saúde e ao bem-estar das populações.

REFERÊNCIAS

ANJOS, M., MEDEIROS, D., CASTELHANO, F. *et al.* LCZ4r package R for local climate zones and urban heat islands. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, art. 7710, p. 1-14, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-92000-0.

ARAÚJO, K.; LIMA, L.; DIAS, M.A.; COSTA, D.G.; SILVA, I. On the Use of a Bike-Sharing System in Extreme Weather Events: The Case of Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil. Sustainability 2025, 17, 2291. https://doi.org/10.3390/su17052291

BARBOSA, Vitória Rodrigues Ferreira; DAMASCENO, Reizane Maria; DIAS, Mariana Andreotti; CASTELHANO, Francisco Jablinski; ROIG, Henrique Llacer; REQUIA, Weeberb J. Ecosystem services provided by green areas and their implications for human health in Brazil. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 161, p. 111975, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111975.

BASITH S, MANAVALAN B, SHIN TH, PARK CB, LEE WS, KIM J, LEE G. The Impact of Fine Particulate Matter 2.5 on the Cardiovascular System: A Review of the Invisible Killer. **Nanomaterials (Basel)**. 2022. DOI: 10.3390/nano12152656.

BRAGA, A., BOHM, G.M., PEREIRA, L.A. e SALDIVA, P., Poluição atmosférica e saúde humana, **Revista USP**, São Paulo, n.51, p. 58-71, 2001.

CASTELHANO, Francisco Jablinski. Riscos e vulnerabilidades sob a perspectiva da qualidade do ar. **Finisterra**, Lisboa, n. 118, p. 255-271, 2021.

CASTELHANO, F.J., PEDROSO, A.C.N., COBELO, I., BORGE, R., ROIG, H.L., ADAMS, M., AMINI, H., KOUTRAKIS, P., R´ EQUIA, W.J.The impact of long-term weather changes on air quality in Brazil. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 283, p. 119182, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119182.

CASTELHANO, Francisco; CAMPOS NETO, Antonio; CABRAL, Iago José; ANJOS, Max Wendell. Urban heat islands and social vulnerability in a large city in

Northeastern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 12., 2025. **Proceedings [...]**. [S. l.]: Copernicus Meetings, 2025. Disponível em: https://meetingorganizer.copernicus.org/ICUC12/ICUC12-88.html. Acesso em: 12 mar. 2026.

CASTRO, Nádile Juliane Costa de; SANTOS, Dayanne de Nazaré dos; SOUSA, Letícia Barbosa de; TAKOLODJOU, Mahougnon Aïcha; ALMEIDA, Raissa Moura de; PARENTE, Andressa Tavares. Mudanças ambientais, climáticas e os serviços de saúde: caminhos para mitigação. **Revista Enfermagem UERJ**, Rio de Janeiro, v. 32, e82230, p. 1-10, 2024. DOI: https://doi.org/10.12957/reuerj.2024.82230. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/reuerj. Acesso em: 12 mar. 2026.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2018**. São Paulo: CETESB, 2019.

CHE, Wenwei *et al.* Impacts of pollution heterogeneity on population exposure in dense urban areas using ultra-fine resolution air quality data. **Journal of Environmental Sciences**, [s. l.], v. 125, p. 513-523, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.041.

CHIQUETTO, J. B., ALVIM, D. S., ROZANTE, J. B., FARIA, M., ROZANTE, V., & GOBO, J. P. A. Impact of a truck Driver's strike on air pollution levels in São Paulo. Atmospheric Environment, *246*, 118072, 2021.

CUI, Yi; YIN, Mingqiang; CHENG, Xiang. Towards cool cities and communities: preparing for an increasingly hot future by the development of heat-resilient infrastructure and urban heat management plan. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 34, p. 103568, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103568.

DAMASCENO DA SILVA, Reizane Maria; DIAS, Mariana Andreotti; BARBOSA, Vitória Rodrigues Ferreira; CASTELHANO, Francisco Jablinski; RÉQUIA, Weeberb João. Poluição do ar e COVID-19: análise da mortalidade na região Norte do Brasil. **Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, Uberlândia, v. 19, e73366, p. 1-12, 2023. DOI: https://doi.org/10.14393/Hygeia73366.

DI FONZO, Davide; FABRI, Alessandra; PASETTO, Roberto. Distributive justice in environmental health hazards from industrial contamination: a systematic review of national and near-national assessments of social inequalities. **Social Science & Medicine**, [s. l.], v. 297, p. 114834, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2022.114834. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027795362200140X. Acesso em: 12 mar. 2026.

DIAS, Mariana Andreotti. Penalidades climáticas em municípios da Caatinga Setentrional. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE BIOGEOGRAFIA, 2.; CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE BIOGEOGRAFIA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 1.; CONGRESO ESPAÑOL DE BIOGEOGRAFÍA, 13., 2024, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: USP, 2024a. v. 1, p. 1-5.

DIAS, Mariana Andreotti. Poluição do ar, conforto térmico e mortalidade no Semiárido Setentrional Nordestino: análise por grupos etários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 20., 2024b, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: UFPB, 2024. v. 1, p. 1-8.

DIAS, Mariana Andreotti; CASTELHANO, Francisco Jablinski. Mudanças climáticas, poluição atmosférica e vulnerabilidade social no Semiárido Setentrional Nordestino. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 23., 2024, Brasília. **Anais eletrônicos [...]**. Campinas: Galoá, 2024. v. 23, p. 1-9.

INSTITUTO PEREIRA PASSOS (IPP). **Mapa das ilhas de calor no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IPP, [2021]. Disponível em: https://rioonwatch.org.br/?p=61635. Acesso em: 12 mar. 2026.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2021: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

MENDONÇA, Francisco. Clima e planejamento urbano em cidades brasileiras. **Revista de Geografia**, Recife, v. 18, n. 2, p. 1-15, 2001.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: Instituto de Geografia/USP, 1976.

MOORE, Julia Placido. **Doenças cardiorrespiratórias e poluição atmosférica: uma análise espacial de risco no Brasil**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249796. Acesso em: 12 mar. 2026.

MOORE, Julia Placido; SILVA, Reizane Maria Damasceno da; CASTELHANO, Francisco Jablinski; HOINASKI, Leonardo; DIAS, Mariana Andreotti; REQUIA, Weeberb J. Ambient air pollution and low birth weight in Brazil: a nationwide study of more than 10 million births between 2001 and 2018. **Chemosphere**, [s. l.], v. 366, p. 143469, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143469.

OFREMU, Gibson Owhoro; RAIMI, Babatunde Yusuf; YUSUF, Samuel Omokhafe; DZIWORNU, Beatrice Akorfa; NNABUIFE, Somtochukwu Godfrey; EZE, Adaeze Mary; NNAJIOFOR, Chisom Assumpta. Exploring the relationship between climate change, air pollutants and human health: impacts, adaptation, and mitigation strategies. **Green Energy and Resources**, [s. l.], v. 3, p. 100074, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geres.2025.100074.

OKE, Timothy R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London: Routledge, 1987.

OLIVEIRA, Maria Carla Queiroz Diniz; MIRANDA, Regina Maura de; ANDRADE, Maria de Fátima; KUMAR, Prashant. Impact of urban green areas on air quality: an integrated analysis in the metropolitan area of São Paulo. **Environmental Pollution**,

[s. l.], v. 372, p. 126082, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126082. Acesso em: 12 mar. 2026.

PEREIRA, Karen Thalita. **O impacto dos poluentes atmosféricos nos anos perdidos de vida por doenças cardiovasculares em Piracicaba – SP**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023.

REQUIA, Weeberb J.; CASTELHANO, Francisco Jablinski; MOORE, Julia; SILVA, Reizane Maria Damasceno da; DIAS, Mariana Andreotti. Thermal stress and hospital admissions for cardiorespiratory disease in Brazil. **Environment International**, [s. l.], v. 187, p. 108694, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108694.

REQUIA, W.J., CASTELHANO, F.J. Economic and racial disparities of the weather impact on air quality in Brazil. Sci Rep 13, 6374, 2023.

SLESINSKI, S. Claire; MATTHIES-WIESLER, Franziska; BREITNER-BUSCH, Susanne; GUSSMANN, Geronimo; SCHNEIDER, Alexandra. Social inequalities in exposure to heat stress and related adaptive capacity: a systematic review. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 033005, 2025. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/adb509.

VANDENINDEN, B., DEVLEESSCHAUWER, B., OTAVOVA, M. *et al.* Implications of spatial and seasonal air pollution patterns, socioeconomic disparities, and 15-minute communities for achieving WHO air quality guidelines. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, art. 13683, p. 1-12, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-98123-8.

VIEIRA, N. R. Poluição do Ar: Indicadores Ambientais. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2009.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: World Health Organization, 2021.

YANG, Q., LIU, G., GONELLA, F., CHEN, Y., LIU, C., ZHAO, H., YANG, Z. Assessing the temporal-spatial dynamic reduction in ecosystem services caused by air pollution: a near-real-time data perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 180, p. 106205, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106205.



IV
CONHECIMENTO, TECNOLOGIA E AÇÃO CLIMÁTICA

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO MONITORAMENTO AMBIENTAL NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Larissa Warnavin - Centro Universitário Internacional Uninter; NAILA Tecnologia Ambiental[1]
Franciele Marilies Estevam - Centro Universitário Internacional Uninter[2]
Nayana Machado - PNUD/ONU; NAILA Tecnologia Ambiental[3]
Mauriele Felix da Silva - Ministério Público do Paraná (MPPR)[4]

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem um dos principais desafios socioambientais contemporâneos, com repercussões sobre a dinâmica dos sistemas naturais, a organização dos territórios e as condições de vida das populações. O aquecimento global, impulsionado principalmente pelas emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE), tem provocado alterações nos padrões de temperatura e precipitação, contribuindo para a intensificação de diferentes eventos climáticos extremos e para a transformação dos ecossistemas terrestres e aquáticos (IPCC, 2021; IPCC, 2023). Esses processos manifestam-se de maneira diferenciada no espaço geográfico, em função das características ambientais, das formas de uso e ocupação da terra e das condições socioeconômicas das populações, evidenciando a necessidade de abordagens integradas para compreender suas causas, manifestações e consequências.

[1]Bacharelado, licenciatura, mestrado e doutorado em geografia – *e-mail*: larissa.w@uninter.com
[2]Bacharelado, licenciatura e mestrado em geografia – *e-mail*: franciele.e@uninter.com
[3]Mestrado e graduação em engenharia ambiental – *e-mail*: nayana.machado@undp.org
[4]Bacharelado, licenciatura e mestrado em Geografia - *e-mail*: mfdsilva@mppr.mp.br

Nesse contexto, o monitoramento ambiental assume papel fundamental na identificação, análise e acompanhamento das transformações da paisagem, permitindo compreender a evolução dos processos ambientais e subsidiar estratégias de mitigação das mudanças climáticas, adaptação e redução de riscos. A complexidade desses fenômenos, caracterizados por diferentes escalas espaciais e temporais, demanda a utilização de métodos e instrumentos capazes de integrar informações sobre a atmosfera, a superfície terrestre, os recursos hídricos, a vegetação e as atividades humanas. Além disso, o aumento da frequência e da intensidade de determinados eventos hidrometeorológicos extremos reforça a importância da produção sistemática de informações para o planejamento territorial, a gestão ambiental e a prevenção de desastres (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009; WMO, 2024).

Os avanços das ciências da geoinformação e das tecnologias de observação da Terra ampliaram significativamente as possibilidades de aquisição, processamento, integração e análise de dados ambientais. Nesse cenário, as geotecnologias consolidaram-se como instrumentos estratégicos para a compreensão das dinâmicas territoriais e dos processos associados às mudanças climáticas. A utilização de imagens de satélite, levantamentos aerotransportados, sensores ambientais, sistemas de posicionamento e ferramentas de análise espacial permite acompanhar transformações na cobertura e no uso da terra, identificar alterações nos padrões de vegetação e disponibilidade hídrica, analisar a distribuição espacial de fenômenos climáticos e avaliar áreas suscetíveis a processos geoambientais (Jensen, 2009; Florenzano, 2011; Mulla, 2013).

A integração dessas informações em ambientes computacionais de análise espacial possibilita superar abordagens exclusivamente descritivas, contribuindo para a identificação de padrões, a investigação de relações entre variáveis ambientais e a construção de modelos e cenários prospectivos. Essas aplicações fornecem subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas, a conservação da biodiversidade, o ordenamento territorial e a implementação de medidas voltadas à adaptação climática. Entretanto, a interpretação dos dados geoespaciais exige considerar as limitações dos sensores, as incertezas dos modelos, as especificidades dos processos ambientais e

a necessidade de validação das informações, especialmente quando utilizadas para orientar decisões que envolvem riscos socioambientais.

Diante desse panorama, este capítulo tem como objetivo analisar as contribuições das geotecnologias para o monitoramento ambiental no contexto das mudanças climáticas, abordando seus fundamentos tecnológicos, suas principais aplicações e os desafios associados à produção e utilização de informações geoespaciais. Inicialmente, são apresentados os fundamentos das geotecnologias e dos sistemas de monitoramento ambiental, seguidos pela discussão sobre sensores, processamento de imagens e índices espectrais. Na sequência, são examinadas as aplicações no monitoramento da cobertura e do uso da terra, com destaque para iniciativas brasileiras de observação e análise territorial. O capítulo também contempla o monitoramento hidrológico, a modelagem de eventos extremos e riscos geoambientais, as aplicações na conservação da biodiversidade, na ecologia da paisagem e na dinâmica urbana. Por fim, são discutidas as tendências relacionadas à inteligência artificial, à computação em nuvem e à integração de sensores, bem como os desafios científicos, operacionais e institucionais para a ampliação do uso dessas tecnologias na gestão ambiental e no enfrentamento das mudanças climáticas.

2 FUNDAMENTOS DAS GEOTECNOLOGIAS E DO MONITORAMENTO AMBIENTAL: CONCEITOS E APLICAÇÕES NA ANÁLISE AMBIENTAL

O termo geotecnologias compreende um conjunto de ciências, técnicas, métodos e instrumentos destinados à aquisição, ao armazenamento, ao processamento, à análise e à disponibilização de dados espaciais. Esse campo abrange disciplinas e recursos como Cartografia Digital, Topografia, Geodésia, Fotogrametria, Sensoriamento Remoto (SR), Geoprocessamento, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), entre os quais se destaca o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Rosa (2013) ressalta que a articulação desses diferentes recursos permite investigar fenômenos territoriais complexos, enquanto Souza Filho e Crósta (2003) destacam sua contribuição para a estruturação de bases de dados georreferenciados e a produção

de informações voltadas à conservação da natureza e ao ordenamento do uso da terra.

Entre os componentes desse conjunto tecnológico, o Geoprocessamento destaca-se por seu caráter transdisciplinar e por sua capacidade de integrar diferentes áreas do conhecimento na análise de fenômenos espacialmente distribuídos. Fundamentado no princípio da localização geográfica e na manipulação de dados espaciais, envolve a articulação entre métodos, técnicas computacionais, bases de dados, instituições e profissionais para produzir informações relevantes à compreensão e à gestão do território (Rocha, 2000). Câmara e Davis (2001) definem o Geoprocessamento como um campo do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica, permitindo a identificação de padrões espaciais, a análise de relações entre variáveis e a representação de processos dinâmicos. Suas aplicações abrangem diferentes áreas, incluindo Cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia, planejamento urbano e regional e gestão ambiental.

Embora frequentemente empregados de maneira associada, Geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica apresentam distinções conceituais importantes. Enquanto o Geoprocessamento compreende um conjunto amplo de métodos, técnicas e procedimentos voltados ao tratamento e à análise de informações espaciais, os SIGs constituem ambientes tecnológicos destinados à organização, integração, processamento, análise e representação desses dados. Sua estrutura envolve componentes como *hardware*, *software*, bases de dados, procedimentos metodológicos e recursos humanos especializados, permitindo reunir informações provenientes de diferentes fontes e formatos em um ambiente geográfico integrado. Dessa forma, os SIGs viabilizam operações de consulta espacial, sobreposição de camadas temáticas, análise de proximidade, modelagem territorial e elaboração de produtos cartográficos, oferecendo suporte à investigação científica e à tomada de decisões relacionadas ao planejamento e à gestão ambiental (Burrough, 1986; Rocha, 2000; Câmara; Davis, 2001; Zaidan, 2017).

Complementarmente, o Sensoriamento Remoto (SR) constitui uma importante fonte de dados para o monitoramento ambiental, pois permite obter informações sobre objetos, superfícies e fenômenos terrestres sem a necessidade de contato físico direto

com os alvos investigados. Fundamentado na detecção e no registro da radiação eletromagnética refletida, emitida ou retroespalhada pelos elementos da superfície terrestre, o sensoriamento remoto possibilita a identificação e o acompanhamento de características biofísicas e transformações ambientais em diferentes escalas (Jensen, 2009; Mulla, 2013). A utilização de sensores instalados em plataformas orbitais, aéreas e remotamente pilotadas amplia a capacidade de observação sistemática do território, permitindo acompanhar alterações na cobertura vegetal, na dinâmica dos recursos hídricos, nas condições da superfície terrestre e nos padrões de ocupação e uso da terra (Florenzano, 2011).

A integração entre sensoriamento remoto, geoprocessamento e SIG constitui uma das principais contribuições das geotecnologias para o monitoramento ambiental. Enquanto os sistemas sensores fornecem registros periódicos das condições da superfície terrestre, as técnicas de geoprocessamento permitem transformar esses registros em informações analíticas, que podem ser organizadas e relacionadas a outras variáveis ambientais em ambientes SIG. Essa complementaridade favorece a construção de séries temporais, a identificação de tendências espaciais, a detecção de mudanças e a avaliação de processos ambientais que se manifestam em diferentes escalas geográficas. Entretanto, a qualidade das análises depende da compatibilidade entre as bases utilizadas, das características dos sensores, da resolução espacial e temporal dos dados e dos procedimentos de processamento e validação adotados.

No contexto das mudanças climáticas, essas possibilidades adquirem relevância diante da necessidade de compreender as transformações dos sistemas ambientais e suas relações com as atividades humanas. As evidências científicas reunidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas demonstram que o aquecimento global, provocado principalmente pelas emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE), tem produzido alterações nos padrões climáticos e influenciado a frequência e a intensidade de diferentes eventos extremos (IPCC, 2021; IPCC, 2023). O aumento da temperatura média global em relação ao período pré-industrial está associado a mudanças nos regimes de precipitação e à intensificação de determinados episódios de ondas de calor, precipitações extremas e secas, com repercussões sobre os ecossistemas e as atividades humanas (Allen *et al.*, 2019; WMO, 2024). A distribuição espacial desses impactos, entretanto, não ocorre de

maneira homogênea, sendo condicionada pelas características ambientais, pela organização territorial e pelas condições de exposição e vulnerabilidade das populações.

Diante desse cenário, o monitoramento ambiental sistemático constitui um componente essencial das estratégias de adaptação climática, redução de riscos e planejamento territorial (IPCC, 2012; IPCC, 2018). A utilização integrada de levantamentos de campo, estações meteorológicas, sensores ambientais e observações orbitais permite acompanhar processos como o desmatamento, as queimadas, a expansão agropecuária, as transformações urbanas, a variabilidade da cobertura vegetal e as alterações na disponibilidade hídrica. Essas informações também contribuem para investigar mudanças na temperatura da superfície, caracterizar condições ambientais associadas a secas e inundações e identificar áreas potencialmente suscetíveis a movimentos de massa e outros processos geoambientais. Nesse sentido, as geotecnologias complementam os métodos convencionais de investigação, ampliando sua abrangência espacial e temporal e oferecendo subsídios à prevenção e à mitigação de danos associados a eventos extremos (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009; Jensen, 2009; Mulla, 2013).

Além do acompanhamento das condições ambientais observadas, a integração entre dados geoespaciais e modelos numéricos permite desenvolver análises prospectivas e construir cenários de transformação territorial. O cruzamento de projeções climáticas, especialmente de temperatura e precipitação, com informações sobre relevo, solos, cobertura e uso da terra, infraestrutura e distribuição populacional possibilita avaliar diferentes condições de perigo, exposição e vulnerabilidade. Essas abordagens contribuem para a identificação de áreas prioritárias para intervenções preventivas, a avaliação de alternativas de adaptação e a formulação de políticas públicas fundamentadas em evidências espaciais (IPCC, 2013).

As geotecnologias também desempenham papel relevante nas estratégias de mitigação das mudanças climáticas, especialmente no acompanhamento das alterações de uso e cobertura da terra e na produção de informações necessárias à estimativa de emissões e remoções de gases de efeito estufa. O conhecimento da localização, extensão e dinâmica temporal das atividades humanas permite caracterizar processos de conversão da vegetação, expansão agrícola, recuperação

de áreas degradadas e mudanças nos estoques de carbono. Essas informações subsidiam inventários de emissões, programas de conservação e restauração ecológica e instrumentos de planejamento territorial, como o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE). Embora os dados geoespaciais não sejam suficientes, isoladamente, para quantificar todos os fluxos de carbono e seus efeitos sobre os serviços ecossistêmicos, sua integração com levantamentos de campo, fatores de emissão e modelos biofísicos amplia a consistência das avaliações ambientais.

Dessa forma, as geotecnologias constituem um conjunto articulado de instrumentos científicos e tecnológicos que permite integrar observações, análises espaciais e modelagens na investigação das transformações ambientais. Sua contribuição para o enfrentamento das mudanças climáticas não se limita à representação cartográfica dos fenômenos, abrangendo a produção de conhecimento sobre a dinâmica dos sistemas naturais e antrópicos, a identificação de condições de vulnerabilidade e o suporte à definição de estratégias de mitigação, adaptação e gestão sustentável do território.

3 FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS, SENSORES E ÍNDICES ESPECTRAIS APLICADOS AO MONITORAMENTO AMBIENTAL

O monitoramento ambiental por sensoriamento remoto baseia-se na capacidade dos sistemas sensores de registrar a radiação eletromagnética refletida, emitida ou retroespalhada pelos diferentes componentes da superfície terrestre (Jensen, 2009). A seleção das plataformas orbitais e suborbitais, associada ao processamento dos dados e à estimativa de parâmetros biofísicos, constitui etapa fundamental para a caracterização das dinâmicas ambientais em diferentes escalas espaciais e temporais (Moreira, 2011; Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012).

A eficácia dos sistemas de sensoriamento remoto no diagnóstico e monitoramento ambiental está diretamente relacionada à combinação de suas resoluções espacial, espectral, temporal e radiométrica (Moreira, 2011). (i) A resolução espacial corresponde às dimensões do terreno representadas por cada pixel da imagem e, consequentemente, determina o nível de detalhamento e o tamanho mínimo dos objetos que podem ser individualizados na superfície terrestre

(Jensen, 2009). (ii) A resolução espectral, por sua vez, refere-se ao número e à largura das faixas do espectro eletromagnético discriminadas pelo sensor, possibilitando diferenciar alvos que apresentam comportamentos espectrais semelhantes (Florenzano, 2011). (iii) A resolução temporal expressa o intervalo necessário para que determinada plataforma imageie novamente uma mesma região geográfica, sendo particularmente importante para a identificação de mudanças sazonais e para o acompanhamento de desastres graduais ou repentinos (Mulla, 2013). (iv) Já a resolução radiométrica representa a capacidade do sensor de distinguir pequenas variações na intensidade da energia radiante recebida, sendo quantificada pelo número de bits utilizados para representar os níveis digitais da imagem (Moreira, 2011).

A diversidade de alvos e fenômenos ambientais torna necessária a integração de dados provenientes de diferentes tipos de sensores e plataformas de aquisição (Aplin, 2004). Entre os sistemas mais empregados no monitoramento ambiental destacam-se os sensores passivos, que registram a radiação eletromagnética proveniente dos alvos observados. Nas faixas do visível (RGB), do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), esses sensores detectam predominantemente a radiação solar refletida pela superfície terrestre, dependendo, portanto, das condições de iluminação. Por sua vez, os sensores que operam no infravermelho térmico (TIR) registram principalmente a radiação emitida pelos alvos em função de suas propriedades térmicas e emissividade, permitindo estimar parâmetros como a temperatura da superfície terrestre. A seleção dessas faixas espectrais depende das características dos fenômenos investigados e dos objetivos do monitoramento.

Séries temporais consolidadas, como as produzidas pelo programa Landsat (USGS/NASA), pela constelação Sentinel-2 (ESA), pelo programa CBERS (INPE/CAST) e pelo sensor MODIS (NASA), fornecem dados abertos fundamentais para o mapeamento contínuo do uso e da cobertura da terra, o monitoramento do desmatamento, como ocorre nos programas PRODES e DETER do INPE, e o acompanhamento do vigor da vegetação (Zhan *et al.*, 2000; Mulla, 2013). Em estudos que demandam maior detalhamento espacial, plataformas privadas como *PlanetScope* e *WorldView* possibilitam a obtenção de imagens de alta resolução.

Além dos sensores ópticos, os sistemas ativos de micro-ondas, particularmente os radares de abertura sintética (SAR), possuem elevada relevância para o monitoramento ambiental. Diferentemente dos sistemas passivos, esses sensores transmitem seus próprios pulsos de ondas eletromagnéticas e registram a energia retroespalhada pela superfície terrestre. Uma de suas principais vantagens é a possibilidade de operação independentemente das condições de iluminação solar e, em grande medida, da cobertura de nuvens. Dependendo do comprimento de onda empregado, como nas bandas C, L ou X, também podem apresentar diferentes capacidades de interação e penetração no dossel florestal. Dados SAR provenientes de missões como Sentinel-1 e RADARSAT, associados a técnicas de interferometria, como o InSAR, são amplamente utilizados na detecção de áreas inundadas, inclusive sob determinadas condições de cobertura vegetal, no monitoramento de deformações do terreno, na avaliação da umidade do solo e no acompanhamento de superfícies cobertas por gelo e neve (Devanthéry *et al.*, 2016; Clement; Kilsby; Moore, 2017).

Outro recurso relevante é o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), sistema ativo de sensoriamento remoto baseado na emissão de pulsos laser e na determinação das distâncias entre o sensor e os alvos a partir do tempo de propagação e retorno do sinal (Araujo, 2020). A aquisição de nuvens de pontos tridimensionais permite representar detalhadamente a estrutura vertical da superfície terrestre e produzir Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Superfície (MDS). Em aplicações florestais, os dados LiDAR possibilitam estimar características estruturais da vegetação, como altura das árvores, distribuição vertical do dossel e densidade da cobertura. Outros atributos, como diâmetro à altura do peito (DAP) e biomassa, podem ser estimados por meio de modelos estatísticos, relações alométricas ou procedimentos específicos de extração geométrica, dependendo da configuração do levantamento, da densidade da nuvem de pontos e da disponibilidade de dados de campo para calibração e validação (Kuzelka; Slavik; Surovy, 2020; Bueno *et al.*, 2024).

Em escalas locais, as aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), também denominadas drones, ampliaram as possibilidades de aquisição de dados ambientais. Equipadas com câmeras RGB, sensores multiespectrais, térmicos ou LiDAR, essas plataformas apresentam flexibilidade operacional e podem alcançar resolução

espacial centimétrica, sendo particularmente úteis em levantamentos detalhados e de áreas de difícil acesso (Primicerio *et al.*, 2012).

O nível de processamento exigido depende das características e do produto de sensoriamento remoto utilizado. Dados brutos podem demandar calibração e correções antes de seu emprego em análises quantitativas e modelagens ambientais, enquanto produtos previamente processados requerem a verificação das correções já incorporadas e de sua adequação ao objetivo do estudo (Crósta, 2002; Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012). Entre os procedimentos relevantes está a calibração radiométrica, que permite converter níveis digitais (ND) em grandezas radiométricas, como radiância espectral, por meio de coeficientes específicos do sensor disponibilizados nos metadados. Os valores registrados também podem variar em função da geometria de aquisição e das condições de iluminação (Chander; Markham; Helder, 2009; Silva *et al.*, 2016).

A correção atmosférica também desempenha papel central no tratamento das imagens, uma vez que a atmosfera interfere no sinal registrado pelos sensores por meio de processos de espalhamento, tanto molecular quanto provocado por aerossóis, e de absorção da radiação eletromagnética (Chavez, 1988). A conversão da radiância em reflectância aparente ou exoatmosférica permite minimizar variações relacionadas à distância entre a Terra e o Sol e à irradiância solar (Chander; Markham; Helder, 2009). Entretanto, para estimar adequadamente a reflectância da superfície, são empregados procedimentos específicos de correção atmosférica, entre os quais se destacam o *Dark Object Subtraction* (DOS), ou Subtração do Pixel Escuro, e os modelos de transferência radiativa baseados nas características do meio atmosférico (Chavez, 1988; Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2012). Esse tratamento é particularmente importante em análises multitemporais, pois aumenta a comparabilidade entre imagens adquiridas em diferentes datas.

O pré-processamento pode envolver correção geométrica, ortorretificação e georreferenciamento, conforme o nível de processamento dos dados. Esses procedimentos visam reduzir distorções espaciais relacionadas à geometria de aquisição, ao relevo e às características das plataformas, além de associar os pixels a um sistema de referência de coordenadas (Meneses; Almeida, 2012). A utilização de sistemas de coordenadas projetadas, como a projeção UTM vinculada ao

referencial geodésico SIRGAS2000, favorece a sobreposição espacial entre imagens e outras informações georreferenciadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

No caso específico das imagens de radar, o pré-processamento apresenta particularidades relacionadas às características físicas do sinal SAR. Entre os principais procedimentos estão a calibração radiométrica, utilizada para obtenção do coeficiente de retroespalhamento, frequentemente expresso em decibéis (dB), a filtragem do ruído *Speckle*, característico dos sistemas de iluminação coerente, e a correção de terreno (*terrain correction*), destinada a reduzir os deslocamentos e distorções decorrentes do relevo (Cechim, 2020).

Após o adequado processamento das imagens, diferentes índices espectrais e parâmetros biofísicos podem ser extraídos para avaliar as condições ambientais e suas respostas às variações climáticas. Os índices espectrais consistem em formulações matemáticas fundamentadas no contraste entre a reflectância das superfícies em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Esses índices permitem evidenciar propriedades relacionadas à vegetação, à umidade do solo e aos recursos hídricos, constituindo importantes indicadores de condições e alterações ambientais, cuja interpretação climática requer análises complementares (Karnieli *et al.*, 2010; Sishodia *et al.*, 2020).

Entre os índices mais utilizados destaca-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), proposto por Rouse (1974). O NDVI fundamenta-se no comportamento espectral característico da vegetação, particularmente na elevada absorção da radiação na faixa do vermelho (RED) pela clorofila durante a fotossíntese e no intenso espalhamento da radiação no infravermelho próximo (NIR) pela estrutura celular do mesofilo foliar. O índice é calculado pela expressão NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), apresentando valores que variam entre -1 e +1, cuja interpretação depende das características espectrais dos alvos observados.

De maneira geral, superfícies de água apresentam valores baixos ou negativos, enquanto solos expostos e áreas com vegetação esparsa tendem a registrar valores próximos de zero ou moderadamente positivos. Coberturas vegetais fotossinteticamente ativas geralmente apresentam valores positivos mais elevados, associados à maior absorção da radiação na faixa do vermelho e à elevada

reflectância no infravermelho próximo. Entretanto, esses intervalos não constituem limites universais de classificação, pois variam conforme o tipo de cobertura vegetal, as características do solo, as condições atmosféricas, a sazonalidade e as propriedades radiométricas dos sensores utilizados. A análise de séries temporais do NDVI permite acompanhar a dinâmica fenológica da vegetação, identificar alterações na cobertura vegetal e investigar respostas a condições de deficiência hídrica (Pereira Neto; Fernandes, 2016; Sishodia *et al.*, 2020; Wulder *et al.*, 2022).

Embora amplamente utilizado, o NDVI pode apresentar limitações em determinadas condições ambientais. Em áreas com vegetação esparsa, como ocorre em parcelas do bioma Caatinga e em ambientes sujeitos a processos de desertificação, a resposta espectral do solo pode interferir significativamente nos valores obtidos (Silva; Galvíncio, 2012). Para minimizar esse efeito, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil-Adjusted Vegetation Index* – SAVI) incorpora um fator de correção L à equação, reduzindo a influência da reflectância do substrato (Huete, 1988). Já o Índice de Vegetação Realçado (*Enhanced Vegetation Index* – EVI) utiliza, além das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, informações da banda do azul para reduzir influências atmosféricas e minimizar a interferência do solo. Por essa razão, o EVI apresenta vantagens em regiões de vegetação densa, especialmente em áreas florestais nas quais o NDVI pode apresentar saturação (Huete *et al.*, 2002).

A avaliação das condições hídricas pode recorrer a índices espectrais derivados de diferentes combinações de bandas. A denominação Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* – NDWI) é utilizada para formulações com finalidades distintas. O NDWI proposto por Gao (1996), expresso por (NIR − SWIR)/(NIR + SWIR), utiliza o contraste entre o infravermelho próximo e o infravermelho de ondas curtas para avaliar variações relacionadas ao conteúdo de água da vegetação. Já o NDWI de McFeeters (1996), calculado por (GREEN − NIR)/(GREEN + NIR), emprega as bandas do verde e do infravermelho próximo para realçar superfícies de água e auxiliar na delimitação de corpos hídricos. A interpretação de ambos depende das características espectrais dos alvos, dos sensores e das condições de aquisição, sendo necessária a seleção da formulação

compatível com o objetivo da análise (Gao, 1996; McFeeters, 1996; Francisco *et al.*, 2018).

A análise térmica complementa esses indicadores ao permitir estimar a Temperatura da Superfície Terrestre (*Land Surface Temperature* – LST) a partir de dados do infravermelho térmico, como aqueles disponíveis nos sensores TIRS do programa Landsat. A estimativa da LST depende de procedimentos de correção atmosférica e da consideração da emissividade superficial, permitindo investigar relações entre cobertura da terra, disponibilidade hídrica, vegetação e temperatura da superfície (Karnieli *et al.*, 2010; Garcia *et al.*, 2023). A interpretação conjunta de índices de vegetação e informações térmicas contribui para estudos de condições de seca e de ilhas de calor de superfície. Entre os indicadores empregados em monitoramento da saúde da vegetação destaca-se o *Vegetation Health Index* (VHI), que combina componentes normalizados de condição da vegetação e condição térmica, não correspondendo à simples associação entre NDVI e LST (NOAA, [s.d.]). A análise desses dados deve considerar também a influência das transformações locais da paisagem e da variabilidade meteorológica, sem atribuir automaticamente as alterações observadas ao aquecimento global (Souza, 2014; WMO, 2024).

4 MONITORAMENTO DA COBERTURA E USO DA TERRA (LULC) E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O mapeamento e a análise espaço-temporal do uso e da cobertura da terra (*Land Use and Land Cover* – LULC) constituem importantes aplicações das geotecnologias nos estudos ambientais e climáticos. A cobertura da terra corresponde às características biofísicas observáveis na superfície terrestre, como formações florestais, vegetação campestre, corpos hídricos e afloramentos rochosos, enquanto o uso da terra se refere às atividades humanas e às formas de utilização e manejo do território, incluindo agricultura, pecuária, silvicultura, mineração e urbanização. Embora relacionados, esses conceitos não devem ser confundidos com a categoria Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (*Land Use, Land-Use Change and Forestry* – LULUCF), empregada nos inventários de gases de efeito estufa para

contabilizar emissões e remoções associadas às atividades e transformações territoriais.

4.1 MUDANÇAS NO USO DA TERRA E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

No contexto das mudanças climáticas, as alterações no uso e na cobertura da terra constituem importantes fontes de emissões de gases de efeito estufa e influenciam os processos de armazenamento e remoção de carbono nos ecossistemas terrestres. No Brasil, o setor de mudança do uso da terra e florestas apresenta participação expressiva no perfil nacional de emissões, especialmente em decorrência da conversão de vegetação nativa e da degradação dos ecossistemas. Entretanto, sua contribuição relativa depende do período analisado, dos gases considerados e da metodologia empregada na contabilização das emissões brutas e líquidas (Dutra *et al.*, 2024).

A remoção da vegetação nativa, especialmente quando associada ao uso do fogo, modifica os estoques e fluxos de carbono, as propriedades biofísicas da superfície e os processos hidrológicos. A combustão da biomassa libera dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e outros compostos atmosféricos, enquanto a decomposição da matéria orgânica remanescente pode contribuir para emissões adicionais. A substituição da cobertura vegetal altera a capacidade de assimilação fotossintética e o armazenamento de carbono na biomassa e no solo, sem necessariamente interromper por completo a atividade fotossintética da área convertida. Além disso, as mudanças na estrutura da vegetação podem modificar o albedo, a emissividade, a temperatura da superfície e a evapotranspiração. Em regiões nas quais a reciclagem de umidade desempenha papel relevante na manutenção dos regimes pluviométricos, a redução da cobertura florestal também pode influenciar o transporte atmosférico de vapor d’água e a distribuição regional da precipitação. Dessa forma, técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento atuam como ferramentas relevantes para caracterizar a extensão e a dinâmica temporal dessas transformações, subsidiando inventários de emissões e estratégias de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+).

4.2 SISTEMAS E PLATAFORMAS DE MONITORAMENTO TERRITORIAL E AMBIENTAL NO BRASIL

O monitoramento sistemático das alterações da cobertura vegetal e do uso da terra constitui um componente relevante das políticas brasileiras de gestão e fiscalização ambiental. Nesse contexto, diferentes sistemas e plataformas institucionais produzem e disponibilizam dados geoespaciais, entre os quais se destacam as iniciativas coordenadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

4.2.1 Monitoramento Anual da Supressão de Vegetação Nativa (PRODES)

Iniciado em 1988, o PRODES monitora anualmente as taxas oficiais de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal e, mais recentemente, estendeu seus mapeamentos para todos os biomas. O sistema processa imagens orbitais de Média Resolução Espacial — historicamente baseando-se nas séries Landsat-5/TM e CBERS, e atualmente incorporando Landsat-8/OLI, CBERS-4 e IRS — identificando polígonos de supressão vegetal com área mínima mapeável de 6,25 hectares. Por sua alta consistência e rigor metodológico, os dados consolidados do PRODES são empregados como indicador oficial para acordos internacionais (como o Acordo de Paris e as Conferências das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas), certificações ambientais e repasses de recursos financeiros, como o Fundo Amazônia.

4.2.2 Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER)

Criado em 2004 para apoiar o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e órgãos ambientais estaduais, o DETER é um sistema de detecção e emissão de alertas de alterações na cobertura vegetal em tempo quase real. Inicialmente baseado em imagens MODIS, o sistema passou a incorporar produtos de sensores de maior detalhamento espacial, como WFI/CBERS e AWiFS/IRS, ampliando a identificação de alterações em áreas menores. Os critérios

de detecção e de divulgação dos polígonos variam conforme a geração e a finalidade dos produtos. Diferentemente do PRODES, cujo objetivo central é produzir estimativas anuais consolidadas, o DETER prioriza o apoio operacional à fiscalização, identificando indícios de corte raso, degradação florestal e outras alterações na cobertura vegetal (INPE, [s.d.]).

4.2.3 Plataforma TerraBrasilis e Infraestrutura de Dados

Os dados produzidos pelo PRODES e pelo DETER são organizados e disponibilizados publicamente por meio do portal TerraBrasilis, infraestrutura de análise e disseminação de informações geoespaciais. A plataforma oferece visualização, consulta e acesso a arquivos e serviços de dados, favorecendo a transparência, a rastreabilidade dos produtos e sua utilização por pesquisadores, gestores públicos e sociedade civil. A avaliação da efetividade de políticas de controle do desmatamento, entretanto, requer análises complementares que considerem fatores institucionais, econômicos e territoriais.

4.2.4 Plataforma TerraClass

O TerraClass é um sistema de monitoramento destinado a identificar e mapear os usos e as formas de cobertura da terra nas áreas em que a vegetação nativa foi anteriormente suprimida, conforme os registros do Prodes. Com base na análise de séries temporais de imagens de satélite, o sistema classifica essas áreas em categorias como vegetação secundária, agricultura, pastagem, silvicultura, mineração, áreas urbanizadas e corpos d’água. Seus dados permitem acompanhar as transformações da paisagem e fornecem subsídios ao ordenamento territorial, à produção agropecuária sustentável, à conservação da biodiversidade e à manutenção dos serviços ambientais (INPE, [s.d.]; ALMEIDA *et al.*, 2019–2023).

Estruturado em 2010, o TerraClass resulta da cooperação entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), instituições responsáveis por seu desenvolvimento metodológico e pela produção dos mapeamentos de uso e cobertura da terra. O INPE

contribui principalmente com sua experiência em sensoriamento remoto, processamento de imagens de satélite e monitoramento dos biomas, enquanto a Embrapa agrega conhecimentos relacionados às atividades agropecuárias e à dinâmica de ocupação do território. Os resultados são disponibilizados publicamente na forma de mapas, estatísticas e arquivos geoespaciais, permitindo sua utilização em pesquisas, políticas públicas e ações de planejamento e gestão ambiental (INPE, [s.d.]).

4.2.5 Plataforma Brasil MAIS

O Programa Brasil MAIS (Meio Ambiente Integrado e Seguro), coordenado pela Polícia Federal, constitui uma iniciativa de monitoramento territorial e inteligência geoespacial baseada no uso de sensoriamento remoto e imagens orbitais de alta resolução. No âmbito do programa, a RedeMAIS (rede de instituições públicas que fazem parte do programa) promove o compartilhamento de dados, tecnologias e metodologias entre instituições públicas aderentes, subsidiando atividades de segurança pública, inteligência, fiscalização e investigação, com destaque para o enfrentamento aos crimes ambientais e o acompanhamento de alterações territoriais. Segundo informações disponibilizadas na Plataforma do Programa Brasil MAIS, consultada em setembro de 2026, a infraestrutura contempla o imageamento diário de aproximadamente 8,5 milhões de km² do território, realizado por cerca de 130 satélites da Planet, e reúne 762 instituições cadastradas no Programa.

Entre os principais produtos disponibilizados estão as imagens diárias *PlanetScope*, obtidas pelas constelações *Dove* e *SuperDove*, capazes de realizar a revisita diária de todo o território nacional. Essas imagens possuem até oito bandas espectrais, resolução radiométrica de 12 bits e resolução espacial de 3 metros, sendo disponibilizadas por meio da Plataforma Web ou via API em até 24 horas após a coleta. A elevada resolução temporal permite acompanhar mudanças na superfície terrestre e selecionar imagens com menor cobertura de nuvens, favorecendo análises multitemporais e o apoio a operações de campo. A partir das imagens diárias também são produzidos mosaicos mensais de todo o território nacional, gerados por processos automatizados que selecionam as melhores cenas disponíveis. Esses mosaicos

apresentam resolução espacial de 4,77 metros e resolução radiométrica de 8 bits e podem ser acessados por WebServices e plugins para QGIS, em cores naturais (RGB), falsa cor (NIR) e diferentes índices espectrais.

A Plataforma Web do Programa Brasil MAIS constitui, portanto, um ambiente de acesso e utilização dessas geoinformações, permitindo integrar imagens, mosaicos, alertas de detecção de mudanças e outros recursos aos fluxos institucionais de análise espacial. Essa infraestrutura amplia a capacidade de identificação e acompanhamento de transformações territoriais, como supressão da vegetação, abertura de vias, movimentação do solo e alterações em edificações, contribuindo para a produção de conhecimento, o planejamento de ações de fiscalização e investigação e a tomada de decisão baseada em evidências geoespaciais. Cabe ressaltar que o acesso é destinado a servidores públicos de instituições federais, estaduais e municipais, condicionado à adesão da respectiva instituição ao Programa Brasil MAIS junto ao Ministério da Justiça e Segurança Pública.

4.3 MAPEAMENTO MULTITEMPORAL, COMPUTAÇÃO EM NUVEM E A INICIATIVA MAPBIOMAS

Embora os programas governamentais de monitoramento sejam relevantes para o acompanhamento de alterações ambientais e o apoio à fiscalização, a compreensão global da transição de paisagens e dos estoques de carbono exige abordagens multitemporais e classificações abrangentes de todas as formas de uso do solo (como agricultura, pastagem, florestas plantadas, corpos d'água e áreas urbanas).

Nesse cenário, destaca-se a rede MapBiomas, uma iniciativa colaborativa multi-institucional que reúne universidades, organizações não governamentais e empresas de tecnologia. O MapBiomas ampliou significativamente a capacidade de mapeamento do uso e da cobertura da terra no Brasil ao combinar três pilares fundamentais:

- Séries Temporais Longas: Mapeamento anual contínuo de todo o território brasileiro desde 1985 (com séries de mais de 40 anos), permitindo reconstituir a trajetória histórica de cada pixel da paisagem;

- Computação em Nuvem e Algoritmos de Aprendizado de Máquina: utilização do *Google Earth Engine* (GEE) para processar séries temporais de imagens Landsat, com resolução espacial de 30 m, que fundamentam o produto nacional de cobertura e uso da terra. A classificação combina procedimentos específicos por bioma e tema, incluindo algoritmos de aprendizado de máquina, como Random Forest (MapBiomas, 2026);

- Módulos Especializados e Alertas: Geração de mapas temáticos complementares, tais como os módulos de estoque de carbono no solo, dinâmica de superfícies de água, cicatrizes de queimadas e o MapBiomas Alerta, que valida alertas de desmatamento e disponibiliza relatórios técnicos e informações geoespaciais sobre eventos confirmados.

As séries temporais de uso e cobertura da terra (LULC) podem ser empregadas na construção de matrizes de transição e na parametrização de modelos de mudança do uso da terra. As projeções resultantes representam cenários condicionados aos pressupostos e às variáveis utilizados e, quando integradas a modelos climáticos, podem subsidiar avaliações dos efeitos de diferentes trajetórias de transformação territorial.

O acesso aos dados produzidos pelo MapBiomas é público, aberto e gratuito, seguindo princípios de ciência aberta e sendo permitido seu uso mediante a devida referência à fonte, sob licença CC BY 4.0. Por meio da Plataforma MapBiomas, os usuários podem consultar mapas e estatísticas, selecionar temas, territórios e períodos de interesse e realizar o download de diferentes produtos, incluindo mapas em formato GeoTIFF e dados estatísticos em formatos como CSV e Excel. O acesso aos dados básicos não é restrito a instituições públicas nem depende de adesão institucional, diferentemente de plataformas como o Programa Brasil MAIS.

Algumas funcionalidades específicas da plataforma, entretanto, requerem a criação de uma conta, como o recurso “Meus Mapas”, utilizado para reunir diferentes recortes territoriais e obter estatísticas agrupadas. Os conjuntos de dados também podem ser acessados por outros ambientes, incluindo o Google Earth Engine, que permite o processamento e a análise das coleções diretamente em nuvem. Nesse caso, é necessária uma conta na própria plataforma Google Earth Engine. Além disso, o MapBiomas disponibiliza seus produtos por meio de diferentes repositórios e ferramentas, ampliando as possibilidades de acesso, processamento e utilização das informações geoespaciais.

5 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO, EVENTOS EXTREMOS E RISCOS GEOAMBIENTAIS

A influência das mudanças climáticas sobre os extremos hidrometeorológicos manifesta-se de modo diferenciado entre regiões e tipos de evento, incluindo alterações observadas ou projetadas na frequência e na intensidade de precipitações extremas e episódios de seca (IPCC, 2021; WMO, 2024). Esses fenômenos impõem desafios à gestão dos recursos hídricos, à segurança alimentar, à infraestrutura e à proteção da população (MCTI, 2016). Nesse contexto, o uso integrado de geotecnologias, observações hidrometeorológicas e modelagem ambiental contribui para a caracterização de processos hidrológicos, o mapeamento de suscetibilidade e o desenvolvimento de estratégias de prevenção e redução de riscos geoambientais (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009; Louzeiro, 2019).

No contexto da análise e gestão de riscos geoambientais, é fundamental distinguir os conceitos de suscetibilidade, perigo, exposição, vulnerabilidade e risco, embora estejam diretamente relacionados. A suscetibilidade corresponde à propensão de determinada área à ocorrência de processos físicos, como inundações, enxurradas e movimentos de massa, em função de suas características ambientais e territoriais. O perigo refere-se à possibilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente danoso, considerando suas características, intensidade e probabilidade de ocorrência em determinado intervalo temporal. A exposição diz respeito à presença de pessoas, edificações, infraestruturas, atividades econômicas

e outros elementos em áreas sujeitas a esses fenômenos. A vulnerabilidade, por sua vez, compreende as condições físicas, sociais, econômicas e ambientais que influenciam a suscetibilidade dos elementos expostos a sofrer danos, bem como sua capacidade de resposta e recuperação. O risco resulta da interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade, expressando a possibilidade de consequências adversas, como perdas humanas, danos materiais, prejuízos econômicos e impactos ambientais. Dessa forma, o mapeamento da suscetibilidade, embora fundamental para a identificação de áreas potencialmente afetadas por processos geoambientais, não equivale, isoladamente, à avaliação do risco, que exige a consideração integrada dos demais componentes.

5.1 VARIABILIDADE PLUVIOMÉTRICA, ANOMALIAS CLIMÁTICAS E MODELAGEM HIDROCLIMÁTICA

O regime pluviométrico no Brasil apresenta acentuada heterogeneidade espacial e temporal, sendo regulado pela atuação de sistemas de circulação atmosférica e por teleconexões oceânico-atmosféricas, tais como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e o Dipolo do Atlântico (Alves *et al.*, 2016; Francisco *et al.*, 2018). A compreensão do comportamento dessas variáveis requer o tratamento quantitativo de séries temporais históricas registradas por estações pluviométricas e meteorológicas mantidas por órgãos oficiais, como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (MCTI, 2016).

5.1.1 O Índice de Anomalia de Chuva (IAC) e o Diagnóstico de Anomalias

Para identificar e quantificar períodos de anomalia hídrica (secos ou chuvosos), a literatura utiliza o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), originalmente proposto por Van Rooy (1965). O IAC quantifica o desvio do volume pluviométrico anual ou mensal em relação à média histórica da série temporal. A classificação do IAC varia de valores superiores a +4,0 (extremamente chuvoso) até valores inferiores a -4,0 (extremamente seco) (Francisco *et al.*, 2018). A representação espacial do IAC por meio de técnicas de geoprocessamento permite diagnosticar a extensão geográfica de secas extremas,

subsidiando o planejamento da gestão de reservatórios hídricos e a decretação de emergências na agricultura (Alves *et al.*, 2016).

5.1.2 Interpolação Espacial e Balanço Hídrico Climatológico

Como as estações de monitoramento são distribuídas pontualmente no território, o geoprocessamento emprega algoritmos de interpolação espacial para estimar continuamente variáveis como precipitação, temperatura do ar e evapotranspiração potencial (ETP) (Cecílio *et al.*, 2012). Dentre as técnicas determinísticas e geoestatísticas mais utilizadas em ambiente SIG, destacam-se:

- Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW): Método determinístico que atribui pesos aos pontos amostrais inversamente proporcionais à sua distância geométrica em relação ao local estimado;

- Krigagem Ordinária (OK): Método geoestatístico baseado na modelagem do variograma, considerado eficiente por fornecer estimativas não viesadas e mensurar a incerteza associada à espacialização dos dados, sendo que essa propriedade depende de pressupostos geoestatísticos.

A espacialização das variáveis climáticas permite estimar os componentes do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) em ambiente SIG, considerando a precipitação como entrada de água, a evapotranspiração como processo de saída e a capacidade de água disponível (CAD) como parâmetro associado ao armazenamento hídrico do solo. A partir dessas relações, podem ser estimados períodos e áreas com deficiência ou excedente hídrico, fornecendo subsídios para estudos agroclimáticos, planejamento dos recursos hídricos e avaliação de condições ambientais sob diferentes cenários climáticos (Cecílio *et al.*, 2012).

5.1.3 Índices de Extremos de Precipitação e Variabilidade Climática

A caracterização da variabilidade e dos extremos de precipitação pode ser realizada por meio de índices climáticos padronizados, como os desenvolvidos pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) (MCTI, 2016). Esses indicadores permitem analisar a intensidade, a duração e a frequência de determinados padrões pluviométricos, contribuindo para a identificação de tendências climáticas e para a avaliação de condições hidrometeorológicas potencialmente associadas a eventos extremos. Entre os índices empregados destacam-se:

- **Rx1day:** maior precipitação acumulada em um único dia durante determinado período de análise, expressa em milímetros (mm). Constitui um indicador da intensidade dos eventos pluviométricos diários e pode contribuir para estudos sobre enxurradas, inundações e movimentos de massa;

- **Rx5day:** maior precipitação acumulada em cinco dias consecutivos, expressa em milímetros (mm). Permite caracterizar episódios de precipitação persistente e investigar condições relacionadas ao aumento da umidade antecedente do solo e das vazões fluviais;

- **CWD (*Consecutive Wet Days*):** número máximo de dias consecutivos com precipitação diária igual ou superior a 1 mm, utilizado para caracterizar a persistência de períodos chuvosos.

A interpretação desses índices deve considerar as características hidroclimáticas regionais, a duração dos registros e a escala temporal dos processos investigados, uma vez que os valores de precipitação acumulada não determinam isoladamente a ocorrência de desastres hidrológicos ou geológicos (MCTI, 2016).

5.2 INUNDAÇÕES, ENXURRADAS E ALAGAMENTOS NO ESPAÇO URBANO E RURAL

Entre os processos hidrológicos potencialmente associados a danos à população, às atividades econômicas e à infraestrutura, destacam-se inundações, enxurradas e alagamentos. Embora possam ocorrer de forma simultânea em determinadas situações, apresentam mecanismos distintos e devem ser diferenciados nas análises ambientais e de risco (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009; Araujo, 2020):

- Inundação: Processo caracterizado pelo transbordamento gradual ou rápido das águas de um curso d'água para áreas adjacentes, como planícies de inundação e leitos maiores, em decorrência da elevação do nível da água, geralmente associada a precipitações prolongadas ou intensas e concentradas na bacia hidrográfica. Pode ocorrer tanto em áreas urbanas quanto rurais, sendo sua extensão e intensidade influenciadas pelas características do relevo, da rede de drenagem e pelas condições de uso e cobertura da terra;

- Enxurrada: Escoamento superficial concentrado, de elevada velocidade e grande capacidade de transporte de sedimentos e detritos, geralmente desencadeado por precipitações intensas em curtos períodos. Em áreas rurais, ocorre especialmente em vertentes íngremes e pequenas bacias hidrográficas com resposta hidrológica rápida, podendo intensificar processos erosivos e provocar danos às atividades agropecuárias. Em áreas urbanas, pode ser agravada pela impermeabilização do solo, pela concentração do escoamento em ruas e vias públicas e por alterações na drenagem natural, oferecendo riscos à população e à infraestrutura;

- Alagamento: Acúmulo temporário de água sobre a superfície terrestre, decorrente de precipitações que excedem a capacidade de infiltração, armazenamento ou escoamento local, sem necessariamente envolver o transbordamento de cursos d'água. Em áreas urbanas, está frequentemente associado à impermeabilização do solo, à insuficiência ou obstrução dos

sistemas de drenagem e à presença de depressões topográficas. Em áreas rurais, pode ocorrer em terrenos de baixa declividade, depressões naturais e áreas com solos saturados ou de baixa permeabilidade, ocasionando o acúmulo temporário de água em lavouras, pastagens e outras superfícies.

5.2.1 Bases Altimétricas de Apoio à Modelagem

A representação altimétrica da superfície terrestre constitui um dos principais insumos para a modelagem hidrológica e a análise de processos geoambientais, incluindo inundações, enxurradas e movimentos de massa. Os modelos digitais de elevação permitem derivar parâmetros geomorfométricos, como declividade, orientação de vertentes, curvaturas do terreno, áreas de contribuição e trajetórias preferenciais do escoamento superficial. Entretanto, a adequação dessas bases depende de sua resolução espacial, precisão altimétrica, origem dos dados e compatibilidade com a escala e os objetivos da investigação. No Brasil, diferentes produtos altimétricos de acesso público subsidiaram o desenvolvimento de estudos ambientais em escalas regionais e locais, entre os quais se destaca o TOPODATA, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o qual disponibiliza dados derivados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e variáveis geomorfométricas prontas para utilização em Sistemas de Informações Geográficas.

A missão foi realizada entre 11 e 22 de fevereiro de 2000, a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, utilizando interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR). Os dados utilizados pelo TOPODATA foram adquiridos na Banda C, com frequência de aproximadamente 5,3 GHz e comprimento de onda próximo a 6 cm. Por se tratar de um sensor de radar, a altitude registrada está relacionada à superfície que efetivamente interage com o sinal. Assim, os dados SRTM correspondem a um Modelo Digital de Superfície (MDS), e não estritamente a um Modelo Digital de Terreno (MDT). Em áreas vegetadas, a resposta pode ocorrer em diferentes níveis do dossel, dependendo de sua estrutura e propriedades, enquanto em áreas construídas tende a representar a superfície das edificações.

Os dados SRTM originalmente utilizados pelo TOPODATA apresentavam resolução de 3 segundos de arco, aproximadamente 90 m, e foram refinados para 1 segundo de arco, aproximadamente 30 m no Equador, por meio de interpolação por krigagem. Esse procedimento foi desenvolvido com o objetivo de favorecer as derivações geomorfométricas, não representando, portanto, aumento da qualidade posicional ou do conteúdo informativo dos dados originais. A partir do modelo refinado foram calculadas variáveis como declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e curvatura horizontal, além de produtos derivados relacionados às formas do terreno e ao delineamento de feições de drenagem e divisores de água. Os dados possuem cobertura integral do território brasileiro, estão em coordenadas geográficas WGS84 (EPSG:4326), apresentam altitudes ortométricas referenciadas ao modelo geoidal EGM96 e são considerados compatíveis com trabalhos na escala de 1:100.000.

O acesso aos dados do TOPODATA é público e gratuito, não sendo necessário cadastro ou adesão institucional para sua utilização. No portal de Dados Geoespaciais do INPE, os produtos são disponibilizados atualmente em formato *Cloud Optimized GeoTIFF* (COG), além de serviços e ferramentas que facilitam sua consulta e utilização. A estrutura histórica do projeto também organiza os dados em quadrículas compatíveis com a articulação cartográfica 1:250.000, correspondentes a folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude.

As informações disponibilizadas pelo TOPODATA podem ser utilizadas e redistribuídas mediante indicação da fonte (INPE), conforme as condições de uso estabelecidas pelo projeto. Dessa forma, o banco constitui uma importante fonte de dados topográficos e geomorfométricos para aplicações em geociências, planejamento territorial, gestão ambiental, agricultura, hidrologia e estudos geomorfológicos em escala nacional.

5.2.2 O Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) e a Delimitação de Áreas Inundáveis

O mapeamento de áreas potencialmente suscetíveis a inundações pode ser subsidiado pelo processamento de modelos digitais de elevação (MDE) e modelos

digitais de terreno (MDT) obtidos por técnicas orbitais, aerotransportadas ou levantamentos com aeronaves remotamente pilotadas (Araujo, 2020). Entre as abordagens topográficas empregadas destaca-se o HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), que expressa a diferença de altitude entre cada célula do terreno e a célula da rede de drenagem à qual está hidrologicamente conectada. O modelo permite identificar áreas com pequena altura relativa à drenagem e, mediante a definição de cotas de referência e procedimentos de calibração, apoiar estimativas simplificadas de extensão potencialmente inundável. Entretanto, o HAND não representa isoladamente a propagação hidrodinâmica das cheias, as velocidades do escoamento ou a influência de estruturas hidráulicas; aplicações destinadas à estimativa detalhada de inundações exigem dados adicionais, validação e, quando pertinente, modelos hidráulicos específicos (MCTI, 2016; Araujo, 2020).

5.2.3 Sensoriamento Remoto no Mapeamento da Superfície Hídrica

A utilização de índices espectrais, especialmente o NDWI proposto por McFeeters (1996), associada a técnicas de classificação de imagens multiespectrais provenientes de sensores como Landsat, Sentinel-2 e CBERS, possibilita identificar e acompanhar alterações na extensão superficial de corpos hídricos. Em períodos de estiagem, essas técnicas permitem investigar a retração de reservatórios, lagos e outras superfícies de água, enquanto, durante episódios de cheia, contribuem para a delimitação das áreas inundadas observáveis nas imagens. A precisão dos resultados depende da resolução espacial e temporal dos sensores, das condições atmosféricas, das características espectrais dos alvos e dos procedimentos de classificação e validação. Dessa forma, o sensoriamento remoto fornece informações relevantes para o acompanhamento de eventos hidrológicos e para o apoio às ações de gestão e resposta a desastres, embora não substitua as observações hidrométricas e as modelagens hidrológicas e hidráulicas (McFeeters, 1996; Francisco *et al.*, 2018).

5.3 MODELAGEM DE SUSCETIBILIDADE E RISCO A MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa, como escorregamentos, rastejos, quedas de blocos e corridas de detritos, constituem processos gravitacionais que participam da evolução do relevo e da dinâmica das vertentes (Guerra *et al.*, 2009; Listo *et al.*, 2022). Sua ocorrência pode resultar de condicionantes naturais e ser favorecida ou intensificada por intervenções humanas. Quando esses processos atingem pessoas, edificações ou infraestruturas expostas e vulneráveis, podem provocar desastres e perdas humanas, materiais e ambientais, independentemente de a ocupação territorial ser formal ou informal (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009; Listo *et al.*, 2022).

A estabilidade das encostas é influenciada por condicionantes geológico-geomorfológicos e geotécnicos, como declividade, orientação e geometria das vertentes, características dos materiais e condições de uso e cobertura da terra. Entre os fatores deflagradores destacam-se precipitações intensas ou persistentes, variações da pressão da água nos poros e intervenções antrópicas, como cortes de taludes, sobrecargas e vazamentos em redes de abastecimento ou esgotamento sanitário (Guerra *et al.*, 2009; Listo *et al.*, 2022).

5.3.1 Métodos Heurísticos e Análise Multicritério

As abordagens heurísticas fundamentam-se no conhecimento de especialistas para atribuir pesos e notas às variáveis ambientais condicionantes da instabilidade (Crepani *et al.*, 2001; Louzeiro, 2019):

- Álgebra de Mapas e Metodologia de Crepani: Amparada no princípio da ecodinâmica, integra planos de informação (PIs) de geologia, geomorfologia, pedologia, declividade e uso do solo, atribuindo graus de vulnerabilidade que variam de 1,0 (estável) a 3,0 (vulnerável) (Crepani *et al.*, 2001; Louzeiro, 2018; Louzeiro, 2019);

- Análise Multicritério, AHP e Metodologia do IBGE: A análise multicritério integra diferentes fatores condicionantes de movimentos de massa mediante a

definição de critérios e pesos adequados ao fenômeno e à escala investigados. Uma de suas abordagens é o Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* – AHP), que utiliza comparações pareadas entre critérios para estabelecer sua importância relativa (Listo *et al.*, 2022). O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), no estudo Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil: primeira aproximação, adotou metodologia distinta, baseada em álgebra de mapas e na avaliação de simulações de ponderação de variáveis de geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura e uso da terra e vegetação, declividade e pluviosidade, integradas em células de 1 km × 1 km. Na combinação selecionada, os pesos foram de 35% para declividade, 20% para geomorfologia, 15% para geologia, 15% para pedologia, 10% para cobertura e uso da terra e vegetação e 5% para pluviosidade. Os resultados foram classificados em cinco níveis de suscetibilidade pelo método de Quebras Naturais (Natural Breaks/Jenks). Esses pesos não constituem parâmetros universais. O produto do IBGE possui caráter informativo e abrangência nacional, compatível com a escala de 1:1.000.000, não sendo indicado para planejamento ou gestão ambiental e territorial local nem para projetos de engenharia, que demandam levantamentos e métodos de maior detalhamento (IBGE, 2019).

5.3.2 Modelos Matemáticos de Base Física (Determinísticos)

Para a avaliação quantitativa da estabilidade de encostas em escalas de maior detalhamento, o geoprocessamento possibilita a aplicação de modelos físico-matemáticos de natureza hidrológica e geotécnica, que consideram parâmetros relacionados às características do terreno, às propriedades dos materiais e às condições hidrológicas (Listo *et al.*, 2022). Esses modelos empregam diferentes abordagens para estimar as condições de estabilidade das vertentes, produzindo indicadores como o Fator de Segurança (FS), índices de estabilidade ou limiares críticos de precipitação, cujos resultados não são necessariamente equivalentes. Nos modelos baseados no Fator de Segurança, valores superiores a 1,0 indicam condições de estabilidade, enquanto valores iguais ou inferiores a 1,0 representam

situações de equilíbrio-limite ou instabilidade, conforme os pressupostos e parâmetros adotados na modelagem. Entre os principais modelos aplicados à análise da suscetibilidade a escorregamentos rasos, destacam-se:

- SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*): Proposto por Dietrich e Montgomery (1994), combina um modelo hidrológico de estado estacionário com a equação de estabilidade de encosta infinita. O modelo calcula o limiar de chuva constante necessário para induzir a ruptura por escorregamento raso (Guimarães *et al.*, 2003; Listo *et al.*, 2022);

- SINMAP (*Stability Index Mapping*): Desenvolvido por Pack *et al.* (1998), deriva dos conceitos do SHALSTAB, mas incorpora a incerteza dos parâmetros geotécnicos por meio de distribuições de probabilidade uniforme, gerando um Índice de Estabilidade graduado (Pechincha e Zaidan, 2013; Listo *et al.*, 2022);

- TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*): Criado por Baum *et al.* (2002), o TRIGRS modela a infiltração transiente unidimensional de água no solo durante episódios pluviométricos específicos. Ao simular a variação da poro-pressão hídrica em diferentes profundidades do solo ao longo do tempo chuvoso, o TRIGRS permite estimar a evolução temporal e espacial das condições de instabilidade e identificar áreas e períodos de maior suscetibilidade à deflagração de escorregamentos rasos durante tempestades extremas (Listo *et al.*, 2022).

5.3.3 Gestão Integrada de Riscos e Sistemas de Alerta Precoce

Os mapas de suscetibilidade, perigo e risco, produzidos por diferentes procedimentos de análise geoespacial, constituem subsídios à prevenção e à gestão de desastres. No Brasil, o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) desenvolve estudos e mapeamentos geológicos e geotécnicos, enquanto o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) acompanha condições ambientais e emite alertas para subsidiar ações de proteção e defesa civil (Tominaga;

Santoro; Amaral, 2009; CNMP, 2023). A integração de registros pluviométricos, previsões meteorológicas e hidrológicas, informações de suscetibilidade e dados sobre exposição e vulnerabilidade pode apoiar decisões preventivas e protocolos de resposta. A antecedência e a confiabilidade dos alertas dependem da disponibilidade de dados, dos métodos empregados e das condições específicas de cada evento (Louzeiro, 2019; CNMP, 2023).

6 CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE, ECOLOGIA DA PAISAGEM E DINÂMICA URBANA

As transformações impostas pelo avanço da fronteira agrícola, pelo crescimento urbano desordenado e pelas alterações nos regimes de temperatura e precipitação afetam profundamente os serviços ecossistêmicos e a resiliência das cidades (Metzger, 2001; WMO, 2024). O uso das geotecnologias possibilita integrar o estudo da estrutura espacial da vegetação natural à análise dos microclimas urbanos, fornecendo subsídios científicos para o planejamento sustentável do território, a restauração ecológica e a adaptação climática (Lang; Blaschke, 2009; Embrapa, 2014).

6.1 ECOLOGIA DA PAISAGEM, FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL E CONECTIVIDADE ECOLÓGICA

A conversão contínua de habitats naturais em matrizes antropizadas (como pastagens, lavouras e áreas construídas) resulta no avanço do processo de fragmentação florestal (Fahrig, 2003). A fragmentação reduz a área contínua dos remanescentes, multiplica a incidência do efeito de borda e pode reduzir a conectividade funcional e o fluxo gênico entre populações da fauna e da flora (Forman, 1995; Pirovani, 2010; Jackson; Fahrig, 2013).

6.1.1 Métricas de Paisagem e Estrutura dos Remanescentes

A Ecologia da Paisagem emprega ferramentas de geoprocessamento e softwares especializados (como o FRAGSTATS ou a extensão V-LATE) para quantificar a estrutura espacial e o arranjo dos fragmentos por meio de métricas ou índices de paisagem (Lang; Blaschke, 2009; Pirovani, 2010; Cunha *et al.*, 2015). Entre as principais métricas destacam-se:

- Área da Mancha (*Patch Area*) e Área do Núcleo (*Core Area*): a área da mancha representa a extensão total do fragmento ou unidade de cobertura, enquanto a área do núcleo corresponde à parcela remanescente após a exclusão de uma faixa de borda definida metodologicamente. A profundidade dessa faixa varia conforme as espécies, os processos ecológicos e as características da vegetação, não constituindo um valor universal (Cunha *et al.*, 2015);

- Índice de Forma (*Shape Index*): Avalia a complexidade do contorno da mancha. Fragmentos com formas mais circulares apresentam menor razão perímetro/área e são mais protegidos do efeito de borda do que fragmentos irregulares e recortados (Forman, 1995; Cunha *et al.*, 2015);

- Distância ao Vizinho Mais Próximo (*Euclidean Nearest-Neighbor Distance* — ENN): Quantifica o grau de isolamento espacial entre os remanescentes florestais da paisagem, orientando a priorização de intervenções de restauração (Pirovani, 2010).

A interpretação integrada das métricas de paisagem permite identificar fragmentos que, embora apresentem pequenas dimensões, podem atuar como elementos de conectividade funcional, inclusive como pontos intermediários de deslocamento de determinadas espécies (*stepping stones*). Essa contribuição depende das características da matriz, das distâncias entre remanescentes e da ecologia das espécies consideradas, não podendo ser inferida apenas a partir da área ou da forma do fragmento (Cunha *et al.*, 2015).

6.1.2 Corredores Ecológicos, Unidades de Conservação e Cadastro Ambiental Rural (CAR)

A manutenção da biodiversidade em biomas altamente fragmentados (como a Mata Atlântica e o Cerrado) exige o planejamento de corredores ecológicos — faixas funcionais de vegetação projetadas para reconectar fragmentos isolados e restabelecer o fluxo gênico e a dispersão da fauna (Louzada; Santos; Silva, 2015; Embrapa, 2014). O mapeamento desses corredores é realizado em ambiente SIG cruzando dados de aptidão do solo, declividade, malha hídrica e distância entre Unidades de Conservação (UCs) e suas respectivas zonas de amortecimento (Embrapa, 2014; Louzada; Santos; Silva, 2015).

A implementação da Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Lei nº 12.651/2012) também se beneficia da aplicação das geotecnologias, especialmente por meio do Cadastro Ambiental Rural (CAR), registro público eletrônico de abrangência nacional destinado à integração de informações ambientais dos imóveis rurais. O cadastro reúne dados geoespaciais autodeclarados referentes aos limites dos imóveis, às áreas de vegetação nativa, às Áreas de Preservação Permanente (APPs), às Reservas Legais (RLs) e a outros elementos de interesse ambiental. As APPs correspondem às áreas legalmente protegidas destinadas à preservação de funções ambientais, incluindo a proteção dos recursos hídricos, da estabilidade geológica, da biodiversidade e dos processos ecológicos. As Reservas Legais, por sua vez, compreendem parcelas dos imóveis rurais destinadas à conservação da vegetação nativa, observados os percentuais e critérios estabelecidos na legislação. A integração dessas informações em ambiente SIG permite subsidiar análises territoriais, identificar potenciais inconsistências cadastrais e apoiar atividades de monitoramento e planejamento ambiental. Entretanto, por sua natureza declaratória, as informações registradas no CAR estão sujeitas à análise e validação pelos órgãos ambientais competentes, não constituindo, isoladamente, comprovação da regularidade ambiental dos imóveis rurais (Embrapa, 2014).

6.2 CLIMA URBANO, ILHAS DE CALOR E VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL

A densificação das áreas construídas, a redução da cobertura vegetal, a predominância de superfícies impermeáveis e a geometria urbana podem alterar o balanço de energia, a ventilação e as condições térmicas locais, contribuindo para a formação e a intensificação de ilhas de calor urbanas (Souza, 2014).

6.2.1 Diagnóstico de Ilhas de Calor por Temperatura da Superfície (LST)

A análise da Temperatura da Superfície Terrestre (*Land Surface Temperature* – LST), estimada a partir de dados de sensoriamento remoto térmico, permite investigar a distribuição espacial das temperaturas superficiais em ambientes urbanos e suas relações com os diferentes padrões de uso e cobertura da terra. Estudos sobre clima urbano frequentemente identificam associações inversas entre índices de vegetação, como o NDVI, e a temperatura superficial, indicando que áreas com maior cobertura vegetal tendem a apresentar temperaturas inferiores às de superfícies predominantemente impermeabilizadas e densamente edificadas, embora essa relação varie conforme as características ambientais, a geometria urbana e as condições meteorológicas (Souza, 2014; Francisco *et al.*, 2018).

Nesse contexto, é importante distinguir as ilhas de calor de superfície, caracterizadas por contrastes espaciais na temperatura radiométrica dos materiais que compõem a paisagem, das ilhas de calor atmosféricas, definidas por diferenças na temperatura do ar entre áreas urbanas e seu entorno. Embora esses fenômenos estejam relacionados, não são equivalentes, de modo que a interpretação dos padrões térmicos obtidos por sensoriamento remoto deve considerar suas limitações para representar diretamente as condições de conforto térmico e exposição humana ao calor.

6.2.2 Infraestrutura Verde-Azul e Gestão de Águas Pluviais

Frente ao agravamento das ondas de calor e das tempestades severas provocadas pelas mudanças climáticas, o planejamento urbano adota o conceito de

Trama (ou Infraestrutura) Verde-Azul (Loge *et al.*, 2023). Trata-se da integração planejada entre a rede hídrica urbana (rios, lagoas, canais e bacias de retenção) e as áreas verdes (parques, praças e corredores ecológicos urbanos). O geoprocessamento atua no diagnóstico do nível de impermeabilização do solo por bairros e setores censitários, fornecendo subsídios para o dimensionamento de medidas adaptativas, tais como a criação de jardins de chuva, pavimentos permeáveis e parques lineares de amortecimento de cheias (Bandim; Galvíncio, 2021).

6.2.3 Monitoramento da Qualidade do Ar e Bacias Aéreas Metropolitanas

O monitoramento da qualidade do ar em regiões metropolitanas pode ser aprimorado pela integração de dados georreferenciados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Martins *et al.*, 2011). Em aglomerações urbanas, como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, a caracterização de bacias aéreas e de padrões de dispersão de poluentes considera aspectos topográficos, regimes de vento e condições de estabilidade e mistura atmosférica (Martins *et al.*, 2011). A integração espacial entre fontes emissoras, estações de monitoramento, dados meteorológicos e distribuição populacional permite analisar concentrações de poluentes, compará-las aos padrões nacionais estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 506/2024 e identificar áreas de exposição potencialmente elevada. Entretanto, a avaliação quantitativa da exposição humana requer informações adicionais sobre a variabilidade espaço-temporal das concentrações e a presença e mobilidade das populações (Martins *et al.*, 2011; Leandro, 2021).

7 TENDÊNCIAS FUTURAS E DESAFIOS TECNOLÓGICOS NO MONITORAMENTO AMBIENTAL

O avanço acelerado da tecnologia da informação, aliado ao aumento exponencial no volume e na diversidade de dados geoespaciais (*Big Data espacial*), está redefinindo as fronteiras do monitoramento ambiental e das geociências climáticas (Wang *et al.*, 2025). A integração entre a observação contínua da Terra, algoritmos de inteligência artificial e plataformas descentralizadas em nuvem abre

caminho para sistemas de monitoramento preditivos, automatizados e operáveis em tempo quase real (Assis *et al.*, 2019).

7.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, APRENDIZADO DE MÁQUINA E COMPUTAÇÃO EM NUVEM

A incorporação de técnicas de inteligência artificial (IA), aprendizado de máquina (*Machine Learning*) e aprendizado profundo (*Deep Learning*) tem ampliado as possibilidades de classificação, detecção de mudanças e extração de informações em dados de sensoriamento remoto. Algoritmos como *Random Forest* (RF), *Support Vector Machines* (SVM) e redes neurais convolucionais (*Convolutional Neural Networks* – CNNs) permitem modelar relações complexas entre variáveis espectrais, espaciais e temporais, apresentando resultados promissores em diferentes aplicações ambientais. Essas abordagens podem complementar ou superar o desempenho de métodos convencionais em determinadas condições, embora sua eficácia dependa da qualidade dos dados de treinamento, da representatividade das amostras, da escolha dos parâmetros e dos procedimentos de validação. Paralelamente, a análise de imagens baseada em objetos (*Object-Based Image Analysis* – OBIA) permite incorporar características geométricas, texturais e contextuais à classificação, podendo ser integrada a diferentes métodos estatísticos e computacionais (Blaschke, 2010; Cui *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2025).

O desenvolvimento de infraestruturas de computação em nuvem, como *Google Earth Engine* (GEE), *Amazon Web Services* (AWS) e *Copernicus Data Space Ecosystem*, ampliou a capacidade de armazenamento, acesso e processamento distribuído de grandes volumes de dados geoespaciais. Essas plataformas permitem executar operações sobre extensas séries temporais de imagens orbitais, reduzindo a necessidade de armazenamento e processamento local e favorecendo a realização de análises em diferentes escalas espaciais. Entretanto, o desempenho computacional depende do volume e da resolução dos dados, da complexidade dos algoritmos, da infraestrutura disponível e das restrições operacionais de cada ambiente. Sua aplicação tem contribuído para o desenvolvimento de estudos de cobertura e uso da terra, dinâmica da vegetação e monitoramento de recursos naturais

em escalas regionais e continentais (Assis *et al.*, 2019; MapBiomas, 2025; Wulder *et al.*, 2022; Bayma *et al.*, 2025).

7.2 INTERNET DAS COISAS (IOT), SENSORES PROXIMAIS E CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES

A integração entre observações orbitais e sistemas de Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) amplia as possibilidades de monitoramento ambiental em diferentes escalas espaciais e temporais (Pezzopane *et al.*, 2026). Redes de sensores terrestres e proximais conectados a sistemas de transmissão de dados permitem acompanhar continuamente variáveis como umidade do solo, temperatura do ar, níveis de corpos hídricos e parâmetros de qualidade da água. Quando submetidos a procedimentos adequados de calibração, controle de qualidade e representatividade amostral, esses registros podem subsidiar a validação de produtos de sensoriamento remoto, o ajuste de modelos ambientais e a integração de observações obtidas por diferentes sistemas de monitoramento (Viscarra-Rossel; Bouma, 2016; Pezzopane *et al.*, 2026).

A expansão das constelações de pequenos satélites, incluindo a PlanetScope, ampliou a frequência de observação da superfície terrestre. A revisita quase diária, associada à resolução espacial métrica, favorece a identificação e o acompanhamento de alterações no uso e na cobertura da terra, desde que haja imagens com qualidade adequada à análise. A aquisição frequente aumenta as oportunidades de obtenção de observações úteis, mas não elimina a limitação causada pela nebulosidade, especialmente em regiões tropicais. A disponibilidade efetiva de imagens depende ainda das condições de iluminação, da geometria de aquisição e dos procedimentos de processamento; sua integração com sensores de radar pode ampliar a continuidade temporal do monitoramento (Pezzopane *et al.*, 2026; PLANET, 2026).

7.3 DESAFIOS CIENTÍFICOS, OPERACIONAIS E INSTITUCIONAIS

Apesar dos avanços tecnológicos, o monitoramento ambiental por geotecnologias permanece condicionado a desafios científicos, operacionais e

institucionais. A integração de bases com diferentes resoluções, sistemas de referência e níveis de processamento pode gerar erros de alinhamento e interpretação, exigindo harmonização dos dados, controle de qualidade e validação independente dos produtos e modelos (Ladwig; Zocche; Pereira, 2019). As aplicações de inteligência artificial também dependem de dados de treinamento representativos, avaliação de incertezas e procedimentos de validação apropriados. A complexidade do processamento de grandes volumes de dados demanda formação multidisciplinar em geociências, ciência de dados e programação, além de infraestrutura computacional e capacidade institucional para utilização continuada dos resultados (Luz *et al.*, 2025; Embrapa, 2014). Por fim, custos de aquisição de dados e serviços, limitações de conectividade e dependência de soluções proprietárias podem restringir a adoção de determinadas tecnologias. Nesse contexto, políticas de dados abertos, interoperabilidade e formação técnica, associadas ao uso de ferramentas livres como o QGIS, contribuem para ampliar o acesso à geoinformação (Aguiar *et al.*, 2019; Araujo, 2020; Luz *et al.*, 2025).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As geotecnologias desempenham papel relevante na produção, integração e análise de informações ambientais, ampliando as possibilidades de investigação dos processos associados às mudanças climáticas. A combinação de sensoriamento remoto, geoprocessamento, Sistemas de Informação Geográfica e modelagem ambiental permite acompanhar transformações da paisagem, identificar padrões espaço-temporais e produzir informações que subsidiam o planejamento territorial, a gestão dos recursos naturais e a formulação de estratégias de mitigação e adaptação climática.

No contexto brasileiro, iniciativas como PRODES, DETER, TerraBrasilis, TerraClass, Brasil MAIS e MapBiomas demonstram a importância da produção sistemática de dados geoespaciais para o acompanhamento das mudanças no uso e na cobertura da terra, a identificação de alterações ambientais e o apoio à fiscalização e à gestão territorial. A disponibilidade dessas informações, associada a metodologias de análise espacial, também contribui para estudos sobre a dinâmica dos recursos

hídricos, a conservação da biodiversidade, os processos geoambientais e as transformações dos ambientes urbanos.

Entretanto, a utilização das geotecnologias requer atenção às limitações dos sistemas sensores, às diferenças de resolução espacial e temporal, às incertezas inerentes aos modelos e à representatividade dos dados empregados. A interpretação dos resultados deve considerar as especificidades dos processos ambientais e a necessidade de validação por observações independentes, evitando inferências causais ou estimativas de risco fundamentadas exclusivamente em indicadores espaciais. No contexto das mudanças climáticas, essa distinção é particularmente relevante, pois a identificação de alterações ambientais não implica, necessariamente, sua atribuição direta ao aquecimento global, sendo indispensável considerar a variabilidade natural, as transformações no uso da terra e outros fatores condicionantes.

Os avanços recentes relacionados à inteligência artificial, à computação em nuvem, às constelações de satélites e às redes de sensores ambientais ampliam as perspectivas de monitoramento sistemático e integração de dados em diferentes escalas. Contudo, sua incorporação à gestão ambiental depende não apenas da disponibilidade tecnológica, mas também da capacitação de profissionais, da interoperabilidade entre sistemas, da continuidade das séries de observação e do fortalecimento das instituições responsáveis pela produção e utilização dessas informações.

Dessa forma, a contribuição das geotecnologias para o enfrentamento das mudanças climáticas está associada à capacidade de transformar registros ambientais em conhecimento cientificamente fundamentado e aplicável aos processos de decisão. Sua utilização integrada com abordagens ecológicas, climáticas e socioeconômicas pode contribuir para o aperfeiçoamento das políticas públicas, a redução de riscos, a conservação dos ecossistemas e o desenvolvimento de estratégias territoriais de adaptação e mitigação.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. S.; AMARO, V. E.; ARAÚJO, P. V. N.; SANTOS, A. L. S. Geotecnologias de Baixo Custo Aplicadas à Avaliação de Risco por Inundação em Áreas Urbanas

Costeiras em Cenários de Mudanças Climáticas. **Anuário do Instituto de Geociências**. Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, pp. 267–290, 2019. Doi: 10.11137/2019_1_267_290.

ALLEN, M. R. *et al.* Technical Summary. In: **GLOBAL Warming of 1.5°C.** An IPCC Special Report. Geneva: IPCC, 2019. p. 27-46.

ALMEIDA, Cláudio Aparecido de; MESSIAS, Cassiano Gustavo; SOLER, Luciana de Souza; MAURANO, Luís Eduardo Pinheiro; CAMILOTTI, Vinícius Leite (ed.). **Programa de Monitoramento BiomasBR.** São José dos Campos: INPE, 2019–2023. Disponível em: http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP6W34M/4AH5NEL. Acesso em: 18 set. 2026.

ALVES, J. O. *et al.* Índice de anomalia de chuva para diferentes mesorregiões do Estado de Pernambuco. **Revista Pensar Acadêmico**, v. 14, n. 1, p. 37-47, 2016.

APLIN, P. Remote sensing: land cover. **Progress in Physical Geography**, v. 28, n. 2, p. 283-292, 2004.

ARAÚJO, Paulo Victor do Nascimento. **Geotecnologias de alta precisão no mapeamento de georisco a inundações frente às mudanças climáticas**. 2020. 158 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

ASSIS, L. F. F. G. *et al.* TerraBrasilis: A spatial data analytics infrastructure for large-scale thematic mapping. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 11, p. 513-530, 2019.

BANDIM, C. G. A.; GALVÍNCIO, J. D. Mapeamento das áreas de armazenamento de água em depressão, usando dados LIDAR: Estudo de caso avenida Caxangá. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 1, p. 58-67, 2021.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis.** U.S. Geological Survey Open-File Report 02-424. Denver: USGS, 2002.

BAYMA, G. *et al.* Estimating forage mass in Brazilian pasture-based livestock production systems through satellite and climate data integration. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 237, p. 110496, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110496.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 1, p. 2-16, 2010.

BUENO, J. O. A.; CRESTANA, S.; GUIMARAES, E. da S.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOURSCHEIDT, V.; BERNARDI, A. C. de C.. Imagens obtidas por drone para estimativas de diâmetro e altura de árvores em sistema integrado de produção agropecuária. In: BASSOI, L. H. *et al.* (ed.). **Agricultura de precisão e agricultura digital.** Brasília: Embrapa, 2024. p. 287-307.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment.** Oxford: Clarendon Press, 1986.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, K. R.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 478-488, 2012.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893-903, 2009.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, p. 459-479, 1988.

CECHIM JÚNIOR, Clóvis; PEREIRA, Gabriel Henrique de Almeida; DEPPE, Flávio; FRONZA, Giovani. Fundamentos e aplicações de radar no estudo de mapeamento de uso do solo e de áreas alagadas. In: LADWIG, Nilzo Ivo; ZOCCHE, Jairo José; PEREIRA, Jader Lima (org.). **Geoprocessamento na análise ambiental**. Criciúma: EDIUNESC, 2020. cap. 2, p. 69-110.

CLEMENT, M. A.; KILSBY, C. G.; MOORE, P. Multi-temporal synthetic aperture radar mapping using change detection. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. 1521-1536, 2017.

CNMP - Conselho Nacional do Ministério Público. **Desastres Socioambientais e Mudanças Climáticas: Manual Prático para Atuação do Ministério Público.** Brasília: CNMP, 2023.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 506, de 05 de julho de 2024.** Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Brasília: Diário Oficial da União, 2024.

CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial.** São José dos Campos: INPE, 2001.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Campinas: IG/UNICAMP, 2002.

CUI, W. *et al.* Application of a parallel spectral–spatial convolution neural network in object-oriented remote sensing land use classification. **Remote Sensing**, v. 10, n. 5, p. 721-738, 2018.

CUNHA, Andressa Martins da *et al.* Estrutura da paisagem florestal no entorno do pólo de educação ambiental da mata atlântica/IFES-campus de Alegre. In: SANTOS, Alexandre Rosa dos *et al.* (org.). **Geotecnologias & Análise Ambiental: Aplicações Práticas**. Alegre: CAUFES, 2015. cap. 3, p. 50-68.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001.

DEVANTHÉRY, N. *et al.* Deformation monitoring using persistent scatterer interferometry and Sentinel-1 SAR data. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1121-1126, 2016.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.

DUTRA, D. J.; SILVEIRA, M. V. F.; MATAVELI, G.; FERRO, P. D.; MAGALHÃES, D. S.; MEDEIROS, T. P.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. Challenges for reducing carbon emissions from Land-Use and Land Cover Change in Brazil. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 22, n. 3, p. 213–218, 2024. DOI: 10.1016/j.pecon.2024.04.004.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Geotecnologias e Geoinformação.** Coleção 500 Perguntas e 500 Respostas. Brasília: Embrapa, 2014.

FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 34, p. 487-515, 2003.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FORMAN, R. T. T. **Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions.** Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

FRANCISCO, P. R. M. *et al.* **Geotecnologias aplicada à estudos ambientais.** Campina Grande: CTRN/UFCG, 2018.

GAO, B. C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R.; REDAELLI, V.; LUZI, F.; LAURENTI, N.; MENEGAZZO, L. P.; GRUDZINSKI, C. E.; SANTOS JUNIOR, P. C.; BARBOSA, A. V. C. Use of infrared thermography from a crewed aerial vehicle for remote sensing of tropical pasture areas with different levels of afforestation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 213, p. 1-11, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108198.

GUERRA, A. J. T. *et al.* Criação de um sistema de previsão e alerta de riscos a deslizamentos e enchentes no bairro Quitandinha, Petrópolis-RJ. In: Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul, 2., 2009, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2009. p. 785-824.

GUIMARÃES, R. F. *et al.* Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos Shallow Stability. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 133-150, 2003.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUETE, A. R. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil: primeira aproximação.** Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. São José dos Campos: INPE, [s.d.]. Disponível em: https://data.inpe.br/dados/topodata/. Acesso em: 17 set. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). TerraClass: monitoramento sistêmico de uso e cobertura da terra. São José dos Campos: INPE, [s.d.]. Disponível em: https://data.inpe.br/biomasbr/terraclass-monitoramento-sistemico-de-uso-e-cobertura-da-terra/. Acesso em: 18 set. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). BiomasBR: Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros. São José dos Campos: INPE, [s.d.]. Disponível em: https://data.inpe.br/biomasbr/. Acesso em: 18 set. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). DETER: detecção de desmatamento em tempo quase real. São José dos Campos: INPE, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/inpe/pt-br/area-conhecimento/unidade-amazonia/projetos-e-pesquisas/deter/deter. Acesso em: 13 out. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Prodes para todo o Brasil está disponível na Sala de Situação do TerraBrasilis. São José dos Campos: INPE, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/prodes-para-todo-o-brasil-agora-na-sala-de-situacao-do-terrabrasilis/. Acesso em: 13 out. 2026.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report.** AR6. Geneva: IPCC, 2023.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming of 1.5°C.** Geneva: IPCC, 2018.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).** Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

JACKSON, H. B.; FAHRIG, L. Habitat loss and fragmentation. In: **Encyclopedia of Biodiversity**, 3. ed, p. 546-555, Academic Press, 2013.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KARNIELI, A. *et al.* Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. **Journal of Climate**, v. 23, n. 3, p. 618-633, 2010.

KUZELKA, K.; SLAVIK, M.; SUROVY, P. Very high density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree stem detection and direct diameter measurement. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, p. 1-20, 2020.

LADWIG, N. I.; ZOCCHE, J. J.; PEREIRA, J. L. (org.). **Geoprocessamento na análise ambiental**. Criciúma: UNESC, 2019.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

LEANDRO, Diuliana. (org.) **Geotecnologias Aplicadas às Ciências Ambientais**. Pelotas: UFPel, 2021.

LISTO, F. L. R. *et al.* Movimentos de massa: estado da arte, escalas de abordagem, ensaios de campo e laboratório e diferentes modelos de previsão. In: CARVALHO JÚNIOR, O. A.. *et al.* (org.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira.** Brasília: UNB, 2022. cap. 20, p. 560-592.

LOGE, P. L.; FONSECA, E. L. D.; SILVEIRA, A. L. L. D. Análise de fragmentação da paisagem no contexto conceitual de uma trama verde-azul em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 16, n. 1, p. 279-290, 2023.

LOUZADA, Franciane Lousada Rubini de Oliveira; SANTOS, Alexandre Rosa dos; SILVA, Aderbal Gomes da. Diagnóstico da aceitação dos proprietários rurais quanto a implantação de corredores ecológicos entre dois parques estaduais no ES utilizando geotecnologia. In: SANTOS, Alexandre Rosa dos *et al.* (org.). **Geotecnologias & Análise Ambiental: Aplicações Práticas**. Alegre: CAUFES, 2015. cap. 6, p. 94-101.

LOUZEIRO, A. S. **Vulnerabilidade e risco de movimento de massa no município de São Luís - MA (Brasil).** Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

LOUZEIRO, Andreza dos Santos; SALES, Caroline Barros de; MENDES, Débora Leyse Medeiros; LIMA, Pedro Henrique Godeiro. Risco de movimento de massa:

conceitos, metodologias e aplicações. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v. 21, n. 2, p. 1234-1253, 2019.

LUZ, Ludmilla de Santana *et al.* O Geoprocessamento na Educação, produção científica e ensino das Ciências Ambientais no Brasil: aplicações e contribuições. **Revista Práxis**, v. 17, n. 31, p. 1-22, 2025.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil: Coleções de Mapas de LULC.** São Paulo: MapBiomas, 2025.

MAPBIOMAS. Cobertura e uso da terra: Cobertura 30m, Coleção 11. São Paulo: MapBiomas, 2026. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/iniciativas-e-produtos/cobertura-e-uso-da-terra/cobertura-30m/cobertura/. Acesso em: 13 out. 2026.

MARTINS, E. M. *et al.* Utilização de Sistema de Informação Geográfica como ferramenta para gestão do monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 385-392, 2011.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil.** Brasília: MCTI, 2016.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Brasília: UnB, 2012.

METZGER, J. P. O que é ecologia da paisagem? **Biota Neotropica, v.** 1, n. 1, p. 1-9, 2001.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** 4. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2011.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Global Vegetation Health Products: background and explanation. Washington, DC: NOAA, [s.d.]. Disponível em: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/VH-Syst_10ap30.php. Acesso em: 13 out. 2026.

PEREIRA NETO, M. C. P.; FERNANDES, E. Instabilidade emergente e aspectos de degradação ambiental da bacia hidrográfica do rio Seridó (RN/PB – Brasil). **Revista de Geografia**, v. 33, n. 1, p. 84-97, 2016.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: **INTERNATIONAL CONGRESS OF IAEG, 8.**, 1998, Vancouver. Proceedings... Vancouver: A.A. Balkema, 1998. p. 1157-1165.

PECHINCHA, M. G. H.; ZAIDAN, R. T. Probabilidade à ocorrência de escorregamentos na bacia do Córrego Matirumbide, Juiz de Fora, MG, a partir do modelo SINMAP. **Revista de Geografia**, v. 3, n. 1, p. 1-18, 2013.

PEZZOPANE, J. R. M. *et al.* Geotecnologias. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Cultivando o Futuro**. São Carlos: Cubo Multimídia/Embrapa, 2026. cap. 15, p. 287-307.

PIROVANI, D. B. **Análise da estrutura da paisagem e conectividade de fragmentos florestais na Bacia do Rio Itapemirim - ES.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2010.

PLANET. PlanetScope: imagery documentation. San Francisco: Planet, 2026. Disponível em: https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope/. Acesso em: 13 out. 2026.

PLATAFORMA BRASIL MAIS. RedeMAIS. **Programa Brasil MAIS: Meio Ambiente Integrado e Seguro.** Dados e informações institucionais consultados em setembro de 2026. Disponível em: https://plataforma.redemaisbr.com.br/#/. Acesso em: 17 set. 2026.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PRIMICERIO, J. *et al.* A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 517-523, 2012.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar.** Juiz de Fora: Ed. do Autor, 2000.

ROSA, R. **Introdução ao Geoprocessamento.** Uberlândia: Instituto de Geografia, Laboratório de Geoprocessamento, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

ROUSE, J. W. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.** Texas: Remote Sensing Center, Texas A&M University, 1974.

SILVA, B. B. *et al.* Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016.

SILVA, L. G.; GALVÍNCIO, J. D. Análise comparativa da variação nos índices NDVI e SAVI no Sítio PELD – 22, em Petrolina – PE, na primeira década do século XXI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 6, p. 1446-1456, 2012.

SISHODIA, R. P. *et al.* Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 19, p. 3136-3158, 2020.

SOUZA FILHO, C. R. S. F.; CRÓSTA, A. P. C. Geotecnologias Aplicadas à Geologia. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 33, n. 2, p. 1-4, 2003

SOUZA, J. F. **Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa – PB.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). **Desastres Naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

VAN ROOY, M. P. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notos**, v. 14, p. 43-48, 1965.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; BOUMA, J. Soil sensing: a new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems**, v. 148, p. 71-74, 2016.

WANG, X. *et al.* Remote sensing revolutionizing agriculture: Toward a new frontier. **Future Generation Computer Systems**, v. 166, p. 1-17, 2025.

WMO - World Meteorological Organization. **State of the Global Climate 2023.** Geneva: WMO, 2024.

WULDER, M. A. *et al.* Fifty years of Landsat science and applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 280, p. 113217, 2022.

ZAIDAN, R. T. A evolução e a integração do usuário com as ferramentas de Geoprocessamento. **Revista de Geografia**, v. 34, n. 2, p. 195-210, 2017.

ZHAN, X. *et al.* The 250 m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 6-7, p. 1433-1460, 2000.

MITIGAÇÃO, ADAPTAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO GEOSSISTÊMICA: JUSTIÇA CLIMÁTICA, SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA E O PLANEJAMENTO ADAPTATIVO

Larissa Warnavin – Centro Universitário Internacional Uninter; NAILA Tecnologia Ambiental[1]
Renata Adriana Garbossa Silva – Centro Universitário Internacional Uninter; CREA-PR[2]
Nayana Machado – PNUD/ONU; NAILA Tecnología Ambiental[3]
Anne Zugman – Selva/RPPN Encontro das Águas; Mater Natura Instituto de Estudos Ambientais[4]

1 INTRODUÇÃO

O enfrentamento da crise climática constitui um dos desafios mais complexos e urgentes do século XXI, demandando respostas integradas, robustas e alicerçadas em governança multinível por parte de todos os atores (Syrkis *et al.*, 2024; Martins; Ferreira, 2012; Corrêa, 2024; Lima *et al.*, 2025). A inércia do sistema climático global exige medidas urgentes de mitigação e adaptação, sendo que a espera por soluções pode tornar mais difícil e dispendiosa a gestão dos impactos futuros (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; Obermaier; Rosa, 2013; Corrêa, 2024).

As mudanças climáticas provocam fortes impactos no Brasil e no planeta como um todo, sendo urgente entender melhor como são afetados os ecossistemas, a

[1]Bacharela, licenciada mestra e doutora em geografia – larissa.w@uninter.com
[2]Bacharela, licenciada em geografia, mestra em geologia e doutorado em geografia – renata.g@uninter.com
[3]Mestrado e graduação em engenharia ambiental – nayana.machado@undp.org
[4]Bacharela em Ciências Biológicas, especialização em Conservação da Natureza e Educação Ambiental – contato@portaldaselva.com

economia, a infraestrutura, as cadeias produtivas, a biodiversidade e a saúde pública, fortalecendo a resiliência socioambiental (Attias *et al.*, 2021). O aquecimento global tem se acelerado, com o período de 2011 a 2020 registrando um aumento de 1,1 °C em comparação com a era pré-industrial (1850-1900), e os modelos climáticos demonstram que essa elevação está diretamente vinculada às atividades humanas. Os impactos observados no Brasil incluem secas severas, ondas de calor, tempestades e enxurradas inéditas em diversas regiões, com profundos reflexos socioeconômicos (Syrkis *et al.*, 2024).

Na perspectiva das Geociências, a análise das alterações climáticas requer uma abordagem integrada, focada na inter-relação entre os processos naturais e a sociedade, fornecida pela Teoria dos Geossistemas (TGS). O geossistema é a unidade de estudo da Geoecologia de Paisagens e serve para analisar a estrutura, dinâmica e evolução do ambiente, onde a ação humana atua como fator de transformação da paisagem. O aquecimento global opera como um modificador de risco, sendo o risco a intersecção entre a ameaça (eventos extremos), a exposição (população e infraestrutura expostas) e a vulnerabilidade (propensão socioespacial a ser afetado). A vulnerabilidade brasileira é acentuada por problemas estruturais históricos, como o crescimento urbano desordenado e a desigualdade socioespacial.

Neste contexto, o presente capítulo aborda as estratégias e ferramentas essenciais para construir a resiliência em geossistemas críticos e promover uma Transição Justa:

A Mitigação foca na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). O Brasil, como um dos países com maior área de floresta tropical, tem um papel central nessa agenda e depende do uso de Inventários de GEE para contabilidade e planejamento.

A Adaptação busca reduzir a vulnerabilidade dos sistemas humanos e naturais, por meio de estratégias como as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), incluindo a Adaptação Baseada em Ecossistemas (AbE), que utilizam os serviços ecossistêmicos para aumentar a resiliência.

A Justiça Climática serve como eixo norteador, exigindo que a resposta à crise seja sensível às particularidades de cada comunidade, incluindo os recortes de classe, raça, gênero e povos e comunidades tradicionais.

O Planejamento Adaptativo e a Gestão de Riscos dependem do fortalecimento dos Sistemas de Alerta Precoce para mitigar os riscos de desastres hidrológicos e climáticos, que se tornam mais frequentes e intensos.

Este capítulo objetiva, portanto, orientar a ação e a tomada de decisão para que o Brasil avance de forma consistente rumo a um desenvolvimento territorial resiliente, seguro, justo e sustentável.

2 CONCEITOS GEOSSISTÊMICOS E A URGÊNCIA DA JUSTIÇA CLIMÁTICA

A Teoria dos Geossistemas (TGS) é o arcabouço conceitual central para a análise ambiental e territorial na perspectiva das Geociências, buscando um entendimento integrado das relações entre os componentes da natureza (atmosfera, hidrosfera, litosfera, biosfera) com a sociedade humana (Sochava, 1978; Cavalcanti; Corrêa, 2016; Neves *et al.*, 2014). O geossistema é a unidade de estudo da Geoecologia de Paisagens, aplicando-se a unidades espaciais que podem variar em dimensão, desde a fácies físico-geográfica elementar até o envelope geográfico planetário (Sochava, 1978).

A análise geossistêmica estuda a estrutura (o arranjo espacial dos elementos), a dinâmica (as trocas de matéria e energia no curto prazo, ou regimes naturais) e a evolução das paisagens (Sochava, 1978; Neves *et al.*, 2014; Mateo Rodríguez, Silva; Cavalcanti, 2022). A TGS reconhece que a ação humana integra a estrutura dos geossistemas, atuando como um fator decisivo de alteração e transformação da paisagem (Sochava, 1978; Cavalcanti, 2013). Os elementos estruturais de um geossistema dividem-se em invariantes (características de mudança lenta, como a geomorfologia e o arcabouço geológico) e variáveis de estado (elementos de mudança rápida, como a pedogênese e a sucessão vegetal) (Cavalcanti, 2013; Cavalcanti *et al.*, 2022).

O planejamento da adaptação exige a gestão rigorosa do risco climático. O risco é determinado pela intersecção de três fatores: ameaça (eventos climáticos extremos), exposição (infraestrutura e pessoas expostas) e vulnerabilidade (propensão a ser afetado adversamente). A vulnerabilidade expressa o grau de suscetibilidade de uma região, grupo, atividade ou recurso natural a eventos

climáticos, como secas, cheias e picos de temperatura (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; Brasil, 2016).

O conhecimento das vulnerabilidades — sociais, econômicas e ambientais — é indispensável para elevar a qualidade das políticas públicas de adaptação (Mendes, Conceição; Muniz, 2015). O Brasil apresenta elevada vulnerabilidade à variabilidade climática devido às suas dimensões e assimetrias regionais (Brasil, 2016). Os geocientistas vêm se organizando para construir uma Base Nacional de Geoindicadores e uma Rede Brasileira de Geoindicadores para monitorar processos geológicos e hidrológicos que impactam os ecossistemas em curtos períodos de tempo, subsidiando a adaptação e mitigação, como o caso do Serviço Geológico do Brasil (SGB) com o Programa Geologia do Brasil que pode auxiliar na elaboração de políticas públicas e no mapeamento sistemático de áreas de risco geológico.

2.1 JUSTIÇA CLIMÁTICA E INIQUIDADE SOCIOESPACIAL: O AGRAVAMENTO DA VULNERABILIDADE

A Justiça Climática é o princípio fundamental que deve nortear a Estratégia Nacional de Adaptação e o Plano Clima, orientando uma resposta abrangente e sensível às particularidades de cada comunidade e setor (Brasil, 2016; Brasil, 2024f). As mudanças climáticas não são apenas um problema ambiental isolado; suas causas estão vinculadas aos modelos históricos de desenvolvimento e consumo, e seus impactos são sentidos de forma profundamente desigual, penalizando países e categorias sociais vulnerabilizadas e acirrando as assimetrias existentes (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; Pörtner *et al.*, 2022). O Brasil, por suas marcantes disparidades socioeconômicas, encontra na pobreza e na segregação territorial um de seus principais fatores de sensibilidade climática (Brasil, 2016; Pörtner *et al.*, 2022).

A vulnerabilidade das populações relaciona-se estruturalmente à exclusão social, à falta de acesso a serviços públicos básicos (como saneamento) e a um padrão de urbanização precário (Brasil, 2016). No ambiente urbano, o crescimento desordenado resultou na ocupação de áreas de elevada fragilidade geomorfológica, como encostas íngremes e margens de rios, aumentando a exposição e o risco socioambiental (Brasil, 2016). A aplicação do princípio da Justiça Climática exige a

incorporação da interseccionalidade — uma abordagem analítica que examina como múltiplos eixos de opressão e vulnerabilidade (gênero, raça, etnia, classe) se cruzam para potencializar o risco, orientando a priorização de investimentos e a garantia de territórios seguros e habitáveis (Thomas *et al.*, 2019; Mach *et al.*, 2024; Brasil, 2024f). O Plano Nacional de Adaptação (PNA) destaca que grupos vulnerabilizados, como populações indígenas, quilombolas, ribeirinhos e populações em extrema pobreza, devem ser atendidos de forma multissetorial, priorizando abordagens sensíveis ao gênero, raça e etnia (Brasil, 2016; Pörtner *et al.*, 2022).

A Transição Justa é essencial para guiar as políticas de mitigação e adaptação, garantindo que o processo de descarbonização ocorra com inclusão social, geração de empregos verdes e respeito inegociável aos direitos territoriais (ILO, 2024; Brasil, 2024f). Essa abordagem requer a maximização dos cobenefícios e a avaliação cuidadosa dos riscos de antagonismo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; Corrêa, 2024). A mitigação da desigualdade social constitui o motor principal para a redução das vulnerabilidades existentes (Brasil, 2016; Torres *et al.*, 2021). Ações de adaptação devem ser integradas aos esforços de superação da pobreza extrema por meio da reestruturação das redes de segurança social e transferências de renda adaptativas (Brasil, 2016; IPCC, 2023; Brasil, 2024f).

O conhecimento e as práticas ancestrais dos povos indígenas e comunidades tradicionais são cruciais para a conservação da biodiversidade, para a contenção do desmatamento e para a manutenção dos estoques de carbono florestal, servindo de base para estratégias de adaptação custo-efetivas e sustentáveis (Brasil, 2016; Setti, 2021). Esses povos, por manterem estilos de vida fundados no manejo sustentável dos recursos naturais, enfrentam elevada exposição aos impactos climáticos, que afetam precocemente suas culturas e meios de subsistência (Brasil, 2016; Corrêa, 2024). O fortalecimento de suas capacidades adaptativas vincula-se à salvaguarda dos direitos humanos e à implementação de políticas estruturantes, como a Política Nacional de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas (PNGATI, Decreto nº 7.747/2012) (Brasil, 2012a; 2016). Em suma, a regularização fundiária de territórios tradicionalmente ocupados é uma ação de altíssimo impacto para a conservação, a resiliência e a justiça socioambiental (Brasil, 2016; 2024g).

2.2 A DUALIDADE DA AÇÃO CLIMÁTICA: MITIGAÇÃO, ADAPTAÇÃO E A BUSCA POR CO-BENEFÍCIOS

A resposta global à emergência climática exige a combinação articulada de dois eixos de ação complementares: a Mitigação e a Adaptação (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; Brasil, 2016). A mitigação consiste em intervenções humanas destinadas a reduzir as fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) ou aumentar a capacidade dos sumidouros (IPCC, 2022b; Corrêa, 2024; Brasil, 2024e). A adaptação, por sua vez, é o processo de ajuste dos sistemas humanos e naturais a estímulos climáticos reais ou esperados, moderando danos e aproveitando oportunidades benéficas (Mendes, Conceição; Muniz, 2015). A adaptação é indispensável porque, mesmo sob cenários ambiciosos de mitigação, os impactos decorrentes das emissões históricas continuarão a se manifestar nas próximas décadas; por outro lado, mudanças climáticas não mitigadas ultrapassarão os limites da capacidade adaptativa dos ecossistemas e das sociedades (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; Obermaier; Rosa, 2013; Bapna *et al.*, 2019).

É fundamental que as políticas públicas priorizem ações que gerem cobenefícios — isto é, impactos positivos simultâneos em múltiplas dimensões socioambientais (Corrêa, 2024; Brasil, 2024f). Por exemplo, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e a Restauração Ecológica promovem sinergias entre mitigação (sequestro de carbono), adaptação (controle de erosão e regulação hídrica), conservação da biodiversidade e segurança alimentar (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; Brasil, 2024f). Da mesma forma, a transição para sistemas alimentares sustentáveis e a promoção da mobilidade ativa nas cidades reduzem as emissões de GEE ao mesmo tempo em que promovem a saúde pública e a qualidade de vida (Corrêa, 2024; Brasil, 2024f).

Entretanto, a busca por cobenefícios não elimina a possibilidade de conflitos e *trade-offs* entre diferentes escolhas de gestão (Brasil, 2016; Ventura, Fernández; Andrade, 2013). Uma estratégia de mitigação focada na expansão desordenada de bioenergia em monoculturas, por exemplo, pode gerar impactos severos sobre a biodiversidade, a disponibilidade hídrica e a segurança alimentar ao competir por

terras agricultáveis (Corrêa, 2024). É imperativo que os planejadores territoriais compreendam essa dualidade para desenhar trajetórias de transição justa que maximizem as sinergias e minimizem os riscos de antagonismo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Mendes, Conceição; Muniz, 2015; IPCC, 2023; Corrêa, 2024).

3 O COMPONENTE CIENTÍFICO DO RELATO E A GESTÃO NACIONAL PARA A MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES

O enfrentamento à crise climática e a transição para uma economia de baixo carbono exigem uma base científica e de gestão sólida para fundamentar a formulação de políticas públicas adequadas (Brasil, 2024f). Sob as diretrizes do Acordo de Paris, a instituição da Estrutura de Transparência Aprimorada (ETF) elevou a ambição e o rigor dos compromissos de relato periódico das nações signatárias (Brasil, 2024d). Nesse cenário, a elaboração sistemática de inventários nacionais de gases de efeito estufa (GEE) assume um papel central, pois garante a transparência da ação climática, atesta a responsabilidade internacional e permite monitorar cientificamente o progresso no cumprimento das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) (Brasil, 2024d).

Em âmbito nacional, o fluxo de gestão e relato dessas informações é coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), responsável por operar o Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), que consiste no principal instrumento oficial que confere publicidade e transparência ao processo de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) brasileiro (Brasil, 2024d). O desenvolvimento e o refinamento metodológico destes inventários resultam de um complexo esforço colaborativo multidisciplinar, que engloba a participação de mais de uma centena de instituições governamentais, universidades, centros de pesquisa e associações, e conta com o apoio técnico da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima) (Brasil, 2024f). É este aparato institucional que assegura a aplicação fidedigna das diretrizes estabelecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) na quantificação das emissões do país (Brasil, 2024d).

Para além do detalhado diagnóstico histórico fornecido pelos inventários, o componente científico atua incisivamente no planejamento estratégico do futuro por meio de modelos avançados de avaliação integrada (Brasil, 2024e). Ferramentas de otimização intertemporal — a exemplo do modelo nacional BLUES (*Brazilian Land Use and Energy System*) — são empregadas para projetar cenários prospectivos, levando em consideração dezenas de milhares de alternativas tecnológicas, restrições ambientais e dinâmicas macroeconômicas, apontando as trajetórias de descarbonização mais custo-efetivas para a economia brasileira como um todo (Bello *et al.*, 2023; Brasil, 2024e). É justamente a intersecção entre o retrato fiel proporcionado pelos inventários e a modelagem sistêmica das projeções que garante as evidências necessárias para o desenho de políticas robustas, servindo como pilar para a construção da Estratégia Nacional de Mitigação do Plano Clima e guiando o Brasil em sua ambição de alcançar a neutralidade climática em 2050 (Brasil, 2024e).

3.1 RELATO DAS EMISSÕES EM ESCALA NACIONAL E SETORIAL: O PAPEL DOS INVENTÁRIOS DE GEE

Os inventários nacionais de gases de efeito estufa (GEE) são peças centrais para o cumprimento dos compromissos climáticos internacionais assumidos pelo país, como o Acordo de Paris, pois garantem a transparência, o monitoramento das metas e embasam o processo oficial de mensuração, relato e verificação (Brasil, 2024d). A elaboração dos inventários nacionais de gases de efeito estufa (GEE) e a submissão do Relatório Bienal de Transparência (BTR) não são apenas ferramentas de gestão interna, mas constituem uma obrigação oficial e mandatória para todas as Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (Brasil, 2024d). Em 2015, o Acordo de Paris instituiu a Estrutura de Transparência Aprimorada (do inglês, *Enhanced Transparency Framework* - ETF), elevando significativamente o rigor e a ambição das exigências de reporte climático global para as nações signatárias (IPCC, 2022a; Brasil, 2024d).

Como desdobramento dessa estrutura, a partir de 2018 os países firmaram o compromisso vinculante de apresentar periodicamente os seus BTRs, seguindo modalidades, procedimentos e diretrizes (MPGs) comuns e estritos, definidos

internacionalmente por decisões oficiais, como as Decisões 18/CMA.1 e 5/CMA.3 da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). O cumprimento dessa obrigatoriedade é exigido para atestar a responsabilidade dos países perante a comunidade internacional, permitindo acompanhar de forma transparente as ações de mitigação e o alcance das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) (IPCC, 2022a; Brasil, 2024d).

Em atendimento a esse compromisso legal, o Primeiro Relatório Bienal de Transparência do Brasil (BTR1) (Brasil, 2024h) consolida o Inventário Nacional reportando que o país registrou a emissão líquida de aproximadamente 2,04 bilhões de toneladas de CO_2 equivalente no ano de 2022, o que aponta para uma redução de cerca de 20% em relação ao ano-base de 2005 (Brasil, 2024d). O perfil de emissões brasileiro possui uma característica bastante peculiar quando comparado ao de outras nações desenvolvidas, uma vez que a maior parcela de seus gases não tem origem na queima de combustíveis da matriz energética, mas sim nas atividades de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF) e na Agropecuária (Brasil, 2024d). Juntos, os setores florestal (39%) e agropecuário (31%) responderam por cerca de 70% das emissões totais do país em 2022, enquanto os setores de energia, processos industriais e resíduos corresponderam à fração restante (Brasil, 2024d).

O setor LULUCF é o mais representativo do perfil nacional, contabilizando 805.694 kt CO_2eq em 2022. A principal fonte emissora desse setor advém da categoria Campo e Pastagem, refletindo majoritariamente a conversão de áreas de floresta para agricultura e pastagem. Em contrapartida, o setor LULUCF também é o único a registrar remoções significativas de carbono, com o subsetor Floresta absorvendo -312.125 kt CO2 eq, um resultado impulsionado principalmente pela vegetação nativa preservada no interior de Unidades de Conservação e Terras Indígenas.

A Agropecuária configura o segundo setor com maior volume de emissões, contabilizando 622.014 kt CO_2 eq em 2022, o que representa 30,5% das emissões líquidas do país. A maior parcela dessas emissões setoriais (65%) está diretamente associada ao processo de fermentação entérica, sendo impulsionada pelo tamanho do rebanho bovino nacional. Em seguida, o subsetor de solos manejados contribui com 23% das emissões agropecuárias, ao passo que as atividades de manejo de

dejetos animais e calagem de solos somam juntas cerca de 9% do volume emitido pelo setor. (Brasil, 2024d).

O setor de Energia correspondeu a 20,5% das emissões nacionais em 2022, alcançando a marca de 418.451 kt CO_2 eq. A esmagadora maioria dessas emissões (94,5%) é decorrente das atividades diretas de queima de combustíveis fósseis, restando 5,5% associados a emissões fugitivas nos sistemas de produção e refino. Dentro do subsetor de queima de combustíveis, a categoria de Transporte lidera com 52% de participação setorial, seguida pelas Indústrias de Transformação e Construção (17%) e pelas Indústrias de Energia (14%). (Brasil, 2024d).

O setor de Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU) representou 5,0% das emissões do país em 2022, totalizando 102.317 kt CO_2 eq. As emissões deste setor não provêm do uso de combustíveis fósseis para fins energéticos, mas sim da transformação física e química de materiais nos processos produtivos e do uso não energético de produtos. A Indústria Metalúrgica é a maior contribuinte, responsável por 51% do volume setorial, especialmente devido à produção de ferro-gusa e aço. A Indústria Mineral ocupa a segunda posição em relevância, gerando 32% das emissões do IPPU, impulsionada fortemente pelos processos de calcinação na produção de cimento. (Brasil, 2024d).

Por fim, o setor de Resíduos possui a menor participação no perfil nacional, respondendo por 4,5% das emissões em 2022, com 90.761 kt CO_2 eq. O gás metano domina o perfil de GEE deste setor, compondo cerca de 97% do total, em razão da decomposição anaeróbia da matéria orgânica. A principal atividade emissora é a Disposição de Resíduos Sólidos (destinados a aterros sanitários, controlados e vazadouros), que contribui com aproximadamente 59% do total setorial, enquanto o Tratamento e Despejo de Águas Residuárias (efluentes e esgotos domésticos e industriais) representa cerca de 40% destas emissões. (Brasil, 2024d).

3.2 METODOLOGIA DE INVENTÁRIO E CONTABILIZAÇÃO DE EMISSÕES (GEE)

Para a mensuração e o relato das emissões, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) coordena cálculos fundamentados nas Diretrizes de

2006 do IPCC, complementadas pelo Suplemento de Áreas Úmidas de 2013 e pelos Refinamentos de 2019 (Brasil, 2024d).

Além deste documento base de 2006, o arcabouço metodológico internacional do IPCC tem sido aprimorado e dispõe de outros guias fundamentais para a elaboração de inventários, merecendo destaque o Suplemento de Áreas Úmidas de 2013 (*Wetlands Supplement*) e os Refinamentos de 2019 (*2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines*), que oferecem parâmetros atualizados, avanços científicos e orientações específicas para refinar continuamente as estimativas globais. (Brasil, 2024d).

A elaboração dessas estimativas adota diferentes níveis de complexidade, conhecidos como *Tiers* metodológicos (Brasil, 2024d). Enquanto o nível *Tier* 1 utiliza fatores de emissão e premissas globais padronizadas pelo IPCC, as abordagens de *Tiers* 2 e 3 empregam dados, modelagens e medições específicas da realidade nacional, oferecendo uma acurácia muito maior para as fontes de emissão consideradas categorias-chave do país (Brasil, 2024d).

Para gerir a complexidade de um inventário, a metodologia estabelece a identificação das chamadas categorias-chave. Uma categoria-chave é caracterizada como uma fonte de emissão ou um sumidouro que exerce uma influência significativa no inventário total do país, seja pelo seu volume absoluto de emissões, pela sua tendência de mudança ao longo do tempo, ou por ambos os fatores. Por meio da abordagem de avaliação de nível e tendência (Tier 1), o país identifica como categorias-chave aquelas que, somadas, representam 95% do total das emissões ou 95% da tendência do inventário. Esse detalhamento é estratégico porque permite que o país priorize seus recursos de forma estratégica, aplicando métodos de cálculo mais exigentes e precisos (Tiers 2 e 3) e controles de qualidade mais rigorosos exatamente nas fontes que mais impactam o balanço climático nacional.

A fim de unificar a contabilidade dos variados gases inventariados — com destaque para o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e os gases fluorados (HFCs, PFCs e SF6) —, os resultados são convertidos para uma unidade padrão de CO_2 equivalente (CO_2 eq) (Brasil, 2024d). Para essa conversão, utiliza-se a métrica do Potencial de Aquecimento Global (GWP) estipulada no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5), considerando o impacto dos gases em um horizonte

temporal de cem anos (Brasil, 2024d). Para garantir a confiabilidade desses dados, aplicam-se planos rigorosos de controle e garantia da qualidade (QA/QC), cruzando informações top-down e bottom-up (Brasil, 2024d).

3.3 A ESTRUTURA DA NDC BRASILEIRA E AS TRAJETÓRIAS SETORIAIS DE MITIGAÇÃO

As Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, na sigla em inglês) constituem o pilar estruturante do Acordo de Paris no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), representando os compromissos oficiais assumidos autonomamente por cada Estado-Parte para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e promover a resiliência socioecológica (Brasil, 2024d). Formuladas sob os princípios ético-políticos de equidade e de responsabilidades comuns, porém diferenciadas e respectivas capacidades, as NDCs refletem as ambições e circunstâncias nacionais no horizonte do desenvolvimento sustentável (Brasil, 2024d). No contexto brasileiro, a evolução dos compromissos climáticos marcou uma virada metodológica decisiva: a superação das metas ancoradas em desvios de cenários tendenciais (*business-as-usual*) e a consolidação de limites absolutos de emissão abrangendo a economia como um todo (*economy-wide*), tomando como referência o balanço de emissões do ano-base de 2005 (Brasil, 2024d).

A arquitetura temporal da atual NDC brasileira estabelece uma trajetória de mitigação de curto, médio e longo prazo. Para os marcos de 2025 e 2030, o país estipulou teto absoluto de emissões líquidas de 1,32 $GtCO_2e$ e 1,20 $GtCO_2e$, respectivamente (equivalendo a reduções de 48,4% a 53,1% em relação a 2005) (Brasil, 2024d). Para o horizonte de 2035, formalizado na Segunda NDC do Brasil, definiu-se uma meta em banda contínua compreendida entre 0,85 $GtCO_2e$ e 1,05 $GtCO_2e$ — o que corresponde a uma contração percentual de 59% a 67% frente aos níveis de 2005 (Brasil, 2024d). Essa trajetória intermediária encontra-se estritamente alinhada ao compromisso de atingir a neutralidade climática (*net-zero*) até 2050, assegurando a contribuição do país para conter o aumento da temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (Brasil, 2024d; Corrêa, 2024). A opção

por uma meta em banda para 2035 fundamenta-se na incorporação científica das incertezas inerentes ao comportamento de sistemas socioeconômicos complexos, utilizando modelos de avaliação integrada — em especial o modelo BLUES (*Bottom-up Local Integrated Assessment Model*) — e o Simulador Nacional de Políticas Setoriais e Emissões (SINAPSE), que projetam as rotas de descarbonização mais custo-efetivas para a matriz produtiva nacional (Bello *et al.*, 2023; Brasil, 2024d).

Para viabilizar o cumprimento dos limites absolutos pactuados na NDC, a Estratégia Nacional de Mitigação (ENM) integra o Plano Clima por meio do desmembramento de responsabilidades em sete Planos Setoriais, definindo prioridades e metas de alocação de emissões e remoções (Brasil, 2024e). No setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF / Conservação da Natureza), a medida de maior impacto imediato consiste na eliminação do desmatamento ilegal em todos os biomas até 2030, acompanhada pela compensação da supressão legal e pela recuperação de 12 milhões de hectares de vegetação nativa (Brasil, 2024g; Corrêa, 2024). Essa inflexão converterá o setor florestal, historicamente a maior fonte emissora do país, no principal sumidouro líquido de carbono do território brasileiro até 2035 (Brasil, 2024e). Na Agropecuária, a trajetória busca descolar o crescimento da produção de alimentos da geração de GEE, impulsionada pelo Plano ABC+, pela recuperação de pastagens degradadas, pela fixação biológica de nitrogênio e pela difusão de sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) (Brasil, 2024g; Corrêa, 2024). Nos setores de Energia e Transportes, a estratégia combina a manutenção da alta renovabilidade da matriz elétrica (solar, eólica e hídrica) com o adensamento dos biocombustíveis sustentáveis (etanol, biodiesel, biometano, HVO e bioquerosene de aviação - SAF), a eletrificação da mobilidade e a diversificação modal voltada ao transporte ferroviário e aquaviário (Brasil, 2024g; Corrêa, 2024). Por fim, nos eixos de Indústria e Resíduos, a descarbonização assenta-se no ganho de eficiência energética e de materiais, na transição para a economia circular, na substituição de insumos de alta pegada de carbono (como o uso de clínquer alternativo no cimento e carvão vegetal sustentável na siderurgia) e na captação e reaproveitamento energético do biogás em aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes (Brasil, 2024e; IPCC, 2022b).

A operacionalização dessas trajetórias setoriais é estruturada a partir do quadro conceitual "Evitar, Substituir, Melhorar", que orienta as políticas de mitigação no lado da demanda e da oferta (IPCC, 2022b; Corrêa, 2024). A abordagem busca: (i) evitar a demanda desnecessária por energia, materiais e deslocamentos por meio do planejamento territorial e da sobriedade de consumo; (ii) substituir tecnologias, fontes fósseis e insumos de alta intensidade emissora por alternativas renováveis e de baixo carbono; e (iii) melhorar a eficiência técnica dos equipamentos, processos industriais e sistemas infraestruturais existentes (Brasil, 2024e; Corrêa, 2024). Entre as rotas tecnológicas emergentes, o hidrogênio de baixa emissão de carbono sobressai-se como vetor estratégico para promover a descarbonização profunda em setores de difícil abatimento (hard-to-abate), a exemplo da indústria química pesada, da siderurgia e do transporte de longa distância (Brasil, 2024e). Ademais, reconhecendo a inevitabilidade de emissões residuais não-CO_2 provenientes da agropecuária e de certos processos industriais, o alcance do balanço líquido nulo até 2050 exigirá o escalonamento gradual de Tecnologias de Emissões Negativas (NETs) (Brasil, 2024e). Nesse cenário, a implementação de sistemas de Captura, Uso e Armazenamento de Carbono (CCUS) e, sobretudo, de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS) — que combina a conversão de biomassa para geração energética com a retenção e estocagem geológica permanente do CO_2 absorvido na fotossíntese — desempenhará papel decisivo a partir da década de 2030 para prover remoções de carbono em larga escala na economia nacional (Bello *et al.*, 2023; Brasil, 2024e; Corrêa, 2024).

4 SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA (SBN) COMO MEDIDA DE RESILIÊNCIA

4.1 ADAPTAÇÃO BASEADA EM ECOSSISTEMAS (ABE) E RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) consolidaram-se no debate científico e nas políticas públicas internacionais como um arcabouço integrador e estratégico para o enfrentamento simultâneo das crises climáticas, do declínio da biodiversidade

e das vulnerabilidades socioeconômicas (Brasil, 2016; Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Formulado como um conceito guarda-chuva, o paradigma das SbN abrange intervenções planejadas e executadas para proteger, manejar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais, modificados ou artificiais, visando responder aos desafios contemporâneos da sociedade por meio da provisão multifuncional de serviços ecossistêmicos (Comissão Europeia, 2015; UNEA, 2022). O termo emergiu no final da década de 2000 em publicações do Banco Mundial e da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), culminando na sua formalização institucional pela Resolução 69 do Congresso Mundial de Conservação e, posteriormente, pela Resolução 5/5 da Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Cohen-Shacham *et al.*, 2016; UNEA, 2022). A relevância das SbN reside na sua capacidade de deslocar a perspectiva tradicional — que interpretava a conservação ambiental apenas como um centro de custos — para uma abordagem proativa, na qual o capital natural e as dinâmicas ecossistêmicas são mobilizados como infraestruturas viáveis, sustentáveis e custo-efetivas para impulsionar a resiliência territorial e o desenvolvimento humano inclusivo (Fraga; Sayago, 2020; Rede Clima, 2025).

No interior do espectro das SbN, a Adaptação Baseada em Ecossistemas (AbE) constitui a abordagem especificamente voltada à gestão de riscos e ao incremento da capacidade adaptativa de populações humanas expostas a variabilidades e extremos climáticos (CBD, 2009; Brasil, 2016). Conceituada no âmbito da Convenção sobre Diversidade Biológica e plenamente incorporada à Estratégia de Biodiversidade e Ecossistemas do Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA), a AbE é definida como o uso sistêmico da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos como parte integrante de uma estratégia abrangente de adaptação territorial (CBD, 2009; Brasil, 2016). Enquanto as soluções puramente de engenharia tradicional (infraestrutura cinza) tendem a apresentar alto custo de implantação, rigidez operacional e depreciação ao longo do tempo, as estratégias de AbE operam a partir da resiliência intrínseca dos geossistemas, promovendo a regulação hídrica, a estabilização de encostas e a atenuação de picos térmicos por meio da própria dinâmica biótica do solo e da vegetação (Keesstra *et al.*, 2018; Rede Clima, 2025). Dessa forma, a AbE estabelece uma ponte conceitual entre a integridade dos

ecossistemas e a redução da vulnerabilidade socioespacial, reconhecendo que a resiliência das comunidades humanas é indissociável da saúde e da funcionalidade dos ecossistemas em que estão inseridas (Brasil, 2016; Thomas *et al.*, 2019).

Um dos atributos mais destacados da AbE e das SbN é a sua multifuncionalidade, expressa na geração continuada de múltiplos cobenefícios socioambientais e econômicos que transcendem a meta primária de adaptação (Cohen-Shacham *et al.*, 2016; Raymond *et al.*, 2017). A implementação de intervenções baseadas em ecossistemas contribui de forma sinérgica para: (i) a regulação e purificação dos recursos hídricos, aumentando a disponibilidade hídrica em períodos de estiagem e filtrando poluentes difusos; (ii) a regulação microclimática e a mitigação de ondas de calor em ambientes urbanos e rurais; (iii) o sequestro e estocagem continuada de carbono biótico na biomassa e no solo; (iv) a proteção contra a erosão laminar e o assoreamento de corpos d'água; e (v) a diversificação dos meios de subsistência de populações locais, por meio do fortalecimento da agricultura sustentável, do extrativismo não madeireiro e do ecoturismo (Brasil, 2016; Keesstra *et al.*, 2018; Rede Clima, 2025). Sob a ótica econômica, embora a valoração dos cobenefícios sociais e ecológicos exija métodos não monetários complexos, a literatura demonstra que as SbN apresentam relações favoráveis de custo-benefício de longo prazo, reduzindo gastos públicos recorrentes com obras de reparação de desastres e manutenção infraestrutural (Comissão Europeia, 2015; Vianna, 2010).

Nesse contexto, a Restauração Ecológica (RE) desponta como um dos vetores estruturantes e prioritários para a operacionalização das SbN e da AbE no território brasileiro (Brasil, 2024g). Compreendida como o conjunto de práticas intencionais voltadas a iniciar ou acelerar a recuperação de um ecossistema quanto à sua estrutura, composição florística, diversidade funcional e processos ecológicos originais, a restauração florestal consolida-se como a estratégia de mitigação e adaptação de menor custo relativo e maior eficiência para o país (SER, 2004; Brasil, 2024g). A escala de ambição brasileira encontra-se formalizada na Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Proveg), instituída pelo Decreto nº 8.972/2017 (BRASIL, 2017a) e no seu Plano Nacional (Planaveg) (BRASIL, 2017b), e segunda edição do Planaveg (2025-2028), aprovada pela Comissão Nacional para Recuperação da Vegetação Nativa (Brasil, 2024c) e integrada ao Plano Setorial de

Conservação da Natureza do Plano Clima, ratifica a meta nacional de promover a recuperação de, no mínimo, 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030 por meio do reflorestamento com espécies nativas autóctones, enriquecimento florestal, condução da regeneração natural assistida e do fomento a Sistemas Agroflorestais (SAFs), (Brasil, 2017b; 2024g). O cumprimento dessa meta é decisivo para viabilizar a transição do setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF) de principal fonte nacional de emissões de gases de efeito estufa para o maior sumidouro líquido de carbono do país, reforçando simultaneamente a conectividade dos fragmentos florestais e a segurança hídrica das bacias hidrográficas (Brasil, 2016; 2024g).

Cabe destacar que a vasta maioria das intervenções fundadas em AbE e Restauração Ecológica qualifica-se sob a categoria analítica de medidas de "não arrependimento" (no-regret measures) (Brasil, 2016; Kabisch *et al.*, 2016). No campo do planejamento climático, caracterizado por incertezas inerentes às projeções de modelos globais e regionais em escalas locais, as estratégias *no-regret* definem-se como aquelas ações que geram benefícios ambientais, sociais e econômicos líquidos e imediatos para a sociedade, independentemente do nível de severidade com que as alterações climáticas efetivamente se concretizem no futuro (Brasil, 2016; Kabisch *et al.*, 2017). Investir na restauração de matas ciliares, na conservação de nascentes, na recomposição de manguezais e das áreas degradadas, além de promover uma série de benefícios ecológicos também resulta na geração de trabalho e renda para comunidades e organizações locais, beneficiando toda uma teia produtiva da sociobiodiversidade. Portanto, mesmo em cenários otimistas de estabilização da temperatura global, tais investimentos justificam-se plenamente por si sós, configurando-se como escolhas de gestão territorial robustas, prudentes e transformadoras para a construção da resiliência geossistêmica nacional (Brasil, 2016; Rede Clima, 2025).

4.2 INTEGRIDADE DOS ECOSSISTEMAS: O PAPEL ESTRATÉGICO DAS ÁREAS PROTEGIDAS E DOS POVOS TRADICIONAIS

A manutenção e a recuperação da integridade ecossistêmica constituem os alicerces físicos, biológicos e funcionais indispensáveis para assegurar a resiliência dos geossistemas brasileiros diante da aceleração das mudanças climáticas globais (Brasil, 2016). Na perspectiva da Teoria dos Geossistemas e da Geoecologia das Paisagens, a integridade biótica reflete a capacidade de um território em preservar sua estrutura, suas redes de fluxo de matéria e energia, sua capacidade de autorregulação e a provisão contínua de serviços ecossistêmicos essenciais — incluindo a regulação do ciclo hidrológico, o amortecimento de extremos térmicos, a proteção do solo contra processos erosivos e a conservação do patrimônio genético (Sochava, 1978; Mateo Rodríguez *et al.*, 2022; Brasil, 2024g). Contudo, a fragmentação histórica das coberturas vegetais nativas, a expansão urbana e fronteiras agropecuárias, o avanço do desmatamento e das queimadas têm degradado a estabilidade dinâmica das paisagens, tornando vital a consolidação de redes territoriais de proteção e restauração ecológica (Brasil, 2016; Corrêa, 2024).

Tão importante quanto restaurar áreas degradadas é assegurar a proteção efetiva dos ecossistemas que ainda conservam sua integridade ecológica. A conservação de áreas naturais íntegras é fundamental para manter processos ecológicos, a biodiversidade, a conectividade entre habitats e a provisão de serviços ecossistêmicos, além de representar uma estratégia essencial diante das mudanças climáticas e da perda acelerada de biodiversidade. Assim, as áreas naturais protegidas, abrangidas por diferentes categorias e regimes de proteção, como as Unidades de Conservação, as Terras Indígenas, os Territórios Quilombolas, as Áreas de Preservação Permanente e as Reservas Legais, previstas no código florestal, cumprem papel de relevância estratégica inestimável (Dudley *et al.*, 2010; Brasil, 2024g).

As áreas naturais protegidas funcionam como verdadeiros escudos biogeográficos que inibem a expansão do desmatamento ilegal, contêm a ocupação desordenada em terras públicas e reduzem drasticamente a incidência de incêndios florestais (Soares-Filho, 2016; Brasil, 2024g). Do ponto de vista da mitigação climática,

esses territórios abrigam os maiores e mais consolidados estoques de carbono biótico do país na biomassa florestal e nos solos, impedindo a liberação de bilhões de toneladas de CO_2e para a atmosfera (Dudley *et al.*, 2010; Brasil, 2024g). Sob a lente da adaptação, as áreas protegidas atuam como refúgios bioclimáticos indispensáveis para a migração e sobrevivência de espécies da fauna e da flora, além de garantirem a manutenção dos "rios voadores" — os fluxos de umidade atmosférica gerados pela evapotranspiração amazônica que abastecem as chuvas nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste do Brasil (Brasil, 2016; Corrêa, 2024).

Essa importância é reforçada pela Meta 3 do Marco Global de Kunming-Montreal da Convenção sobre Diversidade Biológica, conhecida como Meta 30x30, que estabelece a conservação e o manejo eficaz de pelo menos 30% das áreas terrestres, de águas continentais, costeiras e marinhas até 2030, por meio de sistemas de áreas protegidas e outras medidas eficazes de conservação. No Brasil, as Unidades de Conservação constituem o principal instrumento para esse propósito e integram, por meio do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), um conjunto diversificado e complementar de categorias de manejo. O sistema reúne Unidades de Proteção Integral, voltadas prioritariamente à preservação da natureza, e Unidades de Uso Sustentável, que conciliam a conservação da biodiversidade com diferentes formas de uso dos recursos naturais e ocupação do território, incluindo atividades produtivas e estratégias de desenvolvimento social. Dessa forma, o SNUC não se limita à proteção de áreas naturais: suas diferentes categorias permitem articular conservação, uso sustentável, pesquisa, educação, turismo, manutenção de modos de vida e desenvolvimento socioeconômico, de acordo com as características e objetivos de cada território.

Ainda que o Brasil possua uma importante rede de áreas protegidas, ainda precisa avançar na proteção efetiva de seu território. Segundo dados do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC,2026), o país possui 3.421 Unidades de Conservação, que abrangem 262,7 milhões de hectares, correspondentes a 19,35% da área continental e 26,87% da área marinha. Desse conjunto, apenas 6,20% são representados por Unidades de Proteção Integral. A distribuição dessa proteção também é bastante desigual entre os biomas: enquanto a Amazônia apresenta 29,01% de seu território protegido, os percentuais são de 11,81% na Mata

Atlântica, 9,81% no Cerrado, 9,75% na Caatinga, 5,35% no Pantanal e apenas 3,20% no Pampa

Paralelamente, a eficácia das estratégias de Adaptação Baseada em Ecossistemas (AbE) é indissociável da valorização dos conhecimentos, saberes, inovações e práticas ancestrais dos povos indígenas e comunidades tradicionais (PICTs) (Brasil, 2016; Setti, 2021). Atualmente as Terras Indígenas, que desempenham papel fundamental na proteção dos territórios e modos de vida dos povos indígenas, correspondem a aproximadamente 14,3% do território brasileiro, segundo dados do Painel de Terras Indígenas da Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI, 2025).

Os povos e comunidades tradicionais — definidos pelo Decreto nº 6.040/2007 — possuem modos de vida estruturados no uso e manejo sustentável da biodiversidade, acumulando, ao longo de gerações, uma compreensão detalhada sobre os ciclos sazonais, a dinâmica dos recursos hídricos e o comportamento das espécies nativas (Brasil, 2016; Corrêa, 2024). Embora sejam reconhecidos internacionalmente como os guardiões mais eficientes da sociobiodiversidade, os PICTs apresentam elevada sensibilidade e vulnerabilidade aos impactos climáticos, uma vez que alterações nos padrões de precipitação e temperatura afetam diretamente seus calendários agrícolas, a disponibilidade de recursos pesqueiros e a segurança alimentar e nutricional de suas comunidades (Brasil, 2016; Thomas *et al.*, 2019).

Nesse contexto de salvaguarda territorial e promoção da Justiça Climática, destaca-se a Política Nacional de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas (PNGATI), instituída pelo Decreto nº 7.747/2012 (BRASIL, 2012a, 2016). A PNGATI estrutura-se em sete eixos estratégicos — que englobam desde a proteção territorial e governança indígena até o uso sustentável dos recursos naturais e a prevenção de danos ambientais —, sendo operacionalizada em escala local por meio dos Planos de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas (PGTAs) (Brasil, 2012a; Brasil, 2024g). O fortalecimento dos PGTAs, aliado ao avanço da demarcação e regularização fundiária das Terras Indígenas e Territórios Quilombolas, consolida-se como a medida de política pública para a contenção do desmatamento, a conservação da biodiversidade e a redução de conflitos fundiários no campo (Brasil, 2016; Brasil,

2024g). A garantia dos direitos territoriais e o fortalecimento da autonomia socioambiental dos povos tradicionais convertem a restauração ecológica e a conservação da natureza em processos genuínos de inclusão social, equidade distributiva e resiliência geossistêmica (Brasil, 2016; Torres *et al.*, 2021; Brasil, 2024g).

4.3 RESILIÊNCIA EM GEOSSISTEMAS CRÍTICOS: O FOCO EM ZONAS URBANAS E COSTEIRAS (SBN)

A aplicação prática das Soluções Baseadas na Natureza (SbN) ganha centralidade e urgência estratégica nos geossistemas caracterizados por elevada densidade populacional, intensa intervenção antrópica e alta exposição aos perigos climáticos, com destaque para os centros urbanos e a zona costeira (Brasil, 2016; Corrêa, 2024; Rede Clima, 2025). Nesses territórios de dinâmica físico-territorial altamente alterada, a perda da cobertura vegetal original e a rigidez da infraestrutura cinza construída amplificam os impactos de eventos extremos, exigindo a transição para modelos de planejamento fundados na resiliência e na multifuncionalidade ecossistêmica (Ahern, 2011; Kabisch *et al.*, 2017).

Nos geossistemas urbanos, a contínua substituição de superfícies permeáveis por materiais de alta retenção térmica (asfalto e concreto) e a verticalização desordenada alteram profundamente o balanço de energia e a dinâmica hidrológica local (Ahern, 2011; Rede Clima, 2025). O resultado direto dessa transformação manifesta-se na exacerbação das Ilhas de Calor Urbanas (ICU) e no aumento da frequência e severidade de inundações, enxurradas e alagamentos durante chuvas intensas (Corrêa, 2024; Rede Clima, 2025). Frente a esse cenário, a implantação de redes conectadas de infraestrutura verde e azul — que articulam arborização urbana, miniflorestas, parques lineares, jardins de chuva, biovaletas, telhados verdes, alagados construídos (wetlands) e praças alagáveis — consolida-se como medida estruturante de adaptação bioclimática e gestão do escoamento pluvial (Cerezini; Castro, 2024; Rede Clima, 2025).

A presença de vegetação nos espaços urbanos atua diretamente no microclima por meio de dois processos físicos fundamentais: o sombreamento das superfícies e a evapotranspiração (Rede Clima, 2025). A cobertura arbórea intercepta a radiação

solar direta, impedindo o aquecimento do solo e das edificações, enquanto a transpiração foliar consome energia térmica do ambiente para converter água líquida em vapor, promovendo o resfriamento do ar (Rede Clima, 2025). Evidências empíricas demonstram que áreas urbanas que mantêm taxa de cobertura por copas superiores a 40% podem registrar temperaturas do ar até 5 °C inferiores em comparação com setores densamente impermeabilizados, configurando verdadeiros "óasis urbanos" e refúgios climáticos para a população (Rede Clima, 2025). Na dimensão hidrológica, os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) inspirados em SbN promovem a retenção, a filtração e a infiltração da água da chuva no próprio local de precipitação, retardando o pico de vazão nas redes de macrodrenagem, recarregando o lençol freático e reduzindo substancialmente os custos recorrentes de manutenção da infraestrutura pública (Ahern, 2011; Brasil, 2024f).

Ademais, iniciativas recentes no Brasil têm buscado regulamentar e institucionalizar a aplicação de SbN no planejamento das cidades. Destacam-se o Programa Cidades Verdes Resilientes, instituído pelo Decreto nº 12.041/2024 (Brasil, 2024a), o Catálogo Brasileiro de Soluções Baseadas na Natureza do projeto CITinova/MCTI e a política de SbN nas Periferias, desenvolvida pelo Ministério das Cidades para promover a adaptação inclusiva e combater o risco climático em áreas vulneráveis (Brasil, 2024f; Rede Clima, 2025). A integração dessas infraestruturas verdes ao desenho urbano contribui também para evitar os efeitos da gentrificação verde, assegurando que os cobenefícios ambientais, sociais e de saúde pública sejam distribuídos com equidade socioespacial (Kabisch *et al.*, 2017; Rede Clima, 2025).

Nos geossistemas costeiros e marinhos, por sua vez, a vulnerabilidade aos perigos climáticos decorre da combinação entre a elevação do nível relativo do mar, o aumento da frequência de marés de tempestade (storm surges), a intensificação da erosão praial e a intrusão salina em aquíferos continentais (Hale *et al.*, 2009; Brasil, 2016; Corrêa, 2024). A zona costeira brasileira, que abriga grande parte das regiões metropolitanas e polos industriais do país, enfrenta riscos crescentes de contaminação das fontes de abastecimento hídrico e destruição de infraestruturas litorâneas (Brasil, 2016; Corrêa, 2024).

Nesse contexto marinho-costeiro, a conservação e a restauração de ecossistemas-chave — como manguezais, dunas vegetadas, restingas, pântanos

estuarinos e recifes de coral — funcionam como infraestruturas biogeomórficas naturais de proteção (Hale *et al.*, 2009; Manes *et al.*, 2023). Os manguezais e restingas atenuam a energia mecânica das ondas incidentes e retêm sedimentos por meio de suas complexas redes radiculares, reduzindo a força erosiva das ressacas e contendo a sobrelevação do nível do mar durante tempestades (Hale *et al.*, 2009; Brasil, 2016). A preservação dessas barreiras vegetais demonstra eficiência técnica e econômica substancialmente superior à construção de obras rígidas de engenharia (como diques, enrocamentos e espigões), que frequentemente alteram a dinâmica sedimentar local e transferem o problema erosivo para setores adjacentes da costa (Hale *et al.*, 2009; Manes *et al.*, 2023).

Além da função de proteção física, os ecossistemas costeiros oferecem cobenefícios de alcance global e local. Os manguezais e marismas estão entre os ecossistemas mais eficientes do planeta na captura e estocagem de longo prazo de carbono nos seus solos anóxicos, desempenhando papel de liderança nas estratégias de "carbono azul" (blue carbon) para a mitigação climática (Hale *et al.*, 2009; Brasil, 2024g). Paralelamente, atuam como berçários vitais para a reprodução de espécies de peixes, crustáceos e moluscos, sustentando a pesca artesanal, a segurança alimentar e a economia de milhões de comunidades ribeirinhas e litorâneas (Brasil, 2016; Corrêa, 2024). A restauração ecológica dessas zonas de transição terra-mar afirma-se, portanto, como uma medida multifuncional de adaptação, conservação da biodiversidade e justiça socioambiental no litoral brasileiro (Hale *et al.*, 2009; Brasil, 2016; Brasil, 2024g).

5 PLANEJAMENTO ADAPTATIVO, SISTEMAS DE ALERTA E POPULAÇÕES VULNERÁVEIS

5.1 CIDADES ESPONJA E A GESTÃO INTEGRADA DE RISCOS URBANOS

A exposição das cidades aos riscos socioambientais tem se ampliado, sobretudo, devido ao processo de urbanização, associado às mudanças climáticas e à crescente impermeabilização do solo. Desta forma, desde inundações, alagamentos, enxurradas, movimentos de massa, até as ondas de calor e escassez

hídrica constituem desafios cada vez mais presentes no planejamento e na gestão dos territórios urbanos. Nesse contexto, o conceito de Cidades Esponja[5] (*Sponge Cities*) surge como uma abordagem inovadora para repensar a relação entre urbanização, água e natureza, incorporando soluções capazes de aumentar a capacidade dos espaços urbanos de absorver, armazenar, infiltrar, retardar e reutilizar a água da chuva. (Yu *et al.*, 2015).

A concepção de Cidade Esponja está diretamente relacionada à necessidade de superar os atuais modelos tradicionais de drenagem urbana, que por muitas décadas teve como características predominantes a condução das águas pluviais para fora das áreas urbanizadas. Se por um lado, o modelo apresentado, mesmo que historicamente contribuiu como por exemplo para a redução de alagamentos, por outro lado, também pode transferir o problema para outras áreas e aumentar a velocidade e o volume do escoamento superficial. Em contraposição, a abordagem de Cidade Esponja procura aproximar o funcionamento hidrológico urbano das condições naturais, utilizando a própria paisagem como elemento de infraestrutura.

O conceito de Cidade Esponja, defendido por Yu *et al.* (2015), representa, sobretudo, uma mudança de paradigma na gestão das águas pluviais, pois favorecem a retenção, a infiltração, o armazenamento e o tratamento da água no próprio território. Ou seja, essa perspectiva está associada ao planejamento urbano sensível à água, no qual áreas verdes, parques, jardins de chuva, pavimentos permeáveis, telhados verdes, wetlands construídos, reservatórios de retenção e sistemas de biorretenção passam a desempenhar funções simultaneamente ambientais, hidráulicas e sociais.

O entendimento e a abordagem atualmente às Cidades Esponjas devem ser considerados de forma mais ampla, pois não se trata somente de inserir elementos verdes na paisagem urbana, mas, sim, de promover uma transformação na forma como a cidade compreende e administra seus recursos hídricos. Nesse sentido, a Cidade Esponja pode ser entendida como uma estratégia de planejamento territorial, adaptação climática e redução de riscos, fundamentada na recuperação de determinadas funções hidrológicas e ecológicas do território.

[5] A atribuição mais aceita atualmente por cunhar pela primeira vez o termo Cidades Esponjas deve-se ao arquiteto paisagista e urbanista chinês Kongjian Yu, professor da Universidade de Pequim e fundador da Turenscape. A própria Universidade de Pequim apresenta Yu como o pesquisador que pioneiramente desenvolveu a teoria das Sponge Cities.

A gestão integrada de riscos urbanos fundamenta-se na compreensão de que os desastres não são apenas fenômenos naturais, mas resultam da interação entre ameaças ambientais e condições de vulnerabilidade social. Conforme argumentam Wisner *et al.* (2004), o risco é socialmente construído, uma vez que populações distintas possuem diferentes capacidades de prevenção, resposta e recuperação diante de eventos extremos. Dessa forma, políticas públicas voltadas à redução dos riscos urbanos devem combinar intervenções estruturais, planejamento territorial e mecanismos de proteção social.

Nesse contexto, as cidades esponja representam uma importante ferramenta de planejamento adaptativo, pois promovem simultaneamente benefícios ambientais, sociais e econômicos. Além da redução das enchentes, tais intervenções contribuem para a melhoria da qualidade da água, para o aumento da biodiversidade urbana, para a redução das ilhas de calor e para a ampliação de espaços públicos destinados ao lazer e ao bem-estar da população. A literatura evidencia que cidades que investem em infraestrutura verde tendem a apresentar maior capacidade adaptativa frente aos impactos climáticos, fortalecendo sua resiliência socioecológica.

De acordo com Ahern (2011), a resiliência urbana pode ser entendida como a capacidade de um sistema urbano resistir, adaptar-se e recuperar-se diante de perturbações sem comprometer suas funções essenciais. Nesse sentido, a infraestrutura verde atua como um componente estratégico da adaptação climática, reduzindo a dependência exclusiva de obras convencionais de drenagem e ampliando a capacidade de resposta das cidades diante de eventos extremos.

Experiências internacionais, mostram que a aplicação do conceito de cidades esponjas geram efeitos positivos para toda a população. A China constitui o principal exemplo de aplicação do conceito de cidades esponja, no mundo. No ano de 2014, o governo chinês incorporou oficialmente essa estratégia às políticas nacionais de desenvolvimento urbano, implementando projetos-piloto em dezenas de municípios. Entre os exemplos mais conhecidos destaca-se a cidade de Shenzhen, que promoveu a instalação de áreas verdes multifuncionais, reservatórios urbanos e sistemas de drenagem sustentável. Estudos indicam redução do escoamento superficial e melhoria dos indicadores de qualidade da água em áreas contempladas pelo programa. (Yu *et al.*, 2015; Li; Kim, 2022; Lu *et al.*, 2025; Yang; Deloyde, 2026).

Outro caso frequentemente citado é o do Parque Qunli Stormwater Wetland, em Harbin, projetado por Kongjian Yu. O empreendimento transformou uma área sujeita a inundações em um sistema de áreas úmidas capaz de armazenar grandes volumes de água durante períodos chuvosos, funcionando simultaneamente como parque urbano e infraestrutura de controle hídrico. O projeto tornou-se referência internacional em adaptação climática baseada em soluções naturais.

Na Europa, cidades como Copenhague, na Dinamarca, vêm adotando estratégias semelhantes após a ocorrência de eventos pluviométricos extremos que provocaram elevados prejuízos econômicos. A cidade passou a incorporar parques inundáveis, corredores verdes e sistemas de retenção de água pluvial distribuídos pelo espaço urbano. Essas medidas integram uma política mais ampla de adaptação climática voltada à redução dos riscos hidrológicos.

No contexto brasileiro, também temos aplicações e potencialidades, que foram pensados e aplicados a partir da experiência chinesa, embora o conceito de cidade esponja tenha sido desenvolvido na China, seus princípios apresentam grande potencial de aplicação no Brasil. Diversas cidades brasileiras enfrentam problemas recorrentes relacionados às enchentes urbanas, agravados pela rápida expansão urbana e pela ocupação irregular de áreas de várzea e encostas.

Curitiba, por exemplo, já adota há décadas algumas soluções compatíveis com os princípios das cidades esponja. Os parques Barigui, Tingui, São Lourenço e Iguaçu foram planejados para funcionar como áreas de amortecimento de cheias. Durante períodos de chuvas intensas, esses espaços armazenam temporariamente parte da água excedente dos rios urbanos, reduzindo o risco de inundações nas áreas residenciais vizinhas.

Outro exemplo relevante pode ser observado em Recife, cidade historicamente vulnerável às inundações devido à sua localização em áreas de baixa altitude e à influência das marés. Nos últimos anos, projetos relacionados à infraestrutura verde e drenagem urbana sustentável têm sido incorporados ao planejamento municipal como alternativas complementares às obras convencionais de engenharia.

Em Porto Alegre, após os eventos extremos registrados no Rio Grande do Sul em 2024, intensificaram-se os debates sobre a necessidade de fortalecer políticas de adaptação climática, ampliar áreas permeáveis e integrar sistemas de monitoramento

hidrometeorológico ao planejamento urbano. Esses acontecimentos reforçam a relevância da gestão integrada de riscos e da adoção de soluções baseadas na natureza.

Portanto, a eficiência das cidades esponja aumenta quando suas estruturas físicas são integradas aos sistemas de monitoramento e alerta precoce. Conforme destacam Meerow, Newell e Stults (2016), a resiliência urbana depende não apenas da infraestrutura disponível, mas também da capacidade institucional de antecipar riscos e comunicar informações à população.

Sistemas de alerta baseados em dados meteorológicos, sensores hidrológicos, modelagem computacional e geotecnologias permitem identificar áreas vulneráveis e emitir avisos antecipados à população. A utilização dessas ferramentas é particularmente importante para grupos socialmente vulneráveis, que geralmente apresentam menor capacidade de resposta diante dos desastres.

Populações de baixa renda frequentemente ocupam áreas marginais, encostas instáveis e zonas sujeitas a alagamentos, tornando-se as principais vítimas dos eventos extremos. Assim, a implementação de cidades esponja deve ser acompanhada por políticas de inclusão social, educação ambiental, planejamento participativo e fortalecimento dos mecanismos de proteção comunitária.

Dessa forma, a integração entre infraestrutura verde, sistemas de alerta e políticas públicas de adaptação climática contribui para a construção de cidades mais resilientes, sustentáveis e socialmente justas. Ao reduzir os riscos ambientais e ampliar a capacidade de resposta das comunidades, as cidades esponja consolidam-se como uma das estratégias mais relevantes para o enfrentamento dos desafios urbanos impostos pelas mudanças climáticas no século XXI.

O Plano Diretor constitui um dos principais instrumentos da política urbana brasileira, regulamentado pela Lei nº 10.257/2001 (Estatuto da Cidade) (Brasil, 2001). Sua função é orientar o desenvolvimento municipal, promover o ordenamento territorial e assegurar o cumprimento da função social da cidade e da propriedade. Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, o Plano Diretor assume papel estratégico na incorporação de medidas voltadas à adaptação climática, à redução dos riscos socioambientais e à construção de cidades mais resilientes.

Nesse contexto, os princípios das Cidades Esponja podem ser incorporados ao planejamento urbano por meio das diretrizes estabelecidas nos planos diretores municipais. O conceito, desenvolvido por Kongjian Yu, propõe a reorganização da infraestrutura urbana para recuperar a capacidade natural de absorção, retenção e infiltração das águas pluviais, reduzindo enchentes, alagamentos e outros impactos associados à impermeabilização do solo.

Historicamente, o planejamento urbano brasileiro privilegia intervenções baseadas na chamada infraestrutura cinza, caracterizada pela canalização de rios, retificação de cursos d'água e ampliação de galerias de drenagem. Embora essas soluções sejam importantes, diversos estudos demonstram que elas frequentemente transferem os problemas de inundação para outras áreas da cidade, além de promoverem a degradação ambiental dos ecossistemas urbanos. As cidades esponja surgem como alternativa complementar, fundamentada em soluções baseadas na natureza e na restauração de processos ecológicos.

Segundo Ahern (2011), cidades resilientes são aquelas capazes de antecipar, absorver e adaptar-se às perturbações ambientais sem comprometer suas funções essenciais. Para que isso ocorra, o planejamento urbano deve integrar aspectos ambientais, sociais e econômicos, promovendo formas sustentáveis de ocupação do território. Nesse sentido, o Plano Diretor torna-se o instrumento adequado para institucionalizar políticas voltadas à drenagem urbana sustentável e à gestão integrada dos recursos hídricos.

A incorporação dos princípios das cidades esponja aos planos diretores pode ocorrer por meio de diferentes mecanismos. Um deles é o zoneamento ambiental, que estabelece áreas prioritárias para preservação, recuperação e proteção dos recursos hídricos. A delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APPs), corredores ecológicos, parques lineares e faixas de amortecimento ao longo dos rios contribui para aumentar a capacidade de retenção das águas pluviais e reduzir os riscos de inundação.

Outro aspecto relevante refere-se à regulamentação do uso e ocupação do solo. O Plano Diretor pode estabelecer índices mínimos de permeabilidade, incentivar a implantação de telhados verdes, jardins de chuva e pavimentos permeáveis, bem como restringir a ocupação de áreas suscetíveis a enchentes e movimentos de massa.

Essas medidas fortalecem a adaptação climática das cidades ao mesmo tempo em que reduzem a exposição da população aos perigos ambientais.

A experiência internacional demonstra que o planejamento territorial é elemento fundamental para o sucesso das cidades esponja. Na China, a inserção desse conceito nas políticas nacionais de desenvolvimento urbano permitiu a implementação de projetos em dezenas de municípios, articulando infraestrutura verde, planejamento urbano e gestão das águas. Os resultados evidenciam melhorias na retenção hídrica, redução do escoamento superficial e aumento da resiliência urbana frente aos eventos climáticos extremos.

No Brasil, embora o conceito de cidades esponja ainda esteja em processo de difusão, algumas experiências evidenciam a importância do planejamento urbano integrado. Curitiba é frequentemente apontada como referência em gestão hídrica urbana devido à criação de parques lineares em áreas sujeitas a inundações. Os parques Barigui, Tingui, São Lourenço e Iguaçu desempenham funções ambientais e recreativas, ao mesmo tempo em que atuam como áreas de amortecimento das cheias dos rios urbanos. Essa estratégia demonstra como instrumentos de planejamento podem transformar áreas vulneráveis em espaços multifuncionais que contribuem para a segurança hídrica da cidade.

Da mesma forma, eventos recentes de inundação registrados em diversas cidades brasileiras têm evidenciado a necessidade de revisão dos planos diretores sob a perspectiva das mudanças climáticas. O aumento da frequência dos eventos extremos exige que os municípios incorporem análises de risco, mapeamento de vulnerabilidades, sistemas de monitoramento e estratégias de adaptação em seus instrumentos de planejamento territorial.

A relação entre Plano Diretor Municipal (Brasil, 2001) e cidades esponja também envolve a promoção da justiça socioambiental. De acordo com Wisner *et al.* (2004), os desastres atingem de forma desproporcional as populações socialmente vulneráveis, que frequentemente residem em áreas inadequadas e apresentam menor capacidade de resposta aos riscos. Assim, os instrumentos de planejamento urbano devem priorizar a proteção dessas populações por meio da oferta de infraestrutura adequada, habitação segura, áreas verdes e sistemas de alerta precoce.

Nesse contexto, a integração entre Plano Diretor, gestão de riscos e soluções baseadas na natureza representa uma oportunidade para fortalecer a sustentabilidade urbana. Mais do que um conjunto de obras de drenagem, as cidades esponja constituem um modelo de desenvolvimento territorial que busca harmonizar crescimento urbano, conservação ambiental e redução das vulnerabilidades sociais.

Portanto, a inserção dos princípios das cidades esponja nos planos diretores municipais configura-se como uma estratégia fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Ao articular infraestrutura verde, ordenamento territorial e gestão integrada dos recursos hídricos, os municípios ampliam sua capacidade de adaptação, promovem maior segurança para a população e contribuem para a construção de cidades mais resilientes, sustentáveis e inclusivas.

5.2 SISTEMAS DE ALERTA PRECOCE PARA RISCOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS

5.2.1 Funções, Atuação Institucional (CEMADEN, CENAD) e Tecnologias

No horizonte do planejamento adaptativo, a mitigação das vulnerabilidades territoriais aos desastres hidrometeorológicos e geodinâmicos depende fundamentalmente da capacidade das instituições públicas em antecipar a ocorrência de eventos extremos deflagradores (Brasil, 2016; WMO, 2022). A estruturação de Sistemas de Alerta Precoce (EWS, na sigla em inglês para *Early Warning Systems*) configura-se como uma medida não estrutural de adaptação de altíssima relação custo-efetividade, capaz de reduzir drasticamente o número de óbitos, desabrigados e prejuízos materiais decorrentes de inundações bruscas, enxurradas, deslizamentos de terra e secas severas (Bapna *et al.*, 2019; WMO, 2022; Cerezini; Castro, 2024). A eficácia de um EWS repousa sobre quatro pilares interdependentes e articulados: (i) a avaliação e mapeamento contínuo dos riscos e vulnerabilidades territoriais; (ii) a manutenção de uma rede de observação e monitoramento hidrometeorológico de alta resolução; (iii) a emissão e disseminação célere dos alertas; e (iv) a capacidade institucional e comunitária de resposta rápida antes que o impacto se concretize (Brasil, 2016; WMO, 2022).

No Brasil, o arcabouço institucional para a gestão de riscos e resposta a desastres passou por um rearranjo estrutural a partir de 2011, impulsionado pelo desastre ocorrido na Região Serrana do Rio de Janeiro, o que culminou no deslocamento do foco de atuação de políticas puramente reativas (pós-desastre) para ações preventivas de salvaguarda de vidas (Brasil, 2016; Cerezini; Castro, 2024). Nesse cenário, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), órgão vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), assumiu a atribuição precípua de operar a rede nacional de monitoramento e emitir alertas de risco iminente para os municípios prioritários com áreas suscetíveis a movimentos de massa e inundações (CEMADEN, 2015; Brasil, 2016; 2024f). A atuação do CEMADEN abrange o monitoramento contínuo de centenas de municípios urbanos críticos, além da avaliação do risco de colapso de safras e vulnerabilidade hídrica na região do Semiárido brasileiro, combinando dados meteorológicos com indicadores de umidade do solo e saúde da vegetação (CEMADEN, 2015; Brasil, 2016).

A operação do CEMADEN articula-se diretamente com o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), vinculado à Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR) (Brasil, 2016; Brasil, 2024f). Enquanto o CEMADEN provê a inteligência preditiva e a fundamentação físico-científica dos alertas em tempo quase real, cabe ao CENAD consolidar o panorama nacional de riscos, coordenar as ações federais de resposta e transmitir as diretrizes operacionais às Defesas Civis estaduais e municipais para o acionamento dos planos de contingência e evacuação (Brasil, 2016; Brasil, 2024f). Esse fluxo é suportado tecnicamente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM/SGB), que, em parceria com o Ministério das Cidades, executa a setorização de áreas de risco alto e muito alto e elabora as Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização, instrumento básico para identificar a suscetibilidade do terreno a deslizamentos e orientar o ordenamento do uso do solo urbano (Carvalho; Macedo; Ogura, 2007; Brasil, 2016).

Do ponto de vista tecnológico, a acurácia da previsão de curto prazo (nowcasting) exige a integração de múltiplas plataformas de sensoriamento remoto, modelagem computacional e automação de dados (Brasil, 2016). A infraestrutura de

observação inclui a rede de radares meteorológicos acoplada a pluviômetros automáticos, estações PCD (pCDs hidrológicas e geotécnicas), sensores de umidade de solo em encostas e imagens dos satélites operados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Brasil, 2016; 2024f). A assimilação desses dados em modelos numéricos de previsão de chuva, acoplados a modelos hidrológicos de vazão e modelos geotécnicos de estabilidade de taludes, permite projetar o momento exato em que os limiares e gatilhos de precipitação acumulada serão atingidos, acionando os protocolos de emergência antes da deflagração do processo físico (Brasil, 2016; WMO, 2022).

5.2.2 O Uso da Informação e a Capacidade de Resposta da População

A excelência tecnológica e a precisão do diagnóstico preditivo dos órgãos de monitoramento tornam-se inócuas se a informação de risco não for traduzida em ação preventiva tempestiva e eficaz na ponta, onde a população se encontra exposta (Wisner *et al.*, 2004; Brasil, 2016; Corrêa, 2024). A transição do dado técnico para a resposta comunitária eficaz constitui o gargalo mais complexo dos Sistemas de Alerta Precoce, demandando um canal permanente de comunicação de risco, transparência nas mensagens e preparação pedagógica prévia das comunidades vulneráveis (Brasil, 2016; OPAS/MS, 2014; WMO, 2022). O marco legal brasileiro estabelecido pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), instituída pela Lei nº 12.608/2012 (Brasil, 2012b) reforça a obrigatoriedade da atuação integrada entre a União, os Estados e os Municípios para promover o envolvimento da sociedade civil na redução do risco de desastres, inserindo a cultura de prevenção no planejamento local (Brasil, 2016).

A capacidade de resposta das populações está intrinsecamente condicionada ao seu perfil de vulnerabilidade socioespacial (Wisner *et al.*, 2004; Thomas *et al.*, 2019). Populações de menor renda frequentemente ocupam áreas de elevada fragilidade geomorfológica — como encostas íngremes, fundos de vale e planícies de inundação —, caracterizando-se pela precariedade habitacional e pelo limitado acesso a redes de saneamento, transporte e serviços públicos de saúde (Wisner *et al.*, 2004; Cerezini; Castro, 2024). Nesses territórios, os avisos de desastre

transmitidos via aplicativos, SMS ou sirenes de alarme só resultam em desocupação segura das moradias quando acompanhados da presença prévia de Núcleos Comunitários de Proteção e Defesa Civil (NUPDECs), rotas de fuga sinalizadas, pontos de apoio bem estruturados e garantia de segurança para o patrimônio das famílias desabrigadas (Brasil, 2016; OPAS/MS, 2014; Corrêa, 2024).

Ademais, a gestão da informação climática e dos alertas deve ser transversalmente integrada às políticas de saúde pública, assistência social e desenvolvimento urbano (Brasil, 2016; PNUMA, 2024). A articulação entre os sistemas de monitoramento do CEMADEN/CENAD e o Sistema Único de Saúde (SUS) — por meio de ferramentas como o Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM) e o Observatório Nacional de Clima e Saúde (Fiocruz/INPE) — assegura que a rede hospitalar e a atenção primária estejam preparadas para o surto de agravos à saúde humana no pós-desastre, tais como leptospirose, arboviroses e traumas psicossociais (Brasil, 2016; OPAS/MS, 2014). Portanto, a consolidação de um EWS plenamente adaptativo requer não apenas o contínuo aprimoramento tecnológico das redes de sensores, mas o fortalecimento contínuo da governança local, da educação ambiental nas escolas e da capacidade de auto-organização comunitária, garantindo a proteção e a promoção da Justiça Climática para os territórios mais expostos da nação (Brasil, 2012b; 2016; Cerezini; Castro, 2024).

5.3 POPULAÇÕES TRADICIONAIS E VULNERÁVEIS: ADAPTAÇÃO, CONHECIMENTO ANCESTRAL E POLÍTICAS PÚBLICAS

A adaptação deve focar nos grupos sociais de maior vulnerabilidade, incluindo explicitamente as populações tradicionais (Brasil, 2016b). A crise climática é uma ameaça que atinge com maior intensidade as populações economicamente desfavorecidas, e a vulnerabilidade e o risco aumentam nas regiões onde há menos recursos públicos e carências socioeconômicas estáveis (Mendes, Conceição e Muniz, 2015; Brasil, 2016). A vulnerabilidade social é uma característica multidimensional ligada a fatores subjacentes como a pobreza, o nível educacional e a falta de acesso a serviços básicos (Brasil, 2016; Pörtner *et al.*, 2022). O aumento da

vulnerabilidade em assentamentos precários é acentuado pela falta de saneamento básico, infraestrutura e habitação (Brasil, 2016). O princípio da Justiça Climática exige, portanto, a inclusão de recortes como classe, raça, etnia e gênero, além dos povos e comunidades tradicionais, para priorizar as ações de adaptação (Mach *et al.*, 2024; Brasil, 2016).

O conhecimento e as práticas tradicionais dos povos indígenas e comunidades locais são cruciais para a conservação da biodiversidade, a contenção do desmatamento, a manutenção do estoque de carbono florestal e a provisão de uma série de serviços ambientais inestimáveis (Brasil, 2016; Setti, 2021). Esses povos, cujos estilos de vida baseiam-se no uso e manejo sustentado dos recursos naturais e da diversidade biológica, estão especialmente expostos e são sensíveis aos impactos negativos do clima, o que torna as consequências sobre suas culturas e territórios precoces e severas (Brasil, 2016; Corrêa, 2024). Alterações nos padrões de temperatura, precipitação e sazonalidade afetam diretamente os ciclos de vida de plantas e animais e os calendários agrícolas, comprometendo a segurança alimentar e a capacidade de subsistência (Brasil, 2016b).

Os povos indígenas são observadores sofisticados das dinâmicas e transformações ambientais e têm elaborado respostas e estratégias variadas, criativas e sustentáveis ao longo de sua história milenar para lidar com a mudança do clima (Brasil, 2016). Por isso, a comunidade científica e o IPCC têm reconhecido que seus conhecimentos tradicionais podem prover valiosas informações a nível local e regional, servindo de base para a elaboração de estratégias de adaptação custo-efetivas, participativas e sustentáveis (Brasil, 2016; Savarese, 2018). As Tecnologias Sociais (TS), que são soluções simples e adaptadas à realidade local e que valorizam o saber tradicional, demonstram grande potencial para a mitigação e adaptação, melhorando as condições de vida e promovendo o desenvolvimento humano no semiárido (Ventura, Fernández e Andrade, 2013; Casagrande *et al.*, 2024).

O fortalecimento da capacidade adaptativa dessas populações exige o reconhecimento dos seus direitos humanos e territoriais (Brasil, 2016; Brasil, 2024g). A regularização fundiária de territórios tradicionalmente ocupados, como as Terras Indígenas (TIs) e territórios quilombolas, é uma ação de alto potencial para a conservação e para a consolidação da resiliência e justiça socioambiental (Brasil,

2016; 2024g; Funai, 2025). Instrumentos como a Política Nacional de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas (PNGATI), instituída pelo Decreto nº 7.747/2012, visam garantir e promover a proteção e o uso sustentável dos recursos naturais em TIs (Brasil, 2012a). Em complemento, é essencial que os estudos de vulnerabilidade sejam realizados com metodologias participativas e promovam o diálogo intercultural para identificar hotspots de vulnerabilidade que se cruzam com áreas de fragilidade físico-ambiental e climática, subsidiando a proposição de políticas públicas de caráter estruturante (Brasil, 2016; 2024g).

6 GOVERNANÇA E PARCERIAS PARA A TRANSIÇÃO JUSTA

6.1 GOVERNANÇA MULTINÍVEL E PARCERIAS ESTRATÉGICAS (GOVERNO, ACADEMIA, ONGS)

A complexidade e a transversalidade do tema das mudanças climáticas exigem que as estratégias de mitigação e adaptação sejam promovidas de forma concertada e integrada entre os diversos níveis governamentais, os setores econômicos e a sociedade civil (Mendes, Conceição e Muniz, 2015; Brasil, 2016). Nesse sentido, o Plano Nacional de Adaptação (PNA), por exemplo, propõe mecanismos institucionais para sua implementação concertada entre os entes federativos, os setores e a sociedade (Brasil, 2016) e visa orientar iniciativas para a gestão e a diminuição do risco climático no longo prazo (Brasil, 2016). A instância máxima de governança climática federal é o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM), o qual, por meio de seu Grupo Executivo (GEx-CIM), delibera e provê orientação política para as ações do Plano (Brasil, 2016). O CIM, composto por 23 ministérios e órgãos, tem a responsabilidade de coordenar e supervisionar a elaboração, aprovação, monitoramento e avaliação do Plano Clima (Brasil, 2024f).

O sucesso das ações no território nacional depende da efetivação do Federalismo Climático, que exige a articulação federativa entre União, estados e municípios, garantindo uma resposta eficaz às vulnerabilidades regionais. O PNA prevê a criação de um subgrupo permanente para articulação federativa, envolvendo os três níveis de governo na implementação, monitoramento e revisão das estratégias

(Brasil, 2016). Além disso, a Lei Complementar nº 140/2011 estabelece normas de cooperação federativa para ações administrativas relativas à proteção do meio ambiente, reforçando a necessidade da governança multinível (Brasil, 2011).

O engajamento e a participação da sociedade civil são componentes institucionais cruciais para a legitimidade e a eficácia das políticas climáticas. No âmbito federal, a participação da sociedade é institucionalizada e realizada por meio do Fórum Brasileiro de Mudança do Clima (FBMC), que possibilita a participação permanente da sociedade civil em fóruns de discussão sobre o tema (Brasil, 2016). Organizações da sociedade civil e não governamentais (ONGs) desempenham um papel central na implementação de políticas e práticas de adaptação, sendo parceiros estratégicos. Um exemplo emblemático é a Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA), que mobiliza 700 entidades e implementou o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), que utiliza Tecnologias Sociais (TS) para garantir o acesso à água e aumentar a resiliência de comunidades rurais (Ventura, Fernández e Andrade, 2013). O engajamento com as Comunidades de Interesse (CDI) — que incluem grupos indígenas e comunidades tradicionais — é vital, pois facilita o compartilhamento de conhecimentos tradicionais, o que pode informar o processo de identificação de vulnerabilidades e a avaliação de risco, tornando as soluções mais custo-efetivas e adaptadas ao contexto local (MAC, 2021).

A base científica e técnica para a governança é fornecida pela academia e institutos de pesquisa, sendo a Orientação Técnico-Científica para os Planos Setoriais de Adaptação de responsabilidade do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) (Brasil, 2024f). As informações técnico-científicas necessárias para subsidiar a avaliação de vulnerabilidades e risco climático concentram-se em órgãos, institutos e redes de pesquisa. As principais instituições que atuam neste campo são o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), o MCTI e a Rede Clima (Brasil, 2016). A Rede Clima (Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais) é um instrumento de implementação da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) com a missão de gerar e disseminar conhecimentos para que o Brasil possa responder aos desafios climáticos (MCTI, 2007; Rede Clima, 2023). O projeto SiMAClim, por exemplo, aprovado em 2023 e implementado pela Rede Clima a partir da UFPE, tem

como foco gerar informações e preencher lacunas de conhecimento científico nacional (Rede Clima, 2023).

6.2 CIÊNCIA E GESTÃO ADAPTATIVA: FERRAMENTAS PARA A TOMADA DE DECISÃO TERRITORIAL

A formulação, a implementação e a revisão contínua das políticas públicas de enfrentamento à emergência climática em âmbito territorial demandam arranjos metodológicos e de governança capazes de lidar com a incerteza inerente aos cenários futuros de mudança global (Brasil, 2016; Martins; Ferreira, 2012). No planejamento tradicional de infraestrutura e ordenamento do solo, prevaleceu historicamente uma lógica estática — ancorada na premissa de estacionariedade dos regimes hidrometeorológicos —, na qual as intervenções eram projetadas para responder a limiares fixos calculados a partir de séries históricas do passado (Ahern, 2011; Cerezini; Castro, 2024). Contudo, a aceleração do aquecimento global e a emergência de não linearidades climáticas invalidam o pressuposto de estacionariedade, tornando indispensável a incorporação da gestão adaptativa como pilar orientador da tomada de decisão pública e privada (Brasil, 2016; Haasnoot *et al.*, 2013).

A gestão adaptativa é conceituada como um processo estruturado, iterativo e dinâmico de tomada de decisão, orientado ao aprendizado contínuo e ao ajuste flexível das estratégias territoriais em resposta a novas informações científicas, dados de monitoramento de campo e alterações observadas nos geossistemas (Brasil, 2016; ISO, 2019). Do ponto de vista operacional, a gestão adaptativa estrutura-se sobre a lógica do ciclo Planejar-Fazer-Checar-Agir (PDCA), consagrado em sistemas de gestão ambiental e amplamente recomendado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2022a; ISO, 2019). No ciclo adaptativo:

- Planejar (Plan): envolve a identificação das vulnerabilidades locais, o mapeamento dos riscos climáticos e o estabelecimento de metas claras e indicadores de desempenho;

- Fazer (Do): compreende a execução das medidas selecionadas — com prioridade para Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e ações de baixo arrependimento (low-regret);
- Checar (Check): fundamenta-se no monitoramento sistemático das variáveis ambientais e na avaliação da efetividade das medidas implementadas; e
- Agir (Act): traduz-se na recalibragem e no redesenho das intervenções quando os resultados observados divergem das metas pactuadas ou quando novas projeções climáticas exigem correções de rumo (Brasil, 2016; ISO, 2019; Brasil, 2024).

Para operacionalizar a gestão adaptativa e evitar tanto a subadaptação (que expõe o território a perigos não remediados) quanto a má adaptação (maladaptation — intervenções rígidas e dispendiosas que geram aprisionamento tecnológico ou agravam vulnerabilidades secundárias), destaca-se a ferramenta metodológica dos Caminhos de Adaptação (*Adaptation Pathways*) (Haasnoot *et al.*, 2013; Brasil, 2016). A abordagem dos Caminhos de Adaptação fornece um roteiro sequencial e flexível que orienta os gestores territoriais sobre como, onde e quando implementar diferentes opções de intervenção ao longo do tempo, articulando dois conceitos centrais:

- Limiares de adaptação (*adaptation tipping points*): definem-se como os limites operacionais, ambientais ou socioeconômicos a partir dos quais uma determinada medida, infraestrutura ou política pública existente deixa de ser eficaz, falhando em prover o nível aceitável de resiliência ou proteção ao geossistema;
- Gatilhos de ação (*action triggers*): consistem em parâmetros físicos, sinalizadores socioambientais ou limiares de alerta pré-definidos (por exemplo, determinado valor acumulado de chuva, nível de elevação do mar ou grau de estresse hídrico) que indicam o momento exato em que uma nova medida adaptativa deve ser acionada e implementada para evitar que o limiar crítico de falha seja atingido.

A aplicação efetiva de ferramentas como os Caminhos de Adaptação e o Ciclo PDCA pressupõe uma sólida infraestrutura nacional de geração de dados, modelagem computacional e transferência de conhecimento científico para os tomadores de decisão em escala regional e municipal (Brasil, 2016; Cerezini; Castro, 2024). No Brasil, a orientação técnico-científica para embasar a avaliação de vulnerabilidade e dar suporte à elaboração dos Planos Setoriais e Subnacionais de Adaptação é provida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que atua de forma articulada com instituições de excelência em pesquisa e sensoriamento remoto (Brasil, 2016; 2024f).

Nesse ecossistema científico, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desempenha papel de liderança na geração de cenários de mudanças climáticas regionalizados para a América do Sul (por meio de modelos climáticos de alta resolução) e no monitoramento por satélite do uso da terra e da cobertura vegetal em todos os biomas brasileiros (Brasil, 2016). O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) provê a inteligência preditiva e o monitoramento em tempo quase real dos riscos hidrometeorológicos e geodinâmicos, fornecendo os gatilhos físicos indispensáveis para o acionamento de ações preventivas pelas Defesas Civis locais (CEMADEN, 2015; Brasil, 2016). Complementarmente, a Rede Clima (Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais), instituída pelo MCTI, atua na integração transdisciplinar da comunidade acadêmica nacional, preenchendo lacunas de conhecimento e gerando diagnósticos territorializados sobre vulnerabilidade socioespacial, biodiversidade e serviços ecossistêmicos (Brasil, 2016; Rede Clima, 2023).

Destaca-se, nesse âmbito, a implementação de iniciativas como o projeto SiMAClim (Sistema de Informação e Modelagem Ambiental para Adaptação Climática), aprovado sob coordenação acadêmica para consolidar bases de dados integradas de clima, solo e ecossistemas, oferecendo subsídios quantitativos e qualitativos para que estados e municípios construam trajetórias adaptativas transparentes, participativas e direcionadas à resiliência geossistêmica de longo prazo (Rede Clima, 2023; Brasil, 2024f).

6.3 FINANCIAMENTO E MECANISMOS PARA A TRANSPARÊNCIA E JUSTIÇA CLIMÁTICA

O financiamento adequado e a transparência são elementos cruciais para garantir a implementação eficaz das estratégias de mitigação e adaptação, especialmente em um contexto de Justiça Climática (Mendes, Conceição e Muniz, 2015; Mach *et al.*, 2024; PNUMA, 2024). A crise climática exige que os gastos envolvidos sejam de grande magnitude, de forma a evitar o comprometimento da sustentabilidade do crescimento econômico e o agravamento das desigualdades sociais (Mendes, Conceição e Muniz, 2015). A escassez de recursos financeiros e a falta de infraestrutura adequada são barreiras que dificultam a implementação de estratégias eficientes nos países em desenvolvimento (Lima *et al.*, 2025; Bapna *et al.*, 2019). Contudo, há capital global suficiente e disponível, e o desafio reside em redirecionar esses investimentos para soluções de mitigação e adaptação.

O Brasil dispõe de instrumentos financeiros essenciais. O Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (Fundo Clima) é um dos principais instrumentos de financiamento nacionais, operando nas modalidades reembolsável e não reembolsável (Brasil, 2024f). Seu orçamento anual já ultrapassa R$ 10 bilhões, e ele financia projetos de mitigação e adaptação, incluindo desenvolvimento urbano resiliente, indústria verde e soluções de infraestrutura (Brasil, 2016; 2024f). Além dos recursos orçamentários, o financiamento de ações pode ser complementado por fundos internacionais, como o Fundo Verde para o Clima (GCF) e o Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) (Lima *et al.*, 2025; Brasil, 2016). A cooperação internacional e a transferência de tecnologia são vitais, sendo que os países em desenvolvimento frequentemente dependem dos relatórios do IPCC para apoiar seus pedidos de assistência financeira e tecnológica para adaptação (Corrêa, 2024; Lima *et al.*, 2025).

A mobilização de recursos privados é impulsionada por novos mecanismos e incentivos. O modelo de financiamento combinado (*blended finance*) integra recursos públicos, filantrópicos ou concessionais com capital privado, sendo estratégico para alavancar investimentos em larga escala (Brasil, 2024f). No campo da regulamentação, a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024, visa acelerar a redução de emissões e fomentar

inovações tecnológicas (Brasil, 2024b). Pelo menos 75% dos recursos gerados pelo SBCE serão destinados ao Fundo Clima para financiar a descarbonização das atividades reguladas (Brasil, 2024b). Outra ferramenta é a Taxonomia Sustentável Brasileira, um sistema de classificação que visa mobilizar e redirecionar fluxos de capital privado para investimentos que contribuam para os objetivos climáticos e sociais (Brasil, 2024f). Adicionalmente, a precificação do carbono pode gerar receitas que, se usadas para compensar famílias vulneráveis pela elevação de custos de energia, pode apoiar a transição justa (Corrêa, 2024).

A Justiça Climática impõe que as ações de mitigação sejam acompanhadas por medidas que garantam a equidade distributiva dos custos e benefícios (Brasil, 2024f, Corrêa, 2024). Estratégias como a reestruturação de programas de assistência social, incluindo transferências de renda, podem incorporar medidas de adaptação, reduzindo a vulnerabilidade e fortalecendo a justiça (Corrêa, 2024; Brasil, 2016). O monitoramento, avaliação e transparência são essenciais para o aprendizado e aprimoramento contínuos das políticas (Syrkis *et al.*, 2024; Brasil, 2016b).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo buscou demonstrar que o enfrentamento da crise climática no Brasil exige uma inflexão conceitual, metodológica e política nas formas de compreender e gerir o território. Ao articular a Teoria dos Geossistemas (TGS) e a Geoecologia das Paisagens com o arcabouço da Justiça Climática, das Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e da Gestão Adaptativa, foi possível construir um diagnóstico integrado das vulnerabilidades socioespaciais e propor caminhos concretos para a transformação geossistêmica nacional.

A análise desenvolvida confirma a premissa de que as alterações climáticas não se manifestam como eventos atmosféricos isolados, mas como forçantes externas que desestabilizam a estrutura e o funcionamento dinâmico das paisagens terrestres e marinhas. Essa desestabilização atinge de forma desproporcional as populações socioeconomicamente vulnerabilizadas, cujos territórios sejam os assentamentos precários e encostas íngremes no meio urbano, as zonas costeiras

expostas à elevação do nível do mar ou as comunidades rurais do Semiárido, concentram altos níveis de exposição e reduzida capacidade adaptativa.

Dessa forma, a Justiça Climática firma-se como o eixo ético e político transversal indispensável para orientar qualquer estratégia de mitigação e adaptação. O capítulo evidenciou que a transição para uma economia descarbonizada e resiliente só será legítima e sustentável se for conduzida sob os princípios da Transição Justa, assegurando a distribuição equitativa dos custos e cobenefícios da ação climática, a redução das desigualdades de classe, raça e gênero, e a salvaguarda inegociável dos direitos territoriais e dos saberes ancestrais dos povos indígenas e comunidades tradicionais.

No âmbito da mitigação, o alinhamento do Brasil aos compromissos do Acordo de Paris, refletido na arquitetura temporal da sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) com limites absolutos para 2025, 2030 e 2035, estabelece uma trajetória clara rumo à neutralidade climática (net-zero) até 2050. A consecução dessas metas requer a implementação sinérgica dos sete Planos Setoriais de Mitigação do Plano Clima, com destaque para o setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF/Conservação da Natureza), no qual a eliminação do desmatamento ilegal e a recuperação de 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030 (Planaveg) (Brasil, 2024c) converterão a histórica fonte de emissões no maior sumidouro líquido de carbono do país. Paralelamente, o desdobramento da abordagem "Evitar, Substituir, Melhorar" nos setores de energia, transportes, indústria e agropecuária (Plano ABC+), somado ao escalonamento futuro de tecnologias de emissões negativas (como CCUS e BECCS), assegura a descarbonização profunda da matriz produtiva.

Na dimensão da adaptação e resiliência territorial, sobressai o papel estratégico das Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e da Adaptação Baseada em Ecossistemas (AbE) como medidas de "não arrependimento" (*no-regret*) (CBD, 2009; Cohen-Shacham *et al.*, 2016; Rede Clima, 2025). Conforme demonstrado ao longo do capítulo: A conservação das Áreas Protegidas (SNUC) e a consolidação da Política Nacional de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas (PNGATI) constituem os escudos mais eficazes para a manutenção dos estoques de carbono biótico e dos serviços ecossistêmicos de regulação hídrica e bioclimática;

Nos geossistemas urbanos, a transição para o paradigma das Cidades Esponja, integrando infraestrutura verde e azul, drenagem sustentável (SUDS) e o princípio safe-to-fail, atenua o efeito de Ilhas de Calor Urbanas e reduz os picos de inundação, promovendo o conforto bioclimático e a salubridade pública;

Nos geossistemas costeiros, a preservação e restauração de manguezais, restingas e marismas protegem a linha de costa contra a erosão e sobrelevações marinhas, promovendo o sequestro de "carbono azul" e garantindo a segurança alimentar de populações ribeirinhas.

Por fim, o capítulo ressaltou que a efetividade das políticas climáticas na escala local depende da consolidação de uma governança multinível e adaptativa. A integração operacional dos Sistemas de Alerta Precoce (CEMADEN/CENAD/Defesa Civil) com a difusão de Tecnologias Sociais de convivência com o clima e a aplicação do Ciclo PDCA e dos Caminhos de Adaptação (A*daptation Pathways*) garantem que a decisão pública seja pautada pelo aprendizado contínuo frente às incertezas científicas. O fortalecimento de redes de pesquisa, como a Rede Clima e a implementação de plataformas integradas como o SiMAClim, viabiliza a transformação do conhecimento científico em ação comunitária e governamental acionável.

Como recomendações para agendas futuras de pesquisa e gestão pública, indica-se a necessidade de: (i) Aprofundar os diagnósticos intersetoriais de vulnerabilidade em escala microterritorial e municipal, incorporando indicadores sensíveis a gênero, raça e equidade socioespacial; (ii) Fortalecer os mecanismos de financiamento climático subnacional e de orçamentação pública com lentes climáticas, garantindo recursos perenes para a infraestrutura verde e para a Defesa Civil comunitária; (iii) Fomentar a coprodução do conhecimento entre o saber acadêmico e a sabedoria ancestral de povos indígenas e comunidades tradicionais na formulação dos planos locais de adaptação.

Conclui-se, portanto, que a integração entre geociências, justiça climática e planejamento adaptativo oferece o caminho científico e político necessário para que o Brasil construa territórios resilientes, sustentáveis, prósperos e socialmente justos no horizonte do século XXI.

REFERÊNCIAS

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: sustainability and resilience in the new urban world. **Landscape and Urban Planning**, v. 100, n. 4, p. 341-343, 2011.

ATTIAS, C. *et al.* Avanços e desafios na agenda climática brasileira. **Revista Brasileira de Mudanças Climáticas**, v. 12, n. 1, p. 15-32, 2021.

BAPNA, M. *et al.* **Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience**. Rotterdam: Global Commission on Adaptation, 2019. 88 p.

BELLO, A. *et al.* **Neutralidade de carbono até 2050: cenários para uma transição eficiente no Brasil**. Relatório Final. Rio de Janeiro: CEBRI, 2023. 106 p.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 19 jul. 2000.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências (Estatuto da Cidade). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 17 jul. 2001.

BRASIL. **Decreto nº 6.040, de 7 de fevereiro de 2007**. Institui a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 31, 8 fev. 2007.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 109, 30 dez. 2009.

BRASIL. **Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011**. Fixa normas para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 9 dez. 2011.

BRASIL. **Decreto nº 7.747, de 5 de junho de 2012**. Institui a Política Nacional de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas – PNGATI. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 6 jun. 2012a.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 11 abr. 2012b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA)**. Volume 1: Estratégia Geral. Volume 2: Estratégias Setoriais e Temáticas. Brasília, DF: MMA, 2016.

BRASIL. **Decreto nº 8.972, de 23 de janeiro de 2017**. Institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa - Proveg. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 24 jan. 2017a.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg). **Portaria Interministerial nº 230/2017**. Brasília, DF: MMA, 2017b.

BRASIL. **Decreto nº 12.041, de 5 de junho de 2024**. Institui o Programa Cidades Verdes Resilientes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 6 jun. 2024a.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024.** Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SBCE. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 12 dez. 2024b.

BRASIL. Comissão Nacional para Recuperação da Vegetação Nativa (CONAVEG). **Resolução nº 4, de 25 de novembro de 2024**. Dispõe sobre as diretrizes do Planaveg 2025-2028. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 84, 28 nov. 2024c.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **A NDC do Brasil: Determinação nacional em contribuir e transformar**. Brasília, DF: MMA, 2024d.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Clima: Estratégia Nacional de Mitigação e Adaptação. Brasília,** DF: MMA, 2024e.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Estratégia Nacional de Mitigação: Plano Clima Mitigação 2024-2035**. Brasília, DF: MMA, 2024f.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Clima Setorial: Conservação da Natureza (2025-2035)**. Brasília, DF: MMA, 2024g.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Primeiro Relatório Bienal de Transparência do Brasil (BTR1)**. Brasília, DF: MMA, 2024h.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (org.). **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília, DF: Ministério das Cidades; IPT, 2007.

CASAGRANDE, D. *et al.* Climate adaptation policies and rural income: Evidence from social technologies in Brazil. **World Development**, v. 181, p. 106660, 2024.

CAVALCANTI, L. C. S. **Da Descrição de Áreas à Teoria dos Geossistemas: uma Abordagem Epistemológica sobre Sínteses Naturalistas**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

CAVALCANTI, L. C. S.; CORRÊA, A. C. B. Geossistemas e Geografia no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 2, p. 3-33, 2016.

CAVALCANTI, L. C. S. *et al.* Técnicas de campo para descrição de geossistemas: reconhecimento expedito na borda oeste do maciço residual de Poço das Trincheiras, Alagoas. **Geoambiente On-Line**, n. 15, p. 1-16, 2013.

CAVALCANTI, L. C. S.; BRAZ, A. M.; OLIVEIRA, C. S. Cartografia de paisagens: fundamentos, tendências e reflexões. In: STEINKE, V. A.; SILVA, C. A.; FIALHO, E. S.(org.). **Geografia da Paisagem**: múltiplas abordagens. Brasília: UnB, 2022. v. 1, p. 15-40.

CAVALCANTI, L. C. S.; SILVA, F. P.; SANTOS, R. S. Oito lições sobre geossistemas. **Revista da ANPEGE**, v. 20, n. 42, p. 1-25, 2024.

CBD - CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY. **Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation**. Technical Series No. 41. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Montreal: CBD, 2009.

CEMADEN - CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. **Gestão de Riscos e Desastres**. Brasília, DF: MCTI, 2015.

CEREZINI, M. T.; CASTRO, C. N. **Mudanças climáticas: desafios para a adaptação nas regiões metropolitanas brasileiras**. Texto para Discussão nº 2993. Brasília, DF: IPEA, 2024. 68 p.

COHEN-SHACHAM, E. *et al.* (ed.). **Nature-based Solutions to address global societal challenges**. Gland: IUCN, 2016. 92 p.

COMISSÃO EUROPEIA. **Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions and re-naturing cities**. Final Report of the Horizon 2020 Expert Group. Brussels: European Commission, 2015.

CORRÊA, I. C. S. **Mudanças Climáticas: impactos, mitigação e adaptação**. Porto Alegre: CECO/IGEO/UFRGS, 2024.

DUDLEY, N. *et al.* **Natural Solutions: Protected areas helping people cope with climate change**. Gland: IUCN; WWF, 2010.

FRAGA, R. G.; SAYAGO, D. A. V. Soluções baseadas na Natureza: uma revisão sobre o conceito. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, DF, v. 25, n. 50, p. 67-82, 2020.

FUNAI – FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS. **Terras Indígenas: Dados Geoespaciais e Mapas**. Brasília, DF: FUNAI, 2025.

HAASNOOT, M. *et al.* Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. **Global Environmental Change**, v. 23, n. 2, p. 485-498, 2013.

HALE, L. Z. *et al.* Ecosystem-based adaptation in marine and coastal ecosystems. **Renewable Resources Journal**, v. 25, n. 4, p. 21-28, 2009.

ILO - INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. **Input paper: ILO – G20 Sustainable Finance Working Group 2024**. Geneva: ILO, 2024.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2022a.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2022b.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2023.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14090: Adaptation to climate change — Principles, requirements and guidelines**. Geneva: ISO, 2019.

KABISCH, N. *et al.* Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. **Ecology and Society**, v. 21, n. 2, art. 39, 2016.

KABISCH, N. *et al.* (ed.). **Nature-based Solutions to climate change adaptation in urban areas: linkages between science, policy and practice**. Cham: Springer Open, 2017. 350 p.

KEESSTRA, S. *et al.* The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. **Science of the Total Environment**, v. 610-611, p. 997-1009, 2018.

LI, Y.; KIM, Y. Analysis of Effects of Sponge City Projects Applying the Geodesign Framework. **Land**, v. 11, p. 455, 2022.

LIMA, M. *et al.* Financiamento climático e cooperação técnica no Sul Global. **Revista de Economia e Política Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 45-62, 2025.

LU, Y. *et al.* Keyword Analysis and Systematic Review of China's Sponge City Policy and Flood Management Research. **Atmosphere**, v. 16, n. 9, p. 1200, 2025.

MAC - MINISTRY FOR ACTION ON CLIMATE. **Engaging Communities of Interest in Climate Action Plans**. Ottawa: MAC, 2021.

MACH, K. J. *et al.* Research to confront climate change complexity: Intersectionality, integration, and innovative governance. **Earth's Future**, v. 12, n. 6, e2023EF004325, 2024.

MANES, S. *et al.* Nature as a solution for shoreline protection against coastal risks associated with ongoing sea-level rise. **Ocean & Coastal Management**, v. 235, p. 106487, 2023.

MARTINS, R. D.; FERREIRA, L. C. A capacidade de adaptação das cidades às mudanças climáticas: desafios e oportunidades. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 27, n. 80, p. 235-245, 2012.

MATEO RODRÍGUEZ, J. M.; SILVA, E. V.; CAVALCANTI, A. P. B. **Geoecologia de paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental**. 6. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2022.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais: Rede Clima**. Brasília, DF: MCTI, 2007.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P.; STULTS, M. Defining urban resilience: a review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. 38-49, 2016.

MENDES, T. A.; CONCEIÇÃO, M. S.; MUNIZ, E. **Conceitos básicos sobre mudança do clima: causas, mitigação e adaptação**. Brasília, DF: Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2015.

NEVES, C. E. *et al.* A importância dos geossistemas na pesquisa geográfica: uma análise a partir da correlação com o ecossistema. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 271-285, 2014.

OBERMAIER, M.; ROSA, L. P. Mudança de clima e adaptação no Brasil: uma análise crítica. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 27, n. 78, p. 155-176, 2013.

OPAS/MS - ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE / MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Desastres Naturais e Saúde no Brasil**. Brasília, DF: OPAS; Ministério da Saúde, 2014.

PNUMA - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Planos Nacionais de Adaptação**. Nova Iorque: PNUMA, 2024.

PÖRTNER, H.-O. *et al.* (ed.). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

RAYMOND, C. M. *et al.* A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. **Environmental Science & Policy**, v. 77, p. 15-24, 2017.

REDE CLIMA. **Relatório de Atividades e Projeto SiMAClim**. São José dos Campos: INPE/MCTI, 2023.

REDE CLIMA; PROGRAMA BIOTA SÍNTESE. **Soluções Baseadas na Natureza (SbN): conceitos, benefícios e limites frente ao calor extremo**. São Paulo/São José dos Campos: IEA-USP; INPE, 2025. 64 p.

SAVARESE, A. Traditional knowledge and climate change: a new legal frontier? **Journal of Human Rights and the Environment**, v. 9, n. 1, p. 32-50, 2018.

SER - SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION. **Ecological Restoration Primer**. Tucson: Society for Ecological Restoration International, 2004.

SETTI, A. M. **Soluções baseadas na Natureza: sustentabilidade e resiliência**. São Paulo: Ed. do Autor, 2021.

SOARES-FILHO, B. S. **Role of Amazon protected areas, especially the conservation units supported by ARPA, in reducing deforestation**. Rio de Janeiro: Funbio, 2016.

SOCHAVA, V. B. Por uma teoria de classificação de geossistemas de vida terrestre. **Biogeografia**, São Paulo, n. 14, p. 1-25, 1978.

SYRKIS, G. W. *et al.* Vulnerabilidades às mudanças climáticas e análise da implementação de medidas de adaptação em estados brasileiros. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 19, n. 56, p. 606-636, 2024.

THOMAS, K. *et al.* Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. **WIREs Climate Change**, v. 10, n. 2, e565, 2019.

TORRES, P. H. C. *et al.* Justiça climática e as estratégias de adaptação às mudanças climáticas no Brasil e em Portugal. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 103, p. 221-240, 2021.

UNEA - UNITED NATIONS ENVIRONMENT ASSEMBLY. **Resolution 5/5: Nature-based solutions for supporting sustainable development**. Nairobi: UNEP, 2022.

VENTURA, A. C.; FERNÁNDEZ, L.; ANDRADE, J. C. S. Tecnologias Sociais para Enfrentamento às Mudanças Climáticas no Semiárido: Caracterização e Contribuições. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 44, n. especial, p. 213-238, 2013.

VIANNA, J. N. S. **A economia dos ecossistemas e da biodiversidade para tomadores de decisão locais e regionais**. Brasília, DF: MMA, 2010.

WISNER, B. *et al.* **At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. 2. ed. London: Routledge, 2004. 471 p.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Services to reduce Disaster Risk – WMO contributions. **Bulletin World Meteorological Organization**, Geneva, v. 71, n. 1, p. 12-25, 2022.

YANG, S.; DELOYDE, C. N. Sponge City for Flood Control: Implementation, Challenges and Opportunities. **Cambridge Journal of Regions, Economy and Society**, v. 19, n. 1, p. 105-122, 2026.

YU, K. **Sponge City: Theory and Practice**. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

EDUCAÇÃO CLIMÁTICA E FORMAÇÃO CIDADÃ

Maria Eneida Fantin – Centro Universitário Internacional Uninter[1]
Carolina Datria Schulze – Centro Universitário Internacional Uninter[2]
Allyson Felipe da Silva – Centro Universitário Internacional Uninter[3]
Cristiane Dall' Agnol da Silva Benvenutti – Centro Universitário Internacional Uninter[4]

1 INTRODUÇÃO

As consequências das mudanças e crises climáticas ao longo da humanidade foram crescentes e tomaram proporções que exigem ações imediatas. A humanidade vem encontrando formas de se adaptar às adversidades climáticas, e seus impactos físicos e humanos que, em alguns casos acarretou migrações geográficas como forma de garantia da sobrevivência. As discussões globais sobre o tema, por meio das Conferências das Partes (COPs), bem como os documentos legais derivados, protocolos, acordos e pactos rígidos, visavam 'frear' a expansão de poluentes, consumo, descarte e desperdício, além de problematizar o ponto de não retorno do desequilíbrio climático.

Hodierno, estudos sobre mudanças e crises climáticas é pauta e temática recorrente na área da Geociências refletidos, por muitas vezes nos meios de comunicação, de tal forma que causam uma variável de opiniões adversas, além de conceitos e informações divergentes do campo da Ciência. Toda essa problemática adentrou espaços formais educacionais e o desafio de enfrentar o debate agora é

[1]Bacharela, Licenciada e Mestra em Geografia – eneida.fa@uninter.com
[2]Bacharela, Licenciada e Mestra em Geografia – carolina.sc@uninter.com
[3]Licenciado em Ciências Biológicas e Mestre em Ensino de Ciências – allyson.s@uninter.com
[4]Licenciada em Pedagogia, Mestre e Doutora em Educação – cristiane.b@uninter.com

imperativo, especialmente por ser a escola território de saber e conhecimento científico.

Os temas que advém do objeto central de estudo desse capítulo, abarcam aquecimento global, efeito estufa, clima, levantam hipóteses e teses do senso comum da população, mas ao mesmo tempo soam como alerta para a necessidade de se pensar, em uma educação ambiental para de fato promover o desenvolvimento pessoal, cultural, social, econômico e político de forma crítica da sociedade. Ao mesmo tempo, as situações que condicionam os olhares das pessoas para as crises climáticas no mundo, também despertam em cada um maneiras de repensar o como nos relacionamos com o ambiente.

Diante do exposto, as Conferências abrem caminhos pela Educação Ambiental, de modo a se intensificar práticas que possibilitem ações junto à população numa construção de conscientização e participação ativa a começar no território vivido, disseminando o conhecimento científico e socializando-o com as gerações ao seu entorno.

Até aqui, a subseção 1 desse capítulo abordou com precisão o descrito, mas é relevante explanar agora, que um dos resultados evidentes dos efeitos climáticos recai sobretudo na população mais vulnerável. O espaço de ocupação deixa de exercer sua função de abrigar, promover emprego, educação e economia rentável para cada um que ali reside, e passa a ser mola propulsora de desigualdade social que impulsiona a pobreza, discussão necessária e presente na subseção 2. Por isso, a Educação ambiental e a alfabetização científica são necessárias, e podem propagar propostas geopolíticas e pedagógicas com intuito de contribuir no fomento de ações emancipatórias e sensibilizadoras nos contextos formais e não-formais da sociedade.

Neste sentido, o capítulo delineia nas subseções 3 e 4 a necessidade e relevância da construção do senso crítico e conhecimento pela educação ambiental, pois são emergentes na ampliação da alfabetização científica para impulsionar ações reais na comunidade sobre pensar o ambiente e seu entorno. A escola se torna veículo dessa alfabetização e protagoniza o estudante para pensar, elaborar, expor e aplicar alternativas e recursos às situações-problema, intervindo junto à comunidade escolar até chegar nas diferentes organizações da sociedade.

Dito isto, a leitura das próximas páginas, nos leva a analisar e evidenciar as situações climáticas por meio da Educação Ambiental no espaço da escola para conscientização e senso crítico a partir da alfabetização científica dos estudantes e da comunidade escolar.

2 O CAMINHAR DA HUMANIDADE EM DIREÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Uma das pautas que está inquietando a humanidade nas últimas décadas é a das mudanças climáticas. Trata-se de um tema que vem sendo debatido pelas principais lideranças mundiais há mais de 30 anos e, de forma sistemática, nas chamadas Conferências das Partes (COPs) que ocorrem anualmente desde 1995. Entre mandatos, relatórios, protocolos, acordos e pactos derivados das COPs, os resultados obtidos estão bem abaixo das metas e tanto o aquecimento global quanto as consequentes mudanças climáticas têm avançado muito nos últimos anos, de forma que já se fala em ponto de não retorno.

Não é objetivo desse texto apresentar um detalhamento minucioso sobre como a humanidade vem tratando dos problemas ambientais e climáticos do planeta. Porém, um pequeno apanhado histórico seria importante para situar e contextualizar essa questão.

Logo após a Segunda Guerra Mundial as primeiras vozes em defesa do meio ambiente começaram a surgir, mas foi na década de 1960 que publicações e mobilizações repercutiram de verdade. Dois grandes marcos podem ser destacados: o livro Primavera Silenciosa (1962), com críticas contundentes ao uso de pesticidas em defesa do meio ambiente e, a encomenda de uma pesquisa que o Clube de Roma[5] fez sobre os limites do crescimento (1968), envolvendo temas como energia, poluição, saneamento, saúde, crescimento populacional entre outros. Porém, o relatório intitulado “Limites do crescimento” só foi publicado em 1972 (AMARAL, 2018).

No início da década de 1970 começou-se a falar em educação ambiental, com alertas efetivos sobre a importância de se inserir nos currículos escolares abordagens

[5] Clube de Roma é um grupo de pessoas de diversas comunidades (cientistas, políticos, empresários, de grupos financeiros, religiosos, culturais) que debatiam temas como política, economia, meio ambiente, desenvolvimento. Foi fundado em 1968 pelo industrial Aurelio Peccei (italiano) e pelo cientista Alexander King (escossez).

sobre o tema. A primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano aconteceu em 1972, na Suécia e foi um marco extraordinário de discussão em nível planetário sobre temas ambientais. Porém, somente três anos mais tarde, em 1975 a Unesco promoveu um evento sobre Educação Ambiental, quando foi criado o Programa Internacional de Educação Ambiental (PIEA) e, em 1977, em Tblisi, capital da Geórgia, aconteceu a Primeira Conferência Intergovernamental sobre Educação Ambiental (AMARAL, 2018).

Nos anos de 1980, além de grandes desastres ambientais[6] que chocaram a humanidade, e tornaram urgente a necessidade de ações mundiais em defesa do meio ambiente, houve a publicação do Relatório Nosso Futuro Comum, também chamado Relatório Brundtland (1987), documento elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, onde foi utilizado, pela primeira vez, a expressão desenvolvimento sustentável. Esse relatório apontou que a grande desigualdade entre as populações pobres dos países do terceiro mundo e o consumismo/desperdício exacerbado dos países ricos, eram os principais responsáveis pelos problemas ambientais do planeta. Além disso, o documento trouxe dados sobre aquecimento global, chuva ácida, buracos na camada de ozônio, temas ainda novos naquela época.

Desde então ficou evidente que a principal causa da crise socioambiental do planeta está na racionalidade capitalista que entende a natureza tão somente como recurso, ultrapassando fronteiras nacionais, avançando sobre biomas únicos, sem se importar com seu esgotamento completo. Além disso, a busca do lucro, faz com que os movimentos econômicos, financeiros e de produção envolvam a exploração de alguns países por outros, mais ricos e poderosos, aprofundando desigualdades e a pobreza. Nessas relações, geopolíticas e econômicas, cada vez mais globais, as populações mais vulneráveis do planeta sofrem tanto da perspectiva social, quanto

[6] Entre os grandes desastres ambientais da década de 1980 é possível citar: 1984 vazamento de mais de 40 toneladas de gazes numa fábrica de agrotóxicos em Bhopal, na Índia; 1986 a explosão em quatro reatores nucleares de Chernobil liberando uma radiação dezenas de vezes maior do que das bombas de Hiroshima e Nagasaki; 1987, no Brasil, ocorreu o acidente com o Césio 137 em Goiânia, onde um aparelho de radioterapia foi descartado indevidamente e a contaminação radioativa envolveu centenas de pessoas, direta ou indiretamente; 1989 o petroleiro Exxon Valdez colidiu com rochas submersas na costa do Alaska derramando cerca de 40 milhões e litros de petróleo contaminando as águas e causando a morte de cem mil aves.

ambiental. Assim, muitas críticas ao conceito de desenvolvimento sustentável surgiram, pois

> (...) é preciso escrutinar a ideia de sustentabilidade (...). Essa reflexão crítica somente se torna possível ao se observar a contradição interna do capitalismo, vislumbrando a impossibilidade de realização do equilíbrio de Pareto entre as questões sociais, econômicas e ecológicas dentro de um projeto social e político articulado exclusivamente no interesse da acumulação monopolista das grandes corporações capitalistas (VISEU; MENEGHETTI; SEIFERT, 2012, p. 579).

Chegou-se, então, na década de 1990 com esse cenário: a certeza de que a questão socioambiental planetária é urgente; que a ideia de desenvolvimento sustentável é apenas uma acomodação para o prosseguimento do modo de produção capitalista seguir explorando a natureza e as sociedades; que a educação formal e informal precisa incorporar os temas socioambientais para que as próximas gerações cresçam com outra maneira de compreender e praticar as relações sociedade-natureza. Desafios incomensuráveis.

Nesse contexto, foi na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, ocorrida no Rio de Janeiro, em 1992 que tiveram início os debates em busca de uma economia mais sustentável e o combate ao efeito estufa. Na, então denominada, Rio-92, ou Eco-92 ou ainda Cúpula da Terra, participaram 175 países e entre os debates mais importantes estava a necessidade da estruturação da Educação Ambiental. Em fóruns oficiais e alternativos ao evento as diferentes concepções de educação, de meio ambiente, de ecologia, foram amplamente discutidas e várias propostas elaboradas. Entre as proposições oficiais derivadas da Rio-92 está a ideia da Agenda 21, um plano de ação global que estabelecia diretrizes para o desenvolvimento sustentável para o século XXI. A ideia era capilarizar a Agenda 21 para os diversos níveis administrativos dentro dos países e da sociedade, alcançando as escolas: cada escola deveria elaborar sua Agenda 21. Os temas da Agenda 21 envolviam cuidado com os recursos naturais, combate à pobreza, agricultura sustentável, cidades sustentáveis, proteção à população mais vulnerável, entre outros. Desde então, de forma mais sistemática, a educação formal foi incluída definitivamente no circuito dos debates ambiental.

Outro evento importantíssimo, fruto da Rio-92 foi o tratado internacional para cooperação climática o que, três anos depois, deu origem à primeira COP que foi em

Berlim, na Alemanha. A preocupação com o aquecimento global, evento derivado da forma de produzir, consumir, descartar e da utilização em larga escala de combustíveis fósseis, tem sido constante nas lutas de ambientalistas, nas pesquisas científicas, em alertas de intelectuais e pessoas engajadas na discussão dos problemas socioambientais do planeta. Apesar de terem ocorrido avanços ainda há muito a ser feito para que a temperatura do planeta seja reduzida, ou deixe de aumentar no ritmo intenso que vem acontecendo.

A primeira Conferência das Partes (COP 1) aconteceu em Berlim, Alemanha, em 1995 e nela foram estabelecidas metas para redução da emissão de gases de efeito estufa e firmado parceria entre os países desenvolvidos e subdesenvolvidos com vistas a transferência de tecnologia. Em 1997, em Kyoto, Japão, na COP 3, houve o primeiro acordo com metas estabelecidas para a redução de emissão de poluentes, porém, em 2001 os Estados Unidos da América romperam com o texto e, então, o Protocolo de Kyoto só entrou em vigor em 2005, porque foi necessário agregar outros países até que somassem 55% dos gases emitidos na atmosfera.

A partir da COP 3, em todas as outras seguintes, o Protocolo de Kyoto voltou à pauta em busca de mais definições de metas, de mais consensos, de ampliação de temas. Na COP 15 (2009) foi estabelecida a meta de manter uma elevação máxima da temperatura da Terra em 2 graus Celsius em relação aos níveis pré-industriais. Na COP 16 (2010) foi criado o Fundo Verde do Clima; na COP 18 (2012) decidiu-se que o Protocolo de Kyoto seria estendido até 2020. Então, na COP 21 (2015) ocorreu o Acordo de Paris que estabeleceu o limite de 1,5 graus Celsius para o aumento da temperatura global e nas COPs seguintes os debates seguiram, sempre visando a substituição dos combustíveis fósseis, a consolidação do mercado de créditos de carbono[7], o envolvimento dos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento nos compromissos pelo clima, enfim, muito debate, muito esforço para evitar o aquecimento global.

Em 2025, a COP 30 aconteceu no Brasil, em Belém do Pará, quando completava dez anos do Acordo de Paris. No evento foi destacado que graças aos

[7] Créditos de Carbono são certificados que representam a remoção ou não emissão de uma tonelada de CO2 da atmosfera. Esses certificados são gerados por projetos como energias renováveis, reflorestamento e podem ser vendidos a empresas ou países que não conseguiram reduzir as emissões de gases poluentes na atmosfera.

esforços derivados do Acordo de Paris, o aumento da temperatura global está em 2,5 graus Celsius, muito melhor do que os 4 graus previstos pela ciência anteriormente, mas ainda aquém da meta limite de 1,5 grau.

Contudo, ao observar-se os principais temas abordados na COP30[8] nota-se que a luta é contínua e longínqua, pois no evento continuou em pauta a redução das emissões de gases de efeito estufa; a mitigação e adaptação às mudanças climáticas; o financiamento climático para países em desenvolvimento; as tecnologias de energia renovável e soluções de baixo carbono. Porém, por ter ocorrido no âmbito da Amazônia, fortaleceram-se as discussões sobre a necessidade de preservação de florestas e biodiversidade; a justiça climática e os impactos sociais das mudanças climáticas.

Percebe-se, então, que os esforços para minimizar e postergar o aquecimento global e as mudanças climáticas, vêm ocorrendo, e não podem parar. Apesar disso, os eventos climáticos extremos já começam a afetar a vida em diversas partes do planeta, ano após ano, deixando cada vez mais clara a impotência humana diante deles.

Em 2023 a Terra ficou 1,4 grau Celsius mais quente que a média pré-industrial. Ondas de calor intenso ocorreram em diversos lugares do mundo, seguidas de secas severas e queimadas. Em 2024 enchentes devastadoras afetaram o Sul do Brasil, o Oeste da África e o Sul da Ásia. No Brasil o verão de 2024/2025 foi o sexto mais quente desde 1961. Alguns estudos afirmam que 2024 foi o primeiro ano em que se ultrapassou 1,5 grau de aquecimento global. O ano de 2025 foi marcado por incêndios florestais, ciclones e tempestades incomuns, de grande intensidade.

Em 2025, o Brasil registrou 1.493 eventos hidrológicos como secas intensas, alagamentos, transbordamentos de cursos d´água, cheias, enxurradas, deslizamento de terra etc., sendo 1.336 de pequeno porte; 146 de médio porte e 11 de grande, com a predominância de inundações, enxurradas e deslizamentos de terra. (Brasil, 2026; Rodrigues, 2025). A previsão para 2026 é o retorno de El Niño e todas as suas consequências, não apenas para o Brasil, mas para o mundo.

[8] Informações oficiais sobre a COP 30 e detalhes específicos sobre os resultados podem ser obtidos em https://unfccc.int/.

Diante de todo esse quadro, cabe destacar a necessidade de engajamento de todos em ações de combate ao aquecimento global. Do indivíduo ao Estado, do Estado aos blocos regionais, dos blocos regionais ao grande capital produtivo global. Não será tarefa fácil e todo esforço será importante. No que diz respeito ao papel da educação nessa tarefa é o que será tratado agora, neste texto.

3 EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

É importante reforçar mais uma vez a responsabilidade do ser humano pelo ambiente, que, de acordo com Silva (2020), é um tema que tem ganhado destaque entre a população mundial nas últimas décadas. Diferentes governos, nações e entidades sociais debatem esse tema também na atualidade. Percebemos que as consequências que vem da crise ambiental e climática assumem proporções globais, afetando e envolvendo todas as pessoas.

Já é conhecimento de todos, através de diversas evidências, de que a natureza vem reagindo em decorrência dos excessos provocados pela sociedade capitalista. “A partir do momento em que o homem desconsiderou as interações entre essas intervenções e o ambiente em que se realizam, abriu-se margem à atual crise ambiental e climática” (SILVA, 2007, p. 17).

Fazendo um paralelo com tudo isso, é igualmente reconhecido que a ciência e a tecnologia podem promover melhorias na vida das pessoas, melhorando o conforto, combatendo doenças e até mesmo facilitando o trabalho. Porém, esse avanço científico e tecnológico pode impactar diretamente o ambiente de várias formas, trazendo problemas para a sociedade. A partir disso, podemos entender que a tão importante ciência que constrói, também pode trazer dor e destruição. (SILVA, 2020).

Nessa linha, todos esses problemas ambientais e climáticos se devem ao atual modelo de desenvolvimento social e econômico, o qual se baseia principalmente na desigualdade, o que não beneficia a todos de forma igual. (SILVA, 2007).

Para Silva (2020), Além das consequências associadas ao desenvolvimento econômico e tecnológico, existe também um crescimento alarmante nas cidades, devido ao grande processo de urbanização e industrialização sem planejamento, o qual ocasiona violência, marginalização social, aumentando ainda mais a

desigualdade. Layrargues (2002) assume que essas questões são fáceis de perceber nos países com baixos indicador e econômicos e sociais, e que essas causas possuem origem em uma perspectiva instrumental do mundo, própria da sociedade em que surgiram.

A concepção de mundo utilitarista que conhecemos, ameaça a extinção dos recursos naturais de maneira ampla, entre suas diversas formas de vida, bem como o próprio desaparecimento do ser humano, diante da crescente destruição da base natural necessária ao desenvolvimento da sociedade, ou seja, o próprio ambiente (SILVA, 2007). Diante desta visão, para Velloso (2006) a forma que o que chamamos de crise ambiental e climática, podemos muito bem entender também como uma crise civilizatória, da forma que não podemos separar ambiente e sociedade.

Diante disso, feito uma reflexão sobre as tomadas de decisões sociais, em um cenário definido pela constante degradação do ambiente, para Silva (2020), se mostra cada vez mais fundamental a concepção de novas abordagens educativas da Educação Ambiental. Os que atuam na área da Educação Ambiental têm cada vez mais tomado consciência da riqueza e do quão vasta é a esfera educativa que ajudam a desenvolver.

Atualmente, podemos notar que o ambiente não é apenas um objeto de estudo ou um tema a ser discutido entre tantos outros, para Sauvé (2005, p. 317) ela considera que o meio ambiente é a “teia” da própria vida, que é “ali onde se encontram natureza e cultura; o meio ambiente é o cadinho em que se forjam nossa identidade, nossas relações com os outros, nosso ‘ser-no mundo’”.

Enquanto o conceito de Educação Ambiental, para Sauvé (2005), não é um simples instrumento para a resolução de problemas ou de gestão do ambiente. Consiste em uma dimensão essencial da educação básica, dos cidadãos e se relaciona com um campo de interações que está na base do desenvolvimento pessoal, cultural, social, econômico e político.

Sabemos que normalmente para a população em geral, quando se fala em Educação Ambiental ou Meio Ambiente, persiste uma tendência a se pensar apenas nas questões biológicas envolvidas. Porém, de acordo com Reigota (2009), não se resume em apenas garantir a preservação ou conservação de determinadas espécies de animais ou plantas, ou dos recursos naturais, lembrando que essas questões

também são importantes. Esses elementos devem ser conectados com os problemas sociais e políticos que normalmente provocam a extinção de espécies.

Partindo desta ideia, a Educação Ambiental em sua vertente crítica, acaba se inserindo como um importante elemento e pode trazer alternativas que sejam de grande ajuda para um melhor enfrentamento dessas questões, até porque, para que esse conflito ocorra, a sociedade necessita ser consciente e ativa politicamente, como também alfabetizada cientificamente (GUIMARÃES; VASCONCELLOS, 2006; MORAIS, 2012).

Narcizo (2009) destaca que as escolas não devem desenvolver a Educação Ambiental apenas por se tratar de uma orientação presente em documentos educacionais, mas principalmente por uma questão ética e moral. Trata-se de reconhecer que os seres humanos não são os únicos habitantes do planeta e que não possuem o direito de explorar ou degradar o ambiente de maneira indiscriminada, considerando que os recursos naturais também devem ser preservados para as futuras gerações.

Deste modo, Silva (2020), entende que os educadores se tornam peça fundamental nesse processo, uma vez que são profissionais com a tarefa de conscientizar e sensibilizar os estudantes para a importância de preservar a natureza, ou seja, o ambiente em que vivemos, portanto, apresentar para eles toda a complexidade social e política por trás desse processo.

Dentro do contexto educacional, ao refletir sobre as obras de Paulo Freire, Medeiros *et al.* (2011) compreendem que o educador tem como missão, conectar o conteúdo das ciências aos assuntos do dia a dia e isso acaba por tornar a aprendizagem com mais significado e contextualizada.

Ainda para os autores, as diferentes abordagens educativas desenvolvidas durante as aulas, devem ser realizadas com base nas vivências dos estudantes e dos fenômenos que ocorrem no seu cotidiano, procurando uma forma de aprofundá-los com ajuda dos conceitos científicos adequados.

Nesse sentido, para Branco *et al.* (2018) a Educação Ambiental tem como papel o de conduzir a novas iniciativas, bem como desenvolver novas práticas a fim de romper com antigos paradigmas da sociedade, formando cidadãos críticos e

participativos, conscientes das decisões sociais e políticas, com seu olhar indo além dos aspectos naturais.

De acordo com Reigota (2009), as questões ambientais se consolidaram como uma nova necessidade para a educação formal, visto que apresentam uma dependência cada vez maior do conhecimento científico, constituindo-se como uma das principais preocupações do mundo moderno. Ainda segundo o autor, a Educação Ambiental pode facilitar na resolução dos problemas ambientais e climáticos atuais, além de estimular uma melhor qualidade de vida para os cidadãos, se configurando também como uma importante aliada até mesmo em questões de ordem filosófica.

Nesse sentido, a educação pode ajudar no enfrentamento dos problemas sociais. De forma isolada, não. Muito menos quando se limita apenas ao princípio da educação formal, permanecendo restrita ao espaço escolar e afastada dos contextos sociais mais amplos. Sob essa visão, podemos observar a utilização do conhecimento para reforçar as regras vigentes e ampliar as desigualdades (MORAIS, 2012)

Apesar de a Educação Ambiental ser frequentemente associada à educação formal e às questões ligadas apenas à natureza, é importante compreender que esse campo vai além dessas limitações. Para Sauvé (2005), existem diferentes práticas educativas pelas quais a Educação Ambiental pode se desenvolver, não cabendo essa responsabilidade apenas aos espaços formais de educação. Assim, as reflexões sobre as questões ambientais também podem ser construídas em diferentes ambientes educativos, ultrapassando os muros da escola.

Atualmente, entre os educadores vem se tornando cada vez mais evidente que a educação não se limita às escolas ou ao contexto familiar. O processo educativo ocorre em diferentes contextos, institucionalizados ou não, por meio de variadas práticas e modalidades. Vasconcellos (2008) afirma que a formação do cidadão acontece em espaços coletivos, de modo que a educação deve ser compreendida como um processo comunitário, no qual diferentes instituições sociais também assumem responsabilidades, não cabendo essa tarefa apenas à escola.

No intuito de buscar uma definição para espaço não formal, é importante inicialmente compreender o que é espaço formal de educação. O espaço formal está relacionado às instituições escolares da Educação Básica e do Ensino Superior. A educação formal, de acordo com Gomes (2014, p. 25-26), é hierarquicamente

estruturada e compreende os sistemas de ensino que vão da Educação Básica ao Ensino Superior, incluindo estudos acadêmicos e diferentes programas de formação profissional.

Segundo Chagas (1993), a educação formal caracteriza-se por ser altamente estruturada e desenvolvida no interior de instituições próprias, nas quais os estudantes seguem programas previamente estabelecidos. A partir dessa compreensão, é possível inferir que o espaço não formal corresponde a qualquer espaço diferente da escola onde possa ocorrer uma ação educativa (JACOBUCCI, 2008).

Junto a isso, Gomes (2014) define educação informal como a aprendizagem adquirida ao longo da vida, na qual cada indivíduo desenvolve atitudes, valores, habilidades e conhecimentos a partir da experiência diária e das influências presentes em seu ambiente de convivência.

Sendo assim, de acordo com Jardim (2013), jardins botânicos, zoológicos, parques e até mesmo museus também se classificam como espaços não formais de aprendizagem. Esses ambientes diferem dos espaços formais, pois não apresentam a mesma formalidade ou organização sistemática dos conteúdos, podendo ser caracterizados como complementares à escola.

Dessa forma, os espaços não formais de educação, tornam-se importantes aliados no desenvolvimento de práticas educativas voltadas às questões ambientais e climáticas. Esses ambientes possibilitam experiências de aprendizagem mais dinâmicas, nas quais os indivíduos podem estabelecer relações entre os conhecimentos científicos e os fenômenos observados em seu cotidiano (MARANDINO, 2008). Nesse sentido, ao promover vivências educativas que ultrapassam os limites da sala de aula, esses espaços contribuem para a formação de cidadãos mais críticos, conscientes e participativos diante dos desafios socioambientais contemporâneos. Assim, a articulação entre educação ambiental, educação climática e diferentes contextos educativos torna-se fundamental para o fortalecimento de uma cultura de responsabilidade coletiva em relação ao planeta.

4 A CRISE CLIMÁTICA COMO DESAFIO EDUCACIONAL CONTEMPORÂNEO

Diante do agravamento da crise climática e do aumento de eventos climáticos extremos em diferentes regiões do planeta, torna-se cada vez mais evidente que o enfrentamento desse problema não pode permanecer restrito aos campos da política ambiental, da economia e da ciência. A crise climática interpela também o campo educacional, na medida em que exige a formação de sujeitos capazes de compreender criticamente as relações entre sociedade e natureza, identificando processos históricos que (re)produzem vulnerabilidades socioambientais e participando de ações de mitigação e adaptação. Contudo, não se trata apenas de acrescentar um novo tema à lista de conteúdos escolares, mas de reconhecer que a emergência climática impõe um desafio formativo mais amplo, ligado à construção de conhecimentos, valores e práticas que permitem interpretar a realidade através da educação climática e ambiental.

> Por se tratar de um problema humanitário, a MC [Mudança Climática] não deve se fazer presente, apenas, no ambiente escolar, mas, sim, no dia a dia de todos, para que, dessa forma, ações de enfrentamento sejam pensadas e colocadas em prática, com o intuito de minimizar os danos causados ao Planeta Terra e aos seres humanos. Nesse sentido, é importante refletir sobre como educar, motivar e mobilizar as pessoas, em geral, para o enfrentamento da crise climática (WARNAVA *et al.*, 2024)

No Brasil, embora a discussão sobre mudanças climáticas esteja presente há décadas no campo científico e em políticas ambientais, sua incorporação mais sistemática no campo educacional ainda é muito recente. A primeira Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA), instituída em 1999, não faz nenhuma referência direta sobre a questão climática ao estabelecer a educação ambiental como um processo em que o "[...] indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade" (BRASIL, 1999). Nem mesmo as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental (DCNEA), aprovadas por meio da Resolução do MEC/CNE nº 2, de 15 de junho de 2012, dão a devida importância para as questões climáticas nos seus objetivos e orientações.

Com o estabelecimento da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) em 2017, que normatizou a educação brasileira e definiu as aprendizagens essenciais para toda a Educação Básica, era de se esperar que esse tema estivesse mais presente nas normativas e orientações pedagógicas. No entanto, a realidade mostra que houve poucos avanços sobre os desafios que envolvem as questões climáticas no contexto da BNCC. “O tema MC [Mudança Climática] é citado, apenas, três vezes na BNCC, de forma genérica e nada propositivo, considerando que não estão previstas, de forma explícita, competências e habilidades a respeito do assunto” (WARNAVA *et al.*, 2024). Outra observação sobre a BNCC que reforça a escassez sobre o tema é o fato de que as três referências diretas às mudanças climáticas ocorrem apenas na etapa do Ensino Médio (BRASIL, 2018). Nos demais níveis de ensino, há a indicação de estudos sobre dinâmicas, padrões e fenômenos climáticos nos componentes curriculares de Ciências e Geografia, de forma fragmentada e não interdisciplinar (BRASIL, 2018).

A forma simplista e falha como a temática é proposta pela BNCC também se reflete nos materiais didáticos produzidos. Um estudo analisou uma coleção de livros didáticos de Ciências da Natureza, após a reforma da BNCC do Novo Ensino Médio, e constatou que tanto o material do aluno quanto do professor “não oferece subsídios adequados para a compreensão do panorama da crise climática, carecendo de respaldo didático e metodológico. Além disso, embora a BNCC defenda a interdisciplinaridade, essa proposta permanece, na prática, restrita ao papel” (LOUREIRO; ELIAS; SHIMAMOTO, 2025, p.18). Ainda que os livros didáticos não devam funcionar como um manual de instruções pedagógico, é inegável que eles são uma ferramenta pedagógica importante, sobretudo quando pensamos nos mais diversos contextos escolares em escala nacional. Nesse sentido, “a construção de livros didáticos exige uma reformulação cuidadosa, conduzida por profissionais da educação e por especialistas que compreendam e saibam transmitir o conhecimento sobre as mudanças climáticas à luz do conhecimento científico” (LOUREIRO; ELIAS; SHIMAMOTO, 2025, p.18).

Seguindo a cronologia legislativa da educação climática e ambiental, é importante destacar que no ano de 2022 houve uma singela mudança na PNEA (BRASIL, 1999) através da Lei nº 14.393, de 4 de julho de 2022. Essa alteração

determinou que seja celebrada anualmente a Campanha Junho Verde com ações para “desenvolver o entendimento da população acerca da importância da conservação dos ecossistemas naturais e de todos os seres vivos e do controle da poluição e da degradação dos recursos naturais, para as presentes e futuras gerações” (BRASIL, 2022). No contexto da educação ambiental, essa mudança indica que essas atividades extrapolam o contexto escolar e que também devem ser exercidas em espaços não formais de ensino; envolvendo poder público, universidades, empresas públicas e privadas, igrejas, comércio, entidades da sociedade civil, comunidades tradicionais e populações indígenas. No que tange as questões climáticas, essa alteração faz uma única menção, indicando a promoção de “debate sobre as mudanças climáticas e seus impactos nas cidades e no meio rural, com a participação dos Poderes Legislativos estaduais, distrital e municipais” (BRASIL, 2022).

De fato, a mudança mais expressiva ocorreu apenas recentemente, através da Lei nº 14.926, de 17 de julho de 2024, que definiu novas alterações na PNEA (BRASIL, 1999) a fim de “assegurar atenção às mudanças do clima, à proteção da biodiversidade e aos riscos e vulnerabilidades a desastres socioambientais” (BRASIL, 2024). A nova legislação atualiza a versão original de 1999, incluindo as mudanças climáticas, proteção da biodiversidade e prevenção de desastres socioambientais como eixos centrais da educação ambiental tanto no nível da educação básica quanto da educação superior.

> A Lei 14.926 de 2024 é um marco na educação ambiental no Brasil, destacando-se por sua importância em integrar o ensino climático e ambiental ao currículo escolar. Em um país como o Brasil, com imensa biodiversidade e recursos naturais estratégicos, essa iniciativa reflete a necessidade de preparar as futuras gerações para compreender e enfrentar os desafios ambientais. [...] A implementação dessa lei ganha ainda mais relevância devido à posição estratégica do Brasil como guardião de riquezas naturais, como a Amazônia [...] Incorporar a educação ambiental no currículo é uma forma de promover o entendimento sobre a interdependência entre o equilíbrio ecológico e a sobrevivência humana, além de destacar o papel do Brasil na conservação ambiental global (SANTOS *et al.*, 2025, p. 2391)

As alterações na Política Nacional de Educação Ambiental produzidas pela Lei 14.926/2024 são “uma resposta direta aos desafios climáticos do século XXI. A legislação promove uma visão transformadora da escola como um espaço de

aprendizado e prática sustentável, alinhado à realidade socioambiental do país" (SANTOS *et al.*, 2025, p. 2398). Além disso, a nova legislação também reforça a importância de educação ambiental em espaços não formais ao destacar a "sensibilização da sociedade para a relevância das ações de prevenção, de mitigação e de adaptação relacionadas às mudanças do clima e aos desastres socioambientais, bem como ao estancamento da perda de biodiversidade" (BRASIL, 2024).

Quando tratamos de educação ambiental e mudanças climáticas, é fundamental que haja uma conexão entre políticas de escala local e global. Saindo do contexto nacional e observando o tema pela perspectiva internacional, notamos que a dificuldade em curricularizar a temática climática não é um problema exclusivamente brasileiro. Em 2021, a UNESCO[9] publicou o relatório[10] de uma pesquisa realizada em 100 países do mundo, que indica que apenas 53% dos currículos educacionais nacionais do mundo fazem algum tipo de menção as mudanças climáticas. A metodologia consistiu na análise de 129 documentos normativos, em 16 línguas diferentes, distribuídos geograficamente em 100 países distintos, buscando palavras-chaves relacionados às mudanças climáticas, incluindo: gases de efeito estufa, aquecimento global, mudanças climáticas, crise climática e carbono. Foram tomadas medidas para reduzir a probabilidade de identificar referências mais genéricas a termos como "clima".

Os resultados apontaram que 47% dos documentos analisados não fizeram nenhuma menção aos termos escolhidos, 40% fizeram menções muito mínimas, 11% tiveram menções mínimas e apenas 2% obtiveram menções moderadas[11]. O relatório também indicou que apenas os documentos originários das regiões do Leste e Sudeste Asiático e da América Latina e Caribe incluíram um foco moderado nas mudanças climáticas. A pesquisa ainda envolveu entrevistas com 58 mil professores, onde apenas 40% dos entrevistados afirmaram sentir confiança para ensinar sobre a

9 A UNESCO é a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, uma agência especializada da ONU (Organização das Nações Unidas), fundada em 1945 com o objetivo de promover a paz e segurança no mundo através da educação.

10 O título original do relatório em inglês é "Getting every school climate-ready: how countries are integrating climate change issues in education" e está disponível através do link https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379591 (Acesso em 14 de março de 2026).

11 As categorias utilizadas foram: sem foco (0 em um milhão de palavras), foco muito mínimo (1 a 300 palavras por milhão de palavras), foco mínimo (301 a 1000 palavras por milhão de palavras) ou foco moderado (mais de 1000 palavras por milhão de palavras). Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379591 (Acesso em 14 de março de 2026).

gravidade da emergência climática e apenas cerca de um terço sente-se capaz de explicar os impactos das mudanças climáticas na região ou localidade onde vivem.

Os resultados são preocupantes, pois mostram uma discrepância entre os currículos escolares no mundo e a realidade das mudanças climáticas. Por esse motivo, a agência da ONU recomenda integrar de forma mais sistemática as mudanças climáticas nos currículos nacionais, em todos os níveis e disciplinas de ensino, dando respaldo para que professores e gestores escolares sintam-se mais preparados para ensinar sobre o tema. O estudo também aponta que os países mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas são os que possuem maior probabilidade de incluir conteúdo em seus currículos nacionais, mas que é urgente ampliar essa lógica para os países mais responsáveis pelas causas das mudanças climáticas. Desta forma, países industrializados, que historicamente contribuíram mais para as emissões de gases do efeito estufa, têm um papel fundamental na educação.

Diante desse conjunto de elementos, é evidente que a inserção da temática climática nos currículos e normativas educacionais ainda ocorre de forma desigual, fragmentada e, muitas vezes, insuficiente diante da magnitude da crise ambiental contemporânea. No caso brasileiro, apesar da existência de alguns instrumentos normativos relevantes – como a BNCC, a PNEA e suas alterações legislativas mais recentes —, a temática das mudanças climáticas ainda não ocupa posição central nas orientações curriculares nem nas práticas pedagógicas.

Ao mesmo tempo, a literatura acadêmica e a ONU apontam que a educação ambiental climática constitui dimensão fundamental para ampliar a compreensão pública sobre o fenômeno, estimular formas mais críticas de participação social e fomentar a autonomia resolutiva diante dos desafios ambientais e climáticos. Nesse sentido, discutir o lugar das mudanças climáticas no currículo e nas políticas públicas implica também refletir sobre os processos de formação científica e cidadã promovidos pelas escolas, universidades, governos, empresas, indústrias e comunidades tradicionais. A crise climática, ao exigir interpretação crítica de evidências científicas, análise de informações complexas e posicionamento diante de problemas socioambientais globais, coloca em evidência a importância da alfabetização científica como elemento central da formação escolar contemporânea.

5 POPULARIZAÇÃO DA CIÊNCIA, COMUNICAÇÃO PÚBLICA E O PAPEL DAS GEOCIÊNCIAS NA SOCIEDADE

Ao longo das páginas da parte anterior, pela intencionalidade a partir das sessões dessa parte, dos estudos sobre mudanças climáticas e climatologia de forma interdisciplinar, compreendemos a necessidade de uma conscientização ampla que impulsione além de reflexões e discussões, ações preventivas de sustentabilidade passíveis de execução para impulsionar as pessoas e a sociedade. Por isso, o olhar voltasse para o âmbito da escola e da sala de aula por constituírem espaços de desenvolvimento de atividades científicas e construção do conhecimento.

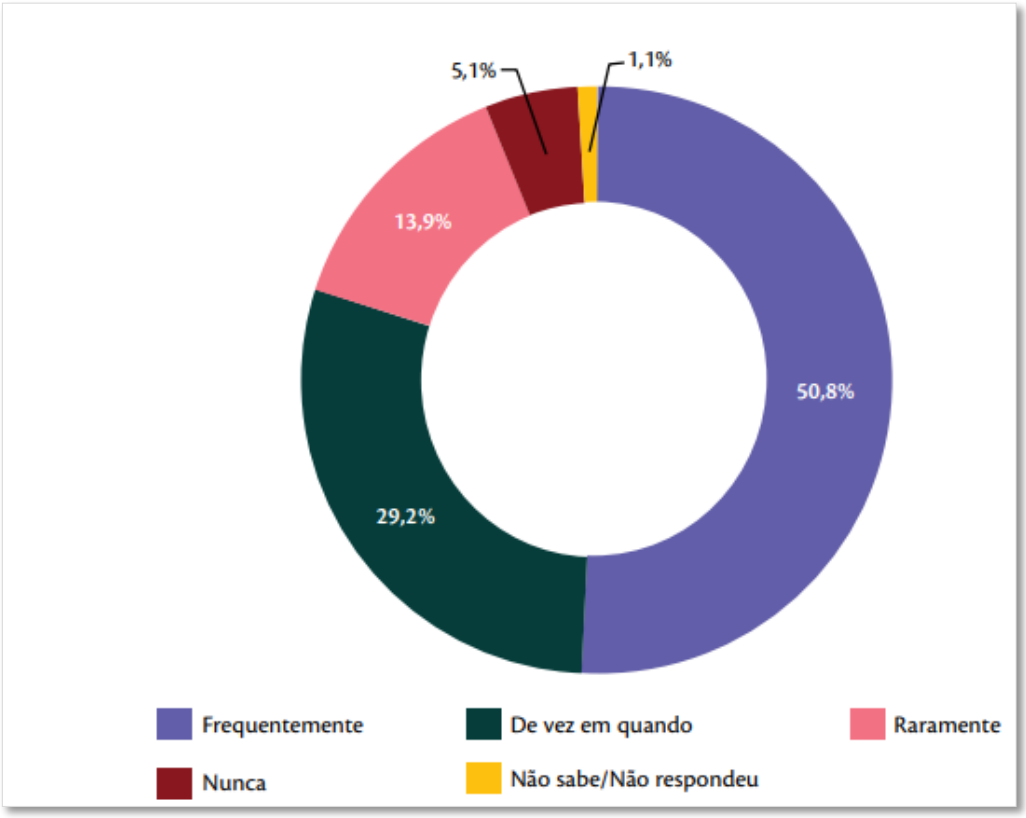
Nesse contexto descrito, inclui-se às atividades científicas e ao conhecimento o escopo do social e cultural advindos do ambiente onde ocorre a atividade científica com situação-problema que submerge como elemento investigativo. Contudo, dois elementos são importantíssimos autonomia e integridade, uma vez que, o conhecimento científico, as atividades e as investigação científica estão diretamente vinculadas a pesquisa científica e a ciência, Sasseron (2018). Toda e qualquer pesquisa parte da observação sobre a prática que está carregada de cultura e conhecimento dos que nela estão envolvidos. “O propósito da investigação científica não é apenas descreve, catalogar ou mesmo explicar o que está presente em nossa experiência cotidiana, mas facilitar predição, intervenção, controle e outras formas de ação nos e entre objetos da natureza.” Longino (2002, *apud* Sasseron, 2008, p. 37). Complementar ao exposto, resultados e achados de uma pesquisa, por meio da investigação científica, não podem impulsionar o negacionismo - fenômeno de negar a ciência para produzir a dúvida e a ignorância, nem o senso comum advindo da propagação midiática, pois na complexa rede de informações que são utilizadas para formar uma pesquisa científica são fontes de pesquisa e permeiam resultados e dados, crenças, hábitos, conhecimentos sistematizados tidos como exemplos fixos, práticas, tradições orais e habilidades produzidas pelas pessoas na sociedade.

De acordo com a Pesquisa de Percepção pública C&T no Brasil -2023 (CGEE, 2024) [12]no item referente à Desinformação e *fake news,* temos resultados expressivos

[12] A pesquisa Percepção pública da ciência e tecnologia no Brasil traça um perfil socioeconômico e comportamental dos entrevistados, coleta percepções, conhecimentos e consumos a respeito de temas

a começar pelas fontes de informações que os participantes ditam ter confiabilidade na busca para validar uma informação independente da natureza dessa fonte de pesquisa.

Gráfico 1 – Frequência no contato com *fake news*



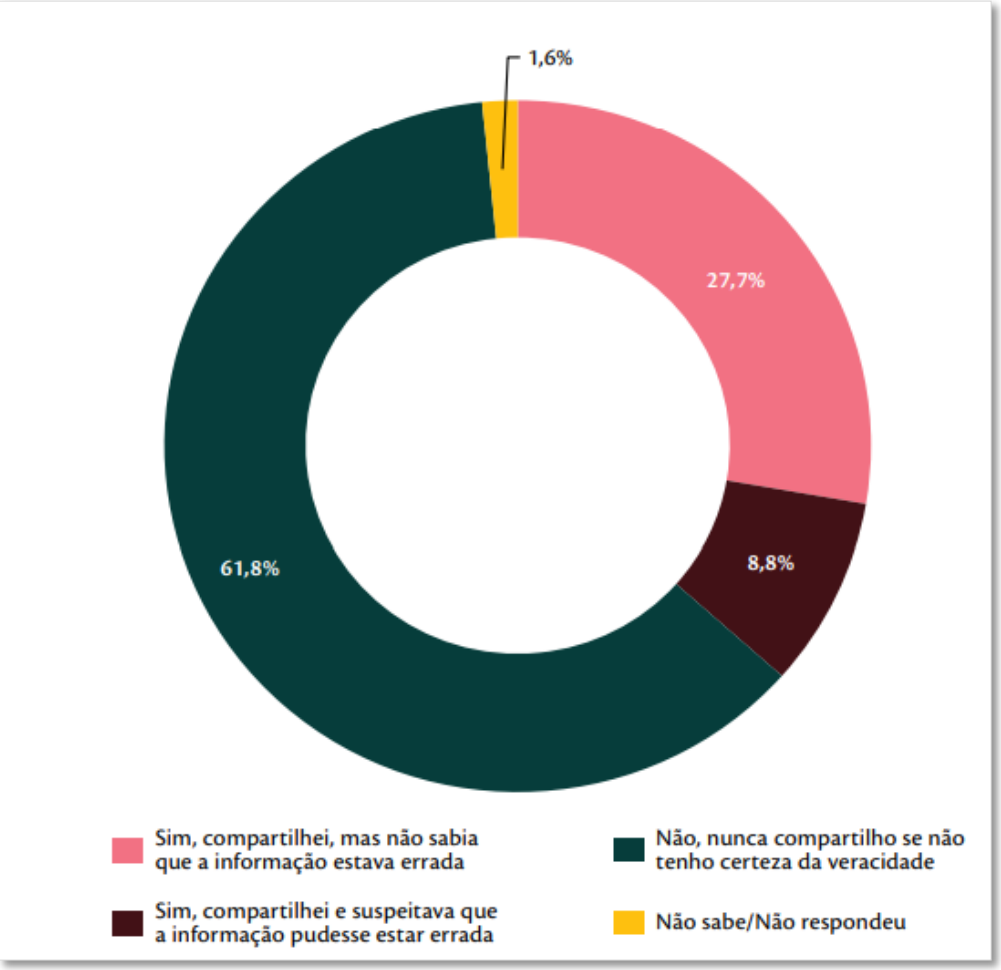
Fonte: CGEE (2024).

> Quando se trata do compartilhamento de fake news, cerca de 36,5% dos entrevistados admitem já ter compartilhado informações falsas com amigos, parentes ou na internet (independentemente de suspeitar ou não se a informação era falsa). Em contrapartida, a maioria dos entrevistados (61,8%) afirma que nunca compartilhariam informações caso não tivessem certeza de sua veracidade. Esse comportamento evidencia uma consciência na maioria do público sobre a importância da verificação de informações antes de compartilhá-las, contribuindo para diminuir a propagação de fake news. (CGEE, 2024, p.20)

---

relacionados à ciência e tecnologia (C&T). Para essa pesquisa, realizadas entre 14 de novembro e 3 de dezembro de 2023, publicada em 2024, contou-se com a aplicação de questionário com 43 perguntas gerais, desdobradas em outras mais específicas, com amostra probabilística por conglomerado (cluster) regionalizada. A amostragem é de 1.9311 pessoas com idade superior a 16 anos (cotas por gênero, idade, escolaridade, renda e local de moradia em todas as regiões do País), e os dados do Censo Populacional de 2022. Para a concretização da pesquisa no campo, foi necessária uma equipe composta por 57 entrevistadores, 8 verificadores de qualidade e 5 supervisores – todos os profissionais com habilidades e experiências correlatas ao objeto da pesquisa, a partir de formações multidisciplinares, como ciências sociais, administração e demografia. (CGEE, 2024, p.9)

Gráfico 2 – Compartilhamento de *fake news* e suspeita na veracidade das informações

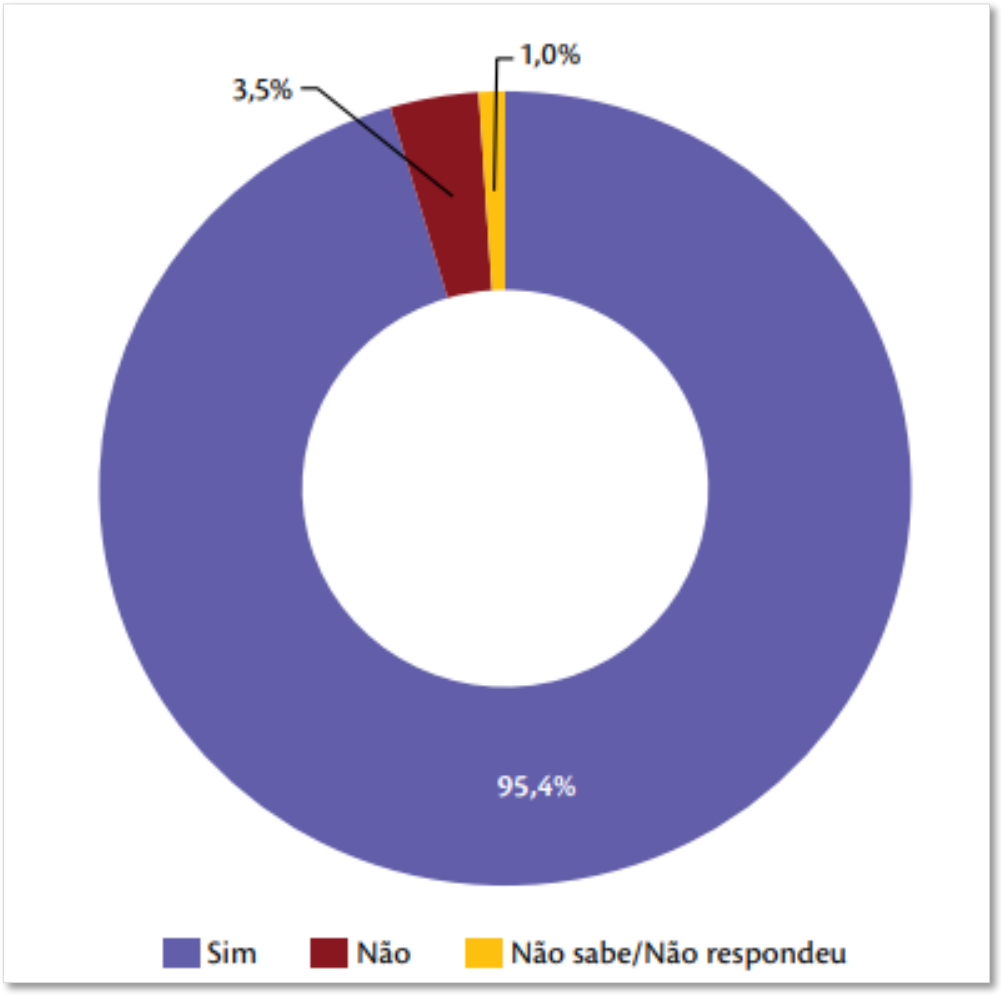


Fonte: Fonte: CGEE (2024).

> Quando se trata do compartilhamento de fake news, cerca de 36,5% dos entrevistados admitem já ter compartilhado informações falsas com amigos, parentes ou na internet (independentemente de suspeitar ou não se a informação era falsa). Em contrapartida, a maioria dos entrevistados (61,8%) afirma que nunca compartilhariam informações caso não tivessem certeza de sua veracidade. Esse comportamento evidencia uma consciência na maioria do público sobre a importância da verificação de informações antes de compartilhá-las, contribuindo para diminuir a propagação de fake news. (CGEE, 2024, p.20)

Ainda sobre as percepções das pessoas participantes da pesquisa, mas agora no campo das mudanças climáticas, tem-se o seguinte cenário: “A grande maioria dos entrevistados afirmou ter consciência de que as mudanças climáticas estão acontecendo (95,4%), enquanto apenas 3,5% afirmaram que não.” (2024, p.22)

Gráfico 3 – Consciência das mudanças climáticas



Fonte: Fonte: CGEE (2024).

Com o crescimento no consumo de informações indexadas e publicadas pelas mídias sociais é perceptível, pelos dados representativos da pesquisa, sobre 3 temas questionados, que é de extremamente relevante campanhas de alfabetização científica e conscientização para educação em ciência.

A “cegueira intelectual” não pode adentrar o espaço da escola e da sala de aula, isso contribuiu para o aumento da incapacidade de uso da alfabetização científica, pela baixa compreensão e aplicação de conceitos científicos ao pensar e resolver fenômenos e situações problemas que os envolvem numa perspectiva científica.

Neste sentido, ao que se apresenta nos campos dessa parte, o ensino na área da Geociências não pode ter a prerrogativa formativa do século passado com o

desenvolvimento da técnica pela técnica. O tempo hodierno, coloca os estudantes como participantes ativos na construção, exploração e análise das situações problemas de fenômenos naturais. E, isso, permite que eles confrontem os conteúdos científicos apreendidos na escola, não somente nesse espaço, mas façam conexões com os campos do pensamento científico por meio de metodologias, planos de investigação, ações de divulgação e disseminação de ideias e critérios para se chegar às resoluções do problema.

Para tal, os debates organizados e dirigidos sobre os conteúdos das disciplinas como, já descrito anteriormente, mudanças climáticas e climatológica, por exemplo, fomentam as interações e promovem linguagem e alfabetização científica que desinstalam negacionismo e senso comum advindo da mídia, o que provoca o distanciamento dos estudantes de pensar sobre e a partir da realidade.

Diante do exposto até aqui, o olhar do(a) professor(a) se volta para entender como oportunizar aos estudantes conhecimentos necessários para integrar a linguagem e o posicionamento crítico sobre o que acontece no mundo, os fenômenos naturais que o impactam, e até alteram estruturas físicas e humanas na Terra.

O conhecimento que aqui enfatizamos refere-se não apenas, por parte do estudante, reconhecer conceitos, nomenclaturas e componentes fundantes, que envolvem a ciência no campo que é dela, mas traz para a sua formação comprometimento, percepção, construção de aprender cientificamente os fenômenos naturais e seus impactos, e as mudanças climáticas que não estão à margem dessa ciência, na verdade da Geociências. A Geociências é uma ciência que faz uso de conceitos que são comuns às outras ciências para na prática construir métodos investigativos que despertam a curiosidade do estudante e o conduz ao pensamento, saber científico.

Mas como professores nos perguntamos, qual caminho seguir, ou mesmo por onde devo começar?

Um dos caminhos, e que vamos tratar aqui, acontece por meio da alfabetização científica, embora para alguns pesquisadores a colocam num entendimento mais amplo da educação que seria alfabetização científica, isso por envolver níveis de complexidade diferentes que podem iniciar, numa simples atividade da escrita inicial das palavras até a elaboração de um artigo científico, projeto ambiental. Pelos estudos

e vivências de Paulo Freire, a alfabetização é mais que simples domínio psicológico e mecânico de técnicas de escrever e de ler. É o domínio destas técnicas em termos conscientes. [...] Implica numa autoformação de que possa resultar uma postura interferente do homem sobre seu contexto. (1980, p. 111). Ao aprofundarmos um pouco mais, ainda na vertente desse autor e pesquisador, a alfabetização envolve leitura de mundo e envolve se tornar um cidadão conscientemente crítico.

Contribuindo com Paulo Freire, Sasseron nos traz uma visão clara e objetiva do que é a alfabetização científica, independente se autores utilizam termo alfabetização, enculturação científica ou letramento, alfabetização científica no contexto que estamos falando se configura, por exemplo, para o Ensino de Ciências

> (...) registro claro da intenção de formação capaz de prover condições para que temas e situações envolvendo as ciências sejam analisados à luz dos conhecimentos científicos, sejam estes conceitos ou aspectos do próprio fazer científico. Pode-se afirmar que a Alfabetização Científica, ao fim, revela-se como a capacidade construída para a análise e a avaliação de situações que permitam ou culminem com a tomada de decisões e o posicionamento. (2015, p.56)

E complementa,

> Alfabetização Científica é vista como processo e, por isso, como contínua. Ela não se encerra no tempo e não se encerra em si mesma: assim como a própria ciência, a Alfabetização Científica deve estar sempre em construção, englobando novos conhecimentos pela análise e em decorrência de novas situações; de mesmo modo, são essas situações e esses novos conhecimentos que impactam os processos de construção de entendimento e de tomada de decisões e posicionamentos e que evidenciam as relações entre as ciências, a sociedade e as distintas áreas de conhecimento, ampliando os âmbitos e as perspectivas associadas à Alfabetização Científica. (2015, p.56)

Contudo, se faz necessário reconhece que no caminho da alfabetização cientifica, tem-se postulado Eixos estruturantes que servem de suporte para planejamento, idealização e análise de uma proposta de ensino por meio da alfabetização científica. E para que possamos compreender como estão organizados esses eixos, Sasseron organiza-os dessa forma didática e objetiva.

Quadro 1 – Eixos Estruturantes da Alfabetização Científica

Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais, a importância deles reside na necessidade exigida em nossa sociedade de se compreender conceitos-chave como forma de poder entender até mesmo pequenas informações e situações do dia a dia.	compreensão da natureza da ciência e dos fatores éticos e políticos que circundam sua prática, pois, em nosso cotidiano, sempre nos defrontamos com informações e conjuntos de novas circunstâncias que nos exigem reflexões e análises considerando-se o contexto antes de proceder. Tendo em mente a forma como as investigações científicas são realizadas, podemos encontrar subsídios para o exame de problemas do dia a dia que envolvam conceitos científicos ou conhecimentos advindos deles.	compreende o entendimento das relações existentes entre ciência, tecnologia, sociedade e meio-ambiente, perpassa pelo reconhecimento de que quase todo fato da vida de alguém tem sido influenciado, de alguma maneira, pelas ciências e tecnologias. Neste sentido, mostra-se fundamental de ser trabalhado quando temos em mente o desejo de um futuro saudável e sustentável para a sociedade e o planeta.

Fonte: Sasseron e Carvalho (2008, p.335)

Os eixos (Quadro 1) são importantes para que o(a) professor(a), ao propor atividades, desperte nos estudantes a importância de um ensino capaz de fornecer não apenas conceitos e noções científicas dos conteúdos da disciplina, mas que os estudantes “façam” ciência e confrontem os conhecimentos apreendidos com problemas reais e investigativos de tal forma que apresentem resoluções, respostas de maneira crítica, passem a entende na profundidade as situações cotidianas da comunidade, sociedade e do ambiente.

Nas relações didáticas da práxis docente, percorrer os conteúdos no campo da Alfabetização Científica também exige compreensão e estudos sobre as esferas da Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA). Isso pode ocorrer por meio de duas estruturas que são: Argumentação e Análise em sala de aula.

> Argumentação: envolve levantamento de dados, conclusões, justificativas, conhecimento anterior e qualificadores sobre uma situação ou um fato, e podem dar ênfase à afirmação situação ou refutação a ela. Análise: qualificar o argumento a partir da seguinte classificação: Nível 0 - aqueles que se dão quando há afirmações isoladas sem justificativa, ou quando há afirmações que competem sem justificativas. Argumentos do Nível 1 - são afirmações isoladas com justificativa. Nível 2 - afirmações competem havendo justificativas. Nível 3 - aparecem as afirmações que competem com justificativas e qualificadores e as afirmações que competem com justificativas e trazendo refutadores. Nível 4 - aparece quando se faz julgamentos integrando diferentes argumentos. Driver, Newton e Osborne (1997, citados por Sasseron e Carvalho, 2008, p.337)

Dessa forma, a alfabetização científica acontece no envolvimento dos estudos teóricos, da pesquisa e da prática num movimento não linear movido por duas engrenagens argumentação e análise de dados, evidências e variáveis sobre uma situação, fenômeno envesgado em sala de aula e no ambiente onde ele se constituiu. A forma como o(a) professo(a) dará movimento, força e impulso à essa engrenagem junto aos estudantes, será por meio das informações trabalhadas, depuradas e discutidas até transformarem-se em estruturas de um argumento.

As perguntas realizadas para a investigação, desencadeiam a participação dos estudantes pela oralidade dos relatos que se formam e irão constituir análise e resultados com dados, num primeiro momento, empíricos, depois confrontados com outras situações, até passar pela construção de hipóteses levantadas pelos estudantes, chegando nas evidências para se aproximar e traçar condições variáveis de uma resolução do problema, conforme ilustra Sasseron (Quadro 2).

Quadro 2 – Práticas científicas por ensino de investigação à luz da Alfabetização Científica

Prática científica	Descrição
Trabalho com novas informações	Coletar informações em diferentes fontes e por diferentes modos como, por exemplo, mediação e observação. Organizar informações em quadros, tabelas, gráficos. Comparar informações. Constatar, dentre as informações, variáveis relevantes ao problema.
Levantamento de hipóteses e proposição de planos de ação para testes	Levantar hipóteses para resolução de um problema. Construir planos de ação para testar hipóteses Construir teste de controle de variáveis. Manejar equipamentos para observação de hipóteses.
Construção de explicações, a elaboração de justificativas, limites e provisões	Relacionar ações realizadas e reações obtidas. Construir explicações científicas baseadas em informações obtidas. Considerar limites de validade para as explicações. Prever resultados em situações semelhantes.

Fonte: Sansseron (2018, p.48)

É evidente que o trabalho didático-pedagógico docente é intenso com intuito de que os estudantes despertem para a importância do fazer científico pela Alfabetização Científica, por meio do ensino por investigação. Esse trabalho está pautado entre práticas científicas e epistêmicas, embora diferentes entre si, mas complementares quando os temas das ciências são estudos, pesquisados num desenvolvimento de ações concomitantes para a resolução de um problema. É no exercício da oferta de

uma Alfabetização Científica na sala de aula e para fora dela que ocorre essas práticas para o desenvolvimento e compreensão do fazer ciências e do pensamento científico. Considerando os conhecimentos explorados e descritos até essa seção do capítulo, desenvolver práticas possíveis de serem realizadas em sala de aula, pelo(a) professor(a), que envolvam participação, oralidade e intervenção dos estudantes, sobre uma situação-problema ou as temáticas sociais relacionadas a mudanças climáticas, ambiente, sociedade são possíveis pela Educação Ambiental junto a escola e comunidade escolar.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo buscou proporcionar reflexões e apontar a necessidade de ampliar pesquisas futuras sobre os impasses ambientais e sociais que ficam evidentes quanto à crise climática. Temas esses que se colocam também na esfera educacional, tendo a educação como instrumento que aproxima o acontecido, o fenômeno à realidade para um entendimento crítico, de formação e transformação refletidos inseridos no processo de aprendizado e de participação ativa não somente do estudante, mas da comunidade escolar.

As situações climáticas compreendidas, por meio da Educação Ambiental, no espaço da escola, devem desencadear nos estudantes práticas sociais dinâmicas, reais e interventivas, num primeiro momento no próprio local onde residem. Com a ampliação das atividades, debates e tomadas de decisões no coletivo, a conscientização e o senso crítico ultrapassam o patamar de escolarização e ganham visibilidade na sociedade. Dessa forma, tem-se a relevância da alfabetização científica para dar movimento a ciência, e não permanecer na aceitação de argumentos rasos, sem fundamentação científica, de que as mudanças climáticas são uma ilusão que busca apenas atrapalhar a ordem capitalista mundial.

É preciso ressignificar o olhar do estudante para que perceba o seu papel e atuação no mundo, no local onde está. As mudanças climáticas que atravessam territórios de vulnerabilidade precisa ser pauta de diálogo não somente na mesa política, mas na escola porque reflete nela e nos que dela fazem parte exigindo de todos o entendimento crítico da relação individuo-ambiente-sociedade, pois não são

independentes. Por isso, problematizar as questões relacionadas às mudanças climáticas resulta em novos comportamentos das pessoas com o ambiente numa construção para viabilizar Educação Ambiental de forma dialógica e ativa na escola e seu entorno.

Em último momento, mas não menos relevante, o papel da escola na superação da crise climática implica desenvolver senso crítico com a alfabetização científica dos estudantes para incorporar e disseminar conhecimento e ciência.

REFERÊNCIAS

AMARAL, A. Q. Panorama histórico da Temática Ambiental e Educação Ambiental: um campo em constante (re)construção. **Revista Eletrônica Mestrado Educação Ambiental**. Rio Grande, v. 35, n. 2, p. 248-271, maio/ago. 2018. E-ISSN 1517-1256

BRANCO, E. P.; ROYER, M. R.; BRANCO, A. B. G. **A abordagem da Educação Ambiental nos PCNs, nas DCNs e na BNCC.** *Nuances*, São Paulo, 2018.

BRASIL. **Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999**. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 abr. 1999. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm>. Acesso em: 14 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.393, de 4 de julho de 2022**. Altera a Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999, que dispõe sobre a Política Nacional de Educação Ambiental, para instituir a Campanha Junho Verde. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 jul. 2022. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/Lei/L14393.htm>. Acesso em: 14 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.926, de 17 de julho de 2024**. Altera a Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999, para assegurar atenção às mudanças do clima, à proteção da biodiversidade e aos riscos e vulnerabilidades a desastres socioambientais no âmbito da Política Nacional de Educação Ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 jul. 2024. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14926.htm>. Acesso em: 14 mar. 2026.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular.** Brasília, DF: MEC, 2018. Disponível em: <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/>. Acesso em: 14 mar. 2026.

BRASIL. **Estado do clima, extremos de clima e desastres no Brasil em 2025**. Relatório Anual. Volume 02. CEMADEN Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Fevereiro 2026. ISSN: 3086-4364. Disponível: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/estado-do-clima-extremos-de-clima-e-desastres-no-

brasil/estado-do-clima-extremos-de-clima-e-desastres-no-brasil-02-2026/relatorioclimaextremosdesastresbrasil2025.pdf. Acesso em: 25 set. 2026

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) Pesquisa de percepção pública C&T no Brasil - 2023. Resumo executivo. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2024.30p. ISBN – 978-65-5775-080-3. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/37878/43769/CGEE_OCTI_Resumo_Executivo-Perc_Pub_CT_Br_2023.pdf. Acesso em: 1 de fev. 2026.

CHAGAS, I. Aprendizagem não formal/formal das ciências: relações entre os museus de ciências e as escolas. **Revista de Educação,** Lisboa, 1993.

DIAS, E. dos S. Os (des)encontros internacionais sobre meio ambiente: da Conferência de Estocolmo à Rio + 20 – Expectativas e Contradições. **Caderno Prudentino de Geografia***,* Presidente Prudente, n. 39 v. 1, p. 06-33, Jan./Jun., 2017.

DRIVER, Rosalind, NEWTON, Paulo Eduardo e Jonathan ORBORNE. **Estabelecendo as normas da Argumentação Científica na sala de aula.** ESERA Conference, Roma, 1997. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283625616_Establishing_the_norms_of_scientific_argumentation_in_classrooms Acesso em: 22 Fev. 2026.

FREIRE, Paulo. **Educação como prática de liberdade.** 40. ed. São Paulo: Paz e Terra, 1980. Disponível em: https://nepegeo.paginas.ufsc.br/files/2018/11/Paulo-Freire-Educa%C3%A7%C3%A3o-como-pr%C3%A1tica-da-liberdade.pdf Acesso em: 15 Fev. 2026.

GOMES, A. L. **A mediação num museu de ciências**: a perspectiva do mediador. 2014. Dissertação, Mestrado em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

GUIMARÃES, M.; VASCONCELLOS, M. M. N. Relações entre educação ambiental e educação em ciências na complementaridade dos espaços formais e não formais de educação. **Educar em Revista**, Curitiba, 2006.

JACOBUCCI, D. F. C. Contribuições dos espaços não-formais de educação para a formação da cultura científica. **Em Extensão**, Uberlândia, v. 7, 2008.

JARDIM, W. S. **Museu de ciências**: uma proposta de ensino para espaços não formais. 2013. Dissertação, Mestrado em Ensino de Físic, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

LAYRARGUES, P. P. Muito prazer, sou a Educação Ambiental, seu novo objeto de estudo sociológico. In: **Anais**. Encontro da Associação Nacional de pós-graduação e pesquisa em ambiente e sociedade, Indaiatuba. 2002.

LOUREIRO, A. B.; ELIAS, M. A.; SHIMAMOTO, C. Y. **BNCC e mudanças climáticas**: análise de uma coleção de livros didáticos do novo ensino médio. **ACTIO: Docência em Ciências**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 1–22, 2025. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/actio/article/view/19630>. Acesso em: 14 mar. 2026.

MARANDINO, M. *et al.* **Educação em museus**: a mediação em foco. São Paulo: Geenf, 2008.

MEDEIROS, A. B. *et al.* A importância da Educação Ambiental na escola nas séries iniciais. **Revista Faculdade Monte Belos**, 2011.

MORAIS, E. H. M. **Os museus de ciências como território da educação ambiental**: o caso do Museu de Ciências da Terra Alexis Dorofeef, Viçosa – MG. 2012. Dissertação, Mestrado em Educação, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

NARCIZO, K. R. S. Uma análise sobre a importância de trabalhar Educação Ambiental nas escolas. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, Rio Grande, 2009.

UNESCO. **Getting every school climate-ready: how countries are integrating climate change issues in education**. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2021. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379591>. Acesso em: 14 mar. 2026.

REIGOTA, M. **O que é educação ambiental**. 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 2009.

RODRIGUES, Alex. Extremos de clima: Desastres climáticos afetaram mais de 336 mil pessoas no país, em 2025. Notícia. Eixos, 27 fevereiro de 2026. Disponível em https://eixos.com.br/transicao-energetica/desastres-climaticos-afetaram-mais-de-336-mil-pessoas-no-pais-em-2025/. Acessado em 28/02/2026.

SANTOS, A. N. S. dos; FELIPPE, J. N. O.; SILVA, K. L.; SOUZA JÚNIOR, P. R. de; SALGADO, J. J. de F.; ASSUNÇÃO, I. D.; XAVIER, T. da S.; GUIMARÃES, A. F.; TERTO, F. L.; DI MIGUELI, C. O.; FIGUEIREDO, J. M.; BARBOSA, L. D. N. da S.; SILVA, R. H. da; ARAÚJO, H. C. de. Emergência climática e educação: impactos no meio ambiente e a transformação do currículo escolar pela Lei 14.926 de 2024. Aracê, São José dos Pinhais, v. 7, n. 1, p. 2379–2400, 2025. DOI: https://doi.org/10.56238/arev7n1-144

SASSERON, Lucia Helena e CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Almejando a alfabetização científica no ensino fundamental: a proposição e a procura de indicadores do processo. **Investigações em Ensino de Ciências**. v.13(3), 2008. p.333-352. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/001708591 Acesso em: 20 Fev 2026.

SASSERON, Lucia Helena. Alfabetização científica, Ensino por Investigação e Argumentação: relações entre ciências da natureza e escola. **Revista Ensaio.** Belo

Horizonte. v.17 n. especial. 2015. p. 49-67. DOI - http://dx.doi.org/10.1590/1983-2117201517s04. Disponível em: https://www.scielo.br/j/epec/a/K556Lc5V7Lnh8QcckBTTMcq/?format=pdf&lang=pt Acesso em: 21 Fev. 2026.

SASSERON, Lucia Helena. **Práticas em aula de ciências:** o estabelecimento de interações discursivas no ensino por investigação. Tese de Livre Docência. USP, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/48/486/tde-01082019-120320/publico/SasseronLuciaLD.pdf . Acesso em: 14 fev. 2026.

SAUVÉ, L. Educação ambiental: possibilidades e limitações. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 31, n. 2, 2005.

SILVA, A. F. **Os museus de ciências como espaço da educação ambiental**: um estudo de caso do Museu Parque da Ciência Newton Freire Maia. 2020. Dissertação (Mestrado em Formação Científica, Educacional e Tecnológica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SILVA, V. A. **A relação entre a Educação Ambiental Formal e Não-Formal**: um estudo de caso do Parque Natural Municipal da Taquara e as escolas do entorno. 2007. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Duque de Caxias, 2007.

VASCONCELLOS, M. M. N. **Educação ambiental na colaboração entre museus e escolas**: limites, tensionamentos e possibilidades para a realização de um projeto político pedagógico emancipatório. 2008. Tese, Doutorado em Educação, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2008.

VELLOSO, C. S. **Educação ambiental na rede pública do município do Rio de Janeiro**: concepções, problemas e desafios. 2006. Dissertação, Mestrado em Educação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

VISEU, F.; MENEGHETTI, F. K.; SEIFERT, R. E. Por uma crítica ao conceito de desenvolvimento sustentável. **Caderno EBAPE.BR**, v. 10, nº 3, artigo 6, Rio de Janeiro, Set. 2012.

WARNAVA, F. P.; MAGNANTE, H. J. S.; MAJEWSKI, A. S.; CARVALHO, L. F. A.; JAROMINEK, É. G. F.; SILVA, F. A. da; ZAKRZEVSKI, S. B. B. Mudança climática: reflexões sobre a inclusão da temática no currículo escolar e na formação de professores. **Perspectiva**, Erechim, v. 48, n. 182, p. 37–50, 2024. DOI: https://doi.org/10.31512/persp.v.48.n.182.2024.407.p.37-50.

CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA NA ESCOLA: APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E PROTAGONISMO ESTUDANTIL DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Stella Maris Benitez – Centro Universitário Internacional Uninter[1]
Maria Eneida Fantin – Centro Universitário Internacional Uninter[2]
Mariana Andreotti Dias – Universidade do Estado do Rio de Janeiro[3]
Vera Cristina Scheller dos Santos Rocha – Centro Universitário Internacional Uninter[4]
Franciele Marilies Estevam – Centro Universitário Internacional Uninter[5]

1 INTRODUÇÃO

A climatologia geográfica tem adquirido relevância crescente diante dos desafios ambientais contemporâneos - intensificação dos eventos extremos e as mudanças climáticas globais, por sua leitura crítica dos fenômenos naturais e também sociais que produzem riscos e vulnerabilidades intensos e desiguais. Diante dessa singular construção histórico-científica, torna-se fundamental evidenciar e potencializar esse campo do conhecimento na educação em seus diferentes níveis e estágios.com o objetivo de promover uma compreensão crítica e responsável acerca do clima e de suas implicações socioambientais.

[1]Pós-graduada e licenciada em Geografia pelo Centro Universitário Internacional Uninter – stellabenitez.aluno@unipampa.edu.br
[2] Bacharela e Licenciada em Geografia, Especialista em Antropologia Social, Mestra em Tecnologia – eneida.fa@uninter.com
[3] Bacharela, Licenciada, Mestra e Doutora em Geografia, Pós-doutorado em Demografia, Pesquisadora Visitante no Programa de Pós-graduação em Geografia da UERJ – marianaandreotti@gmail.com
[4] Licenciada, Bacharela e Mestra em Geografia – vera.r@uninter.com
[5] Licenciada, Bacharela e Mestra em Geografia, Bacharela em Turismo – franciele.e@uninter.com

O estudo da climatologia geográfica nas escolas abre espaço para que os estudantes se aproximem do clima de forma mais significativa, especialmente quando articulado a novas tecnologias e a metodologias que valorizam a participação ativa. Nesse contexto, o objetivo não é apenas reconhecer e diferenciar tipos de clima, mas desenvolver uma percepção climática que permita compreender como os fenômenos atmosféricos fazem parte do cotidiano e interferem diretamente na vida das pessoas e na organização do espaço. Ao substituir práticas tradicionais, centradas na memorização de conceitos, por propostas mais investigativas, contextualizadas e dialógicas, o ensino da climatologia passa a estimular a observação, a reflexão e o senso de responsabilidade sobre as questões climáticas.

Estudos no campo da Climatologia Geográfica Escolar apontam que os desafios do ensino do clima vão além do conteudismo e revelam uma lacuna teórica mais profunda, relacionada à dificuldade de tratar o clima como um processo dinâmico, vivido e socialmente construído. Assim, trabalhar a climatologia na escola significa também formar sujeitos mais atentos às transformações ambientais e mais conscientes de seu papel frente aos desafios climáticos contemporâneos.

Ao analisarem 130 trabalhos publicados nos anais do Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Steinke e Silva (2019) constataram que apenas 4% das pesquisas se dedicaram a discutir teoricamente a contribuição do componente climático para a interpretação da espacialidade. Tal dado revela que, mesmo no campo acadêmico, ainda predomina uma abordagem fragmentada e pouco articulada aos fundamentos epistemológicos necessários.

Nessa perspectiva, o presente capítulo propõe abordar a climatologia geográfica de forma contextualizada, partindo de experiências pedagógicas que aproximam o conteúdo das vivências dos estudantes e os convidam a olhar com mais atenção para o espaço onde vivem. O objetivo não é apenas reconhecer características climáticas da região, mas compreender como os fenômenos atmosféricos se manifestam no cotidiano; como variam no espaço e no tempo; e de que maneira influenciam a organização do território e a vida das pessoas.

As práticas pedagógicas desenvolvidas priorizam o envolvimento direto dos estudantes em atividades de investigação, como pesquisas de campo, observação sistemática, levantamento e organização de dados, favorecendo a análise crítica das

condições climáticas locais. Ao vivenciar esse processo, os estudantes passam a compreender as variações climáticas em escala local e regional e a reconhecer o papel do clima nas dinâmicas sociais, ambientais e territoriais, construindo uma leitura mais integrada e significativa da climatologia geográfica.

Desta forma, o capítulo foi desenvolvido por meio da observação e análise de projetos práticos interdisciplinares voltados ao ensino da climatologia geográfica, em dois Estados brasileiros: Amazonas e Rio Grande do Sul. A escolha desses estados se justifica por sua grande extensão territorial e pelas marcantes diferenças climáticas entre as regiões. Além disso, ambos apresentam iniciativas de educação ambiental nas escolas, que buscam conscientizar estudantes de diferentes idades sobre a importância da preservação e conservação do meio ambiente. Nesse contexto, foram analisados projetos pedagógicos que aproximam os alunos da realidade climática local, incentivando a investigação, a compreensão dos fenômenos naturais e o desenvolvimento de uma postura crítica e responsável em relação ao ambiente em que vivem. Assim, foram avaliados os resultados dessas experiências, buscando compreender de que forma contribuem para uma aprendizagem mais significativa sobre o tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As intensas alterações na atmosfera advindas do modo de produção e vida das sociedades modernas tem intensificado processos meteorológicos naturais, asseverando eventos climáticos e destinando riscos e vulnerabilidades para as populações. Diante disso, discutir tais questões e entraves para os seres vivos é emergencial, principalmente no que tange às desigualdades socioambientais.

A climatologia geográfica, estudada no âmbito da Geografia Física, permite analisar os processos atmosféricos e suas implicações na vida cotidiana, além de auxiliar atividades econômicas, como as plantações, por meio da identificação dos períodos de chuva e seca nas diversas regiões brasileiras (AYOADE, 1996). A perspectiva de uma climatologia geográfica destina-se a compreender as espacialidades dos fenômenos meteorológicos e naturais que intensificam seus processos em contextos humanos no espaço geográfico em que estão.

Assim, iniciativas que se destinam a abordar a climatologia geográfica nas escolas mostram-se essenciais por possibilitar a reflexão e letramento climático do meio em que vive. Ao discutir o clima de sua região e os processos advindos dessa característica e classificação, o estudante compreende por que determinados fenômenos ocorrem em seu território e não em outros. Essa reflexão estimula uma percepção crítica e contextualizada do espaço geográfico.

É por meio dessa construção teórica, prática e pedagógica que se inicia a educação ambiental, permitindo que os estudantes identifiquem formas de colaborar com o meio em que vivem — seja por meio do cultivo consciente do solo, da irrigação adequada ou do descarte correto dos resíduos. Tais atitudes contribuem diretamente para o equilíbrio climático e para a construção de um ambiente sustentável (BRASIL, 2001).

A educação ambiental, nesse contexto, atua como medida protetora do clima e incentiva práticas sustentáveis nas comunidades escolares. No entanto, um dos desafios é ampliar a visão dos estudantes para além de sua realidade imediata. É importante que compreendam que as ações locais — como o uso de recursos naturais e o manejo de resíduos — têm impacto não apenas regional, mas também nacional e global (LOUREIRO, 2012).

As práticas pedagógicas e projetos interdisciplinares assumem papel essencial nesse processo. Debate e rodas de conversa, seminários e oficinas que envolvem estudantes, professores e comunidade fortalecem o senso de pertencimento e responsabilidade ambiental. Após as discussões, atividades práticas, como o plantio de árvores, a criação de hortas comunitárias e o manejo adequado do lixo, consolidam o aprendizado e transformam o ambiente escolar em um espaço de vivência e sustentabilidade. Essas ações, segundo Carvalho (2008), são fundamentais para a formação de estudantes críticos e atuantes, capazes de compreender o clima como parte integrante da vida e do equilíbrio planetário.

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), compreender o clima significa entender os processos que regulam a dinâmica da atmosfera e como eles influenciam diretamente a organização do espaço geográfico. No contexto educacional, o ensino da climatologia geográfica possibilita ao estudante reconhecer a interdependência

entre natureza e sociedade, compreendendo que o clima não é apenas um conjunto de elementos e fatores naturais, mas também cultural e social.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC, 2019) propõe que o ensino da Geografia estimule o estudante a compreender as transformações ambientais e as dinâmicas do espaço geográfico. No entanto, a climatologia escolar ainda costuma aparecer na sala de aula de forma fragmentada e excessivamente conteudista.

Em muitos casos, o ensino se concentra na memorização de nomes e classificações — como os tipos de clima, as massas de ar equatorial, tropical e polar, ou ainda conceitos como temperatura, chuva, umidade e pressão atmosférica — apresentados de maneira isolada.

Fenômenos amplamente divulgados, como El Niño, La Niña ou o efeito estufa, acabam sendo tratados como conteúdos distantes, enquanto situações vividas pelos próprios alunos, como enchentes, secas, ondas de calor ou friagens, são discutidas apenas como eventos naturais pontuais.

Ao não relacionar esses fenômenos ao cotidiano, ao lugar onde o estudante vive e às transformações do espaço geográfico, o ensino de climatologia perde a oportunidade de estimular uma compreensão mais crítica do clima e de suas implicações sociais, ambientais e territoriais.

Ao analisar a realidade do ensino de climatologia nas aulas de Geografia, Silva e Cardoso (2019) evidenciam que essa temática ainda enfrenta desafios significativos no contexto escolar, especialmente em função de abordagens superficiais, descontextualizadas e excessivamente dependentes dos livros didáticos.

Segundo as autoras, o ensino do clima, quando desvinculado das relações sociais e do cotidiano dos estudantes, dificulta a compreensão dos fenômenos climáticos e limita a construção de sentidos sobre sua influência na vida diária. Essa forma de abordagem contribui para que a climatologia seja percebida como um conteúdo abstrato e distante, reduzindo seu potencial formativo. As autoras defendem, portanto, a necessidade de articular aulas teóricas e práticas, valorizando a observação, a experimentação e a relação com o espaço vivido, de modo que os estudantes possam compreender a dinâmica climática e reconhecer sua presença nas experiências cotidianas.

Essa perspectiva reforça a importância de um ensino de climatologia que vá além da identificação de elementos ou tipos climáticos, favorecendo a construção da percepção climática e de uma consciência mais crítica sobre os processos atmosféricos e suas implicações socioambientais.

Conforme Callai (2013), ensinar Geografia implica ajudar o estudante a ler o espaço em que vive, desenvolvendo o raciocínio espacial e a percepção do lugar como parte de sua própria experiência cotidiana. Nessa perspectiva, a climatologia geográfica ganha sentido quando ultrapassa a simples apresentação de conceitos e passa a dialogar com a vida concreta, permitindo compreender como o clima influencia práticas sociais, modos de viver e formas de organização do território. Ao tratar o clima a partir do lugar vivido, abrem-se possibilidades para discutir questões contemporâneas como sustentabilidade, mudanças climáticas e impactos ambientais de forma mais próxima e significativa.

Essa compreensão se aproxima do que defende Reigota (2017), ao afirmar que a educação ambiental não deve se limitar à transmissão de informações, mas favorecer a construção de valores, atitudes e práticas comprometidas com a preservação do meio ambiente. Assim, ao articular climatologia, espaço vivido e educação ambiental, o ensino de Geografia contribui para a formação de sujeitos capazes de compreender criticamente sua realidade e de refletir sobre seu papel nas transformações socioambientais do território.

Dentro da abordagem de uma educação ambiental pode-se oportunizar as vivências em climatologia geográfica, por meio de leituras de imagens de satélite, análises do ritmo climático, identificação de eventos climáticos extremos em noticiários, ou até mesmo, pensando nos anos iniciais do ensino fundamental, a observação de precipitações, direção do vento, umidade, temperatura, entre outros.

3 PROJETOS IMPLEMENTADOS E SUGERIDOS SOBRE ENSINO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA

Exemplo notável de experiência pedagógica e projeto interdisciplinar que envolve a climatologia geográfica é o projeto “Medição da temperatura em residências de alvenaria e de madeira existentes na região”. (Quadro 1)

Quadro 1 – Projeto: Medição da temperatura em residências de alvenaria e de madeira existentes na região

Título do projeto:	Medição da temperatura em residências de alvenaria e de madeira existentes na região.
Local de realização:	Centro Educacional Governador Gilberto Mestrinho – Tefé (AM).
Autores / responsáveis:	Professores e estudantes do Ensino Médio da própria escola. Apoio institucionalGoverno do Estado do Amazonas – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM).
Público-alvo:	Professores e estudantes do Ensino Médio e comunidade escolar.
Duração do projeto:	Provavelmente desenvolvida ao longo de um período letivo ou etapas de pesquisa escolar.
Área do conhecimento:	Geografia – Climatologia.
Objetivo:	Compreender o clima local e analisar como diferentes materiais de construção influenciam a temperatura das residências.
Metodologia:	Medição de temperatura em residências de madeira e de alvenaria, coleta e análise de dados, discussão em sala de aula e relação com o clima local.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

A partir de pesquisas realizadas com o auxílio do Chat GPT, foi identificado o projeto. A escolha desse exemplo de projeto se justifica pela relevância da região amazônica no cenário climático do Brasil e pela importância de levar conhecimento científico aos estudantes locais. O projeto foi desenvolvido com alunos do Ensino Médio do Centro Educacional Governador Gilberto Mestrinho, no município de Tefé (AM), com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM).

A atividade utilizou metodologias ativas, nas quais os estudantes realizaram medições de temperatura em residências de madeira e de alvenaria, analisando os dados e relacionando-os ao estudo do clima local, tendo como público-alvo os estudantes do Ensino Médio. A abordagem prática da climatologia geográfica em um

colégio da rede pública do Amazonas representa um exemplo notável de integração entre ciência, tecnologia e educação ambiental, pois integra ciência e educação ambiental ao aproximar os estudantes de práticas simples de investigação, como a medição de diferentes temperaturas em variados tipos de ambientes. Por meio dessas atividades, os alunos compreendem na prática como o clima e os materiais das construções influenciam o conforto térmico das residências. Essa experiência estimula o pensamento crítico e a conscientização sobre a importância da preservação ambiental para a construção de ambientes mais saudáveis para viver.

A autoria do projeto está relacionada às atividades desenvolvidas no próprio Centro Educacional Governador Gilberto Mestrinho, com participação de professores e estudantes do Ensino Médio da escola. A iniciativa foi realizada no ambiente escolar e contou com apoio institucional do Governo do Estado do Amazonas, por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM). Dessa forma, o projeto não se origina diretamente de uma universidade ou coletivo externo, mas de uma prática pedagógica desenvolvida na própria escola, com incentivo de um programa de apoio à pesquisa científica na educação básica.

A metodologia pautou-se nos princípios da aprendizagem significativa (AUSUBEL, 1982) e da educação ambiental crítica (CARVALHO, 2008), permitindo que o aluno se tornasse agente ativo do processo de construção do conhecimento e de transformação de sua realidade.

A proposta consistiu em realizar a medição da temperatura em residências de alvenaria e de madeira existentes na região, comparando as diferenças térmicas entre os dois tipos de moradia. Metodologias empregadas no projeto de acordo com as habilidades da BNCC: Analisar fenômenos climáticos e suas relações com o espaço geográfico; interpretar dados e informações ambientais; desenvolver investigação científica sobre o meio em que vivem; compreender relações entre sociedade, ambiente e qualidade de vida, relacionando tais práticas metodológicas ao PPP da escola o projeto incentiva à pesquisa científica, a aprendizagem ativa e a educação ambiental é contextualizada à realidade regional.

Objetivo: Compreender o clima local e analisar como diferentes materiais de construção influenciam a temperatura das residências uniu as áreas de Geografia e Ciências, permitindo que os estudantes relacionassem os conceitos teóricos da

climatologia geográfica com a realidade cotidiana de suas próprias casas e comunidades.

Durante o desenvolvimento do projeto, os estudantes utilizaram equipamentos de medição meteorológica e programas computacionais especializados, como o QGIS e o ArcGIS, para o processamento e representação espacial dos dados coletados. Além disso, foram realizadas maquetes temáticas, oficinas práticas, entrevistas com professores e colegas e momentos de debate sobre os resultados encontrados.

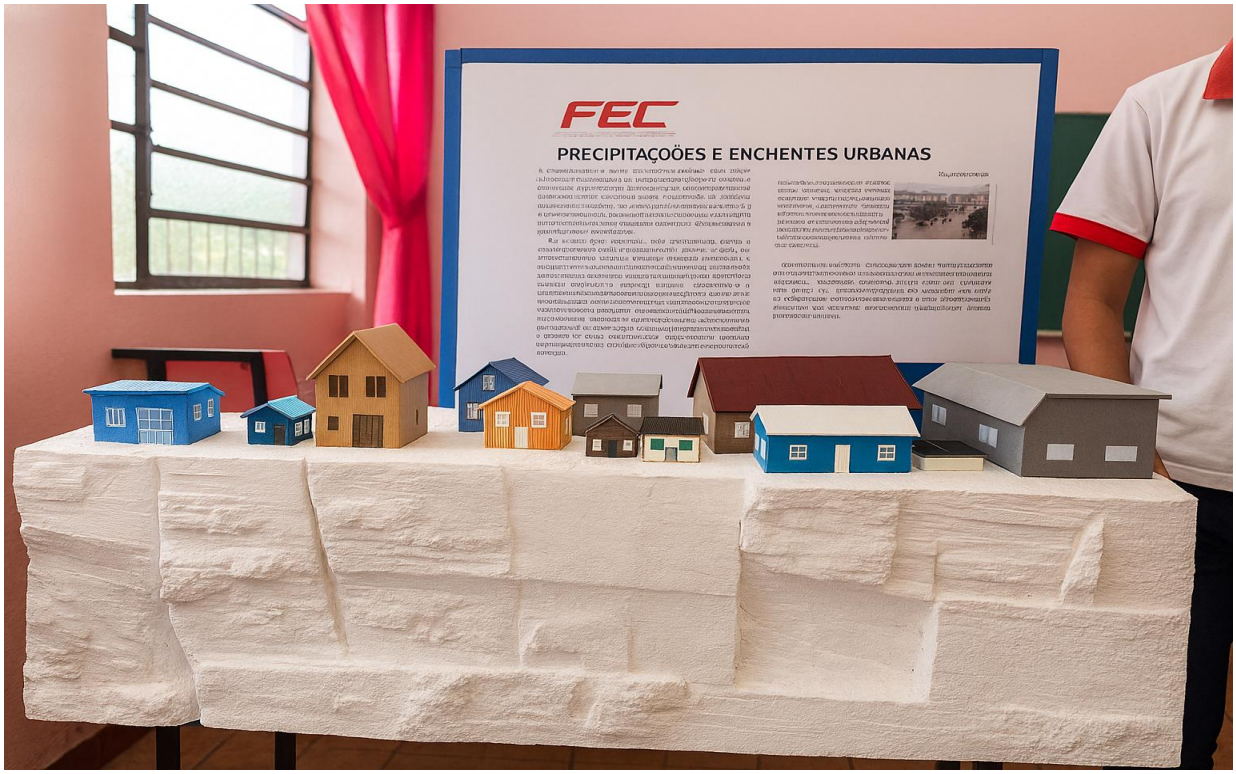
Ao final, os participantes concluíram que as casas de madeira apresentavam maior conforto térmico em dias mais quentes, em comparação às construções de alvenaria — resultado que reforçou a importância da climatologia geográfica como ferramenta de compreensão das relações entre ambiente, moradia e qualidade de vida.

Essa experiência evidenciou como as Metodologias Ativas podem transformar o modo como os estudantes se relacionam com o conhecimento. Ao colocar o aluno como sujeito do processo de aprendizagem, essas metodologias favorecem a investigação, o questionamento e a construção coletiva de saberes, aproximando teoria e prática de forma mais significativa.

Conforme discutem Bacich e Moran (2018), as Metodologias Ativas rompem com a lógica da transmissão passiva de conteúdos e estimulam o protagonismo discente, a tomada de decisões e a reflexão crítica. No projeto, o termo MA foi utilizado para designar práticas pedagógicas baseadas na aprendizagem por investigação, nas quais os estudantes foram convidados a observar fenômenos climáticos, levantar hipóteses, dialogar e analisar situações relacionadas ao seu próprio contexto sociocultural.

Dessa forma, o ensino científico deixou de ser algo distante ou abstrato e passou a dialogar com a realidade vivida pelos alunos, fortalecendo o interesse, a participação e o sentido da aprendizagem.

Figura 1: Maquetes temáticas e exposição na escola



Fonte: Arquivo pessoal do Centro Educacional Governador Gilberto Mestrinho.

Outras propostas metodológicas foram desenvolvidas em diferentes contextos escolares do Rio Grande do Sul, sendo adaptadas conforme o nível de ensino e a realidade de cada instituição. A seguir, são descritos alguns dos projetos práticos, implementados ou sugeridos, que exemplificam estratégias eficazes para o ensino de climatologia geográfica.

O projeto (Quadro 2) teve como propósito compreender a diferença entre tempo atmosférico e clima a partir da observação direta de variáveis meteorológicas. Para isso, os estudantes realizaram medições diárias de temperatura, precipitação e ventos, utilizando instrumentos simples, como termômetro, pluviômetro artesanal e biruta.

Quadro 2 – Projeto: Vivendo a Meteorologia para Construir a Climatologia

Título do projeto:	Vivendo a Meteorologia para Construir a Climatologia.
Local de realização:	Colégio de Aplicação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Porto Alegre/RS.
Autores / responsáveis:	Professores do Colégio de Aplicação da UFRGS e estudantes participantes.
Duração do projeto:	Desenvolvido ao longo de atividades de observação e registro meteorológico durante o período letivo.
Área do conhecimento:	Geografia – Climatologia e Meteorologia.
Objetivo:	Compreender a diferença entre tempo atmosférico e clima por meio da observação direta de variáveis meteorológicas.
Metodologia:	Medições diárias de temperatura, precipitação e vento utilizando instrumentos simples.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Figura 2: Confecção de pluviômetro artesanal com garrafa PET



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Os dados coletados foram registrados em planilhas e posteriormente organizados em tabelas e gráficos, permitindo aos estudantes identificar padrões e variações climáticas locais. As informações foram comparadas com registros oficiais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), favorecendo a análise crítica dos resultados e a contextualização do conteúdo estudado.

Figura 3: Gráficos elaborados por estudantes com base nos registros meteorológicos



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

A socialização dos dados ocorreu por meio da elaboração de murais e apresentações, consolidando o aprendizado e promovendo o protagonismo estudantil. Segundo Ribeiro e Callai (2007), essa prática estimula o raciocínio científico e a compreensão do espaço geográfico como construção dinâmica.

Figura 4: Mural expositivo com os resultados e conclusões do projeto



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

O projeto (Quadro 3) teve como objetivo investigar as variações climáticas dentro do espaço escolar, estimulando a observação e o raciocínio científico. A turma foi dividida em grupos responsáveis pela medição de diferentes variáveis: temperatura, umidade, direção do vento e insolação.

Quadro 3 – Projeto: O Clima da Nossa Escola

Título do projeto:	O Clima da Nossa Escola.
Local de realização:	Escolas públicas do interior do Rio Grande do Sul.
Autores / responsáveis:	Professores das escolas participantes e estudantes envolvidos no projeto.
Duração do projeto:	Desenvolvido ao longo de atividades práticas durante o período letivo, envolvendo etapas de observação, registro e análise dos dados climáticos.
Área do conhecimento:	Geografia – Climatologia e Educação Ambiental.
Objetivo:	Investigar as variações climáticas dentro do espaço escolar, estimulando a observação, a investigação científica e a compreensão do conceito de microclima.
Metodologia:	Divisão da turma em grupos responsáveis pela medição de variáveis climáticas como temperatura, umidade, direção do vento e insolação. As medições foram realizadas em diferentes pontos da escola e em horários variados. Posteriormente, os estudantes organizaram os dados em gráficos e elaboraram mapas térmicos manuais, analisando fatores que influenciam a variação de temperatura, como sombreamento, vegetação e materiais de construção.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

As medições foram realizadas em diversos pontos da escola e em diferentes horários do dia. Posteriormente, os estudantes elaboraram mapas térmicos manuais e gráficos comparativos, analisando os fatores que influenciam a variação térmica — como sombreamento, vegetação e materiais de construção.

Figura 5: Mapa Térmico elaborado coletivamente pelos estudantes



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

A atividade resultou na compreensão do conceito de **microclima** e na valorização de práticas sustentáveis, como o plantio de árvores e a ampliação das áreas sombreadas no ambiente escolar.

Este projeto (Quadro 4) visou relacionar fenômenos climáticos locais aos impactos sociais e ambientais vivenciados pela comunidade escolar. Inicialmente, os estudantes realizaram entrevistas com moradores e familiares sobre eventos climáticos marcantes, como enchentes, geadas e estiagens.

Quadro 4 – Projeto: Clima e Comunidade Riscos e Mudanças Locais

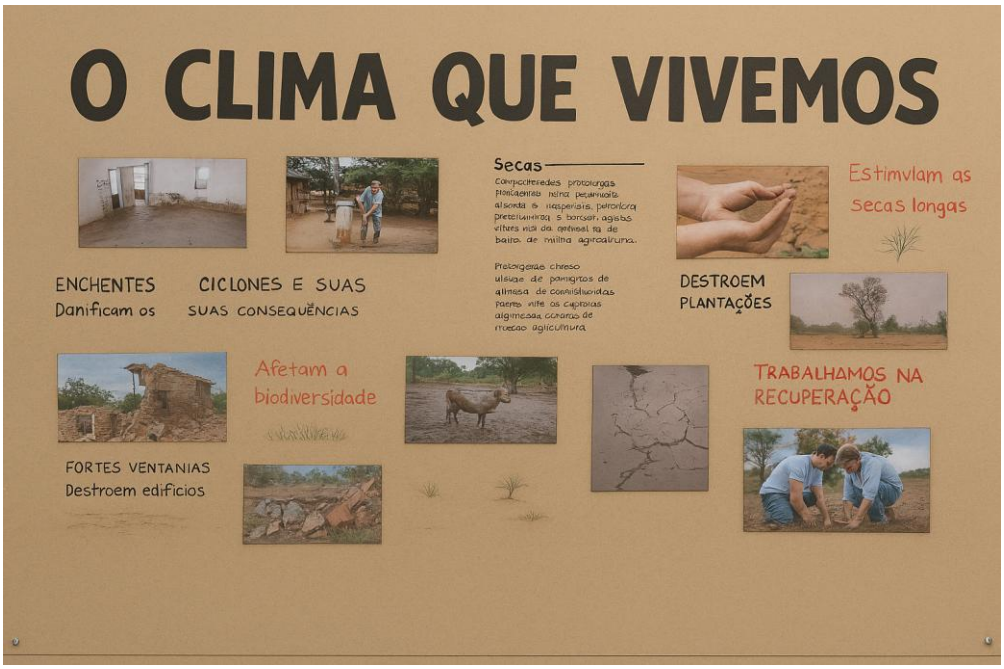
Título do projeto:	Clima e Comunidade: Riscos e Mudanças Locais.
Local de realização:	Escolas de diferentes regiões do Rio Grande do Sul (Campanha, Serra e Litoral).
Autores / responsáveis:	Professores das escolas participantes e estudantes do Ensino Médio.
Público-alvo:	Estudantes do Ensino Médio.
Duração do projeto:	Desenvolvido durante atividades pedagógicas ao longo do período letivo, envolvendo etapas de pesquisa, entrevistas e análise de dados.
Área do conhecimento:	Geografia – Climatologia e Educação Ambiental.

Objetivo:	Relacionar fenômenos climáticos locais aos impactos sociais e ambientais vivenciados pela comunidade, promovendo reflexão sobre mudanças climáticas.
Metodologia:	Realização de entrevistas com moradores e familiares sobre eventos climáticos marcantes (enchentes, geadas e estiagens); análise de reportagens locais e dados meteorológicos históricos; elaboração de murais e campanhas de conscientização ambiental, como o mural “O clima que vivemos”.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Em seguida, foram analisadas reportagens locais e dados meteorológicos históricos, culminando na produção de um mural intitulado *“O clima que vivemos”*. As atividades favoreceram a reflexão sobre os efeitos das mudanças climáticas e incentivaram a elaboração de campanhas de conscientização ambiental.

Figura 7: Mural "O clima que vivemos" produzido pelos estudantes



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

A proposta (Quadro 5) consiste na criação de uma estação meteorológica artesanal, construída com materiais recicláveis (garrafas PET, copos plásticos, canudos e fitas). A estação permitiu o registro diário de dados meteorológicos, que foram analisados e divulgados em painéis mensais.

Quadro 5 – Projeto: Estação Meteorológica Escolar

Título do projeto:	Estação Meteorológica Escolar.
Local de realização:	Escolas urbanas e rurais do Estado.
Autores / responsáveis:	Professores das escolas participantes e estudantes envolvidos no projeto.
Público-alvo:	Estudantes do Ensino Fundamental II e Ensino Médio.
Duração do projeto:	Desenvolvido ao longo do período letivo, com observação e registro diário dos dados meteorológicos.
Área do conhecimento:	Geografia, Ciências, Matemática e Língua Portuguesa.
Objetivo:	Compreender os fenômenos meteorológicos por meio da construção e utilização de uma estação meteorológica artesanal, incentivando a investigação científica e a aprendizagem interdisciplinar.
Metodologia:	Construção de instrumentos meteorológicos com materiais recicláveis (garrafas PET, copos plásticos, canudos e fitas); registro diário de dados como temperatura e precipitação; organização das informações em tabelas e painéis mensais; produção de relatórios e socialização dos resultados

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Figura 8: Montagem dos instrumentos meteorológicos com garrafas PET



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Além da observação dos fenômenos, o projeto promoveu a interdisciplinaridade entre as áreas de Geografia, Ciências, Matemática e Língua Portuguesa, envolvendo a leitura, a escrita e a produção de relatórios técnicos.

Os resultados evidenciaram o potencial das metodologias práticas para a aprendizagem significativa.

Figura 9: Representação ilustrativa da interdisciplinaridade no estudo dos fenômenos climáticos, envolvendo observação, registro de dados e produção de relatórios pelos estudantes



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

O projeto (Quadro 6) busca compreender as causas e consequências das mudanças climáticas globais a partir da realidade local. As atividades incluem exibição de documentários, debates orientados e ações práticas, como o plantio de árvores e a construção de sistemas de captação de água da chuva.

Quadro 6 – Projeto: Mudanças Climáticas e Sustentabilidade

Título do projeto:	Mudanças Climáticas e Sustentabilidade.
Local de realização:	Escolas de Ensino Médio da rede estadual do Rio Grande do Sul.
Autores / responsáveis:	Professores da rede estadual e estudantes participantes.
Público-alvo:	Estudantes do Ensino Médio.

Duração do projeto:	Desenvolvido ao longo do período letivo, envolvendo atividades teóricas, debates e ações práticas.
Área do conhecimento:	Geografia e Educação Ambiental.
Objetivo:	Compreender as causas e consequências das mudanças climáticas globais a partir da realidade local, incentivando a reflexão crítica e atitudes sustentáveis.
Metodologia:	Exibição de documentários, rodas de conversa e debates orientados sobre mudanças climáticas; realização de atividades práticas, como plantio de árvores e construção de sistemas de captação de água da chuva; produção de cartazes e campanhas de conscientização ambiental na escola.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

A proposta amplia o entendimento dos estudantes sobre a relação entre comportamento humano e mudanças ambientais, estimulando a adoção de atitudes sustentáveis e responsáveis.

Figura 12: Cartazes e painéis produzidos pelos estudantes para a campanha "Nossa escola mais sustentável"



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

O diálogo entre Universidade e Escola, a respeito do conhecimento científico e das formas de ensino da climatologia geográfica é essencial e as iniciativas existentes merecem ser mencionadas e valorizadas.

Dessa perspectiva, destaca-se o 17º Seminário de Iniciação Científica, de Extensão e de Pós-Graduação (SIEPE), promovido pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), realizado nos dias 4, 5 e 6 de novembro de 2025, na cidade de Bagé (RS). O evento, intitulado — Aquífero Guarani como Elo Transfronteiriço ǁ, envolveu toda a comunidade acadêmica da instituição, reunindo estudantes de diversos campi do estado (Quadro 7).

Durante o encontro, foram apresentados trabalhos científicos de diferentes áreas do conhecimento, por meio de palestras, exposições de pôsteres e apresentações orais. O principal objetivo do seminário foi promover o diálogo entre fronteiras e integrar múltiplas áreas do saber, fortalecendo as discussões sobre sustentabilidade, recursos hídricos e mudanças climáticas.

Quadro 7 – Iniciativa de integração entre universidade e escola

Evento	Instituição	Local e data	Objetivo
17º Seminário de Iniciação Científica, de Extensão e de Pós-Graduação (SIEPE).	Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) .	Bagé/RS – 4, 5 e 6 de novembro de 2025.	Promover o diálogo entre universidade, pesquisa e comunidade escolar, incentivando a divulgação científica e debates sobre sustentabilidade, recursos hídricos e mudanças climáticas.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Figura 13: Imagem Ilustrativa



Fonte: Unipampa (2025)

No dia 8 de novembro de 2025, também na cidade de Bagé (RS), ocorreu a **Tchê Mostra FB Bagé – Integrando Ciência e Tecnologia**, em sua segunda edição (Quadro 8). O evento contou com a participação de estudantes do sexto ao nono ano do Ensino Fundamental, juntamente com seus professores da Escola Fundação Bradesco de Bagé. Durante a mostra, foram apresentados trabalhos e pôsteres sobre diferentes temas científicos e tecnológicos, com destaque para a temática do clima, abordada em diversas produções dos estudantes. A iniciativa promoveu um espaço de aprendizado, troca de conhecimentos e incentivo à pesquisa, fortalecendo o interesse dos jovens pela ciência e pela sustentabilidade.

Quadro 8 – Síntese do evento Tchê Mostra FB Bagé – Integrando Ciência e Tecnologia

Nome do evento:	Tchê Mostra FB Bagé – Integrando Ciência e Tecnologia (2ª edição).
Local de realização:	Escola Fundação Bradesco – Bagé/RS.
Data:	8 de novembro de 2025.
Autores / responsáveis:	Professores e estudantes da Escola Fundação Bradesco de Bagé.
Público participante:	Estudantes do 6º ao 9º ano do Ensino Fundamental.
Área do conhecimento:	Ciências, Geografia, Tecnologia e Educação Ambiental.
Objetivo:	Incentivar a pesquisa científica e tecnológica entre os estudantes, promovendo a socialização de trabalhos e o desenvolvimento do pensamento crítico.
Metodologia:	Apresentação de trabalhos científicos e pôsteres elaborados pelos estudantes, abordando diferentes temas científicos, com destaque para estudos relacionados ao clima e ao meio ambiente.
Resultados educacionais:	Estímulo ao interesse dos jovens pela ciência, troca de conhecimentos entre estudantes e professores e fortalecimento da conscientização sobre sustentabilidade.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

De modo geral, os projetos aqui apresentados priorizam a observação direta da realidade climática, a investigação científica e o trabalho colaborativo. As atividades integraram conteúdos de Geografia, Ciências e Matemática, favorecendo a interdisciplinaridade e o desenvolvimento do pensamento crítico.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais desafios enfrentados pelos docentes no ensino da climatologia geográfica concentram-se na necessidade de desmistificar padrões tradicionais de ensino, frequentemente baseados na memorização de tipos climáticos e regiões, sem uma abordagem crítica ou contextualizada. Tais práticas arcaicas desconsideram a diversidade climática existente no Brasil e, sobretudo, a importância de se discutir o clima local — aquele vivenciado pelos próprios estudantes em suas comunidades.

A contextualização do conteúdo é essencial para promover a compreensão das variações climáticas regionais e suas causas, favorecendo a aprendizagem significativa. Ao reconhecer e analisar as diferenças climáticas em sua cidade, o aluno passa a compreender as dinâmicas ambientais e sociais que influenciam o espaço em que vive.

Nesse sentido, cabe ao professor desenvolver estratégias pedagógicas eficazes, baseadas em metodologias ativas, que despertem no estudante o interesse pelo tema e o sentimento de responsabilidade ambiental. Atividades como debates, rodas de conversa, seminários, dramatizações e projetos interdisciplinares constituem práticas que estimulam a reflexão, o protagonismo estudantil e a formação de uma consciência crítica.

A formação continuada de professores é um fator essencial nesse processo, pois possibilita a atualização teórico-metodológica e o domínio de novas ferramentas didáticas voltadas à educação ambiental e climática. Assim, o professor torna-se um mediador do conhecimento, e o aluno, por sua vez, transforma-se em um agente ativo e consciente, comprometido com o cuidado e a preservação do meio ambiente.

Essas práticas, quando incorporadas ao currículo escolar, contribuem para a formação de cidadãos críticos e participativos, capazes de compreender que suas ações locais têm repercussões globais no equilíbrio climático e ambiental.

Assim, o presente estudo discutiu a relevância de se abordar a climatologia geográfica no ambiente escolar, destacando a necessidade de tornar esse conhecimento prático, contextualizado e acessível à comunidade educacional. Por meio da análise de experiências pedagógicas realizadas em escolas públicas, observou-se que o ensino da climatologia pode ultrapassar os limites da sala de aula, promovendo aprendizagens significativas e atitudes conscientes em relação ao meio ambiente.

A climatologia geográfica, enquanto área de estudo da Geografia Física, revela-se essencial para compreender o ambiente em que o aluno vive, possibilitando reflexões sobre a preservação dos ecossistemas locais e do bioma regional. Assim, seu ensino contribui para que os estudantes reconheçam a importância de conservar o espaço que habitam, compreendendo a interdependência entre os fenômenos naturais e a ação humana. Os desafios do ensino tradicional — marcados por práticas de memorização e reprodução de conteúdo — estão sendo gradualmente superados com o uso de metodologias ativas, como debates, dramatizações, seminários e projetos interdisciplinares. Tais estratégias permitem que o aluno assume o papel de protagonista no processo de aprendizagem, desenvolvendo um olhar crítico e reflexivo sobre o clima e suas implicações ambientais e sociais.

Desse modo, o ensino da climatologia geográfica torna-se um instrumento de transformação social, estimulando o estudante a adotar posturas mais sustentáveis e a repensar suas ações cotidianas em prol do equilíbrio ambiental. Ao compreender a influência do clima em sua realidade e suas responsabilidades diante dele, o aluno consolida-se como agente de mudança, contribuindo para a construção de uma sociedade mais consciente e comprometida com a qualidade de vida e a sustentabilidade do planeta.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico.** 9. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva.** Lisboa: Plátano, 1982.

AZEVEDO, L. A.; SHIROMA, E. O.; COAN, M. **As políticas públicas para a educação profissional e tecnológica: sucessivas reformas para atender a quem.** *Boletim Técnico do Senac: A Revista de Educação Profissional*, Rio de Janeiro, v. 38, n. 2, p. 27- 40, 2012.

AYOADE, Johnson Olaniyi. **Introdução à Climatologia para os trópicos**. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

BACICH, Lilian; MORAN, José (org.). **Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática**. Porto Alegre: Penso, 2018. Disponível em: <https://books.google.com/books/about/Metodologias_Ativas_para_uma_Educa%C3%A7%C3%A3o.html?id=TTY7DwAAQBAJ>. Acesso em: 4 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996.** Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso em: 23 out. 2016.

CAREGNATO, E. C. **Caráter público e identidade acadêmica na educação superior: uma análise da diversificação institucional por meio do estudo de centros universitários.** 2004. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CARVALHO, I. C. M. **Educação ambiental: a formação do sujeito ecológico.** São Paulo: Cortez, 2008.

CARVALHO, M. L. M.; BATISTA, S. S. S. **Cem anos de educação profissional e tecnológica pública no estado de São Paulo: entre a celebração e a avaliação.** In: ALMEIDA, I. B.; BATISTA, S. S. S. (orgs.). *Educação tecnológica: reflexões, teorias e práticas.* Jundiaí: Paco Editorial, 2012. p. 7-16.

CATANI, A. M.; OLIVEIRA, J. F.; DOURADO, L. F. **Política educacional, mudanças no mundo do trabalho e reforma curricular dos cursos de graduação no Brasil.** *Educação e Sociedade*, v. 22, n. 75, p. 67-83, 2001.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos da metodologia científica.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

LOUREIRO, Carlos Frederico Bernardo. **Trajetória e fundamentos da educação ambiental**. 4. ed. São Paulo: Cortez, 2012.

MANUAL DE ORIENTAÇÃO PARA CRESCIMENTO DA RECEITA PRÓPRIA MUNICIPAL. **Escola de Administração de Empresas de São Paulo.** São Paulo:

Fundação Getúlio Vargas, 2000. Disponível em: http://www.fgvsp.br/academico/estudos/gvconsult/Manual.doc. Acesso em: 12 fev. 2001.

RIBEIRO, A. N.; CALLAI, H. C. **Vivendo a meteorologia para construir a climatologia.** *Cadernos do Aplicação*, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 185-206, 2007. Disponível em: https://seer.ufrgs.br/CadernosdoAplicacao/article/view/9610.

RIBEIRO, R. L. M. **Crescimento e distribuição de renda: uma revisão.** 1994. Dissertação (Mestrado em Economia e Finanças Públicas) – Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 1994.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. P. B. **Metodologia de pesquisa.** 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico.** 23. ed. rev. e atual. São Paulo: Cortez, 2007.

SILVA, Michele Souza da; CARDOSO, Cristiane. Desafios e perspectivas para o ensino de climatologia geográfica na escola. Geosaberes, Fortaleza, v. 10, n. 20, p. 1-17, jan./abr. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54847>. Acesso em: 4 mar. 2026.

STEINKE, E. T., & DA SILVA, R. F. Principais abordagens das pesquisas sobre o ensino de temas em Climatologia na Geografia escolar. ***Revista Brasileira De Climatologia*, 2019.** https://doi.org/10.5380/abclima.v0i0.66726

ZUBEN, A. V. *et al.* **Vigilância epidemiológica da leishmaniose visceral americana (LVA) em cães no município de Campinas, São Paulo.** In: *Reunião de Pesquisa Aplicada em Doenças de Chagas*, 26.; *Reunião de Pesquisa Aplicada em Leishmanioses*, 14., 2010, Uberaba. *Anais* [...]. Uberaba: Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2010. p. 135-175.

COLABORAÇÃO CIENTÍFICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL: UMA PESQUISA EXPLORATÓRIA A PARTIR DO CATÁLOGO OPENALEX

André Francisco Matsuno da Frota – Centro Universitário Internacional Uninter[6]
Lucas Fabrin Schneider – Centro Universitário Internacional Uninter [7]
Tatiana de Souza Mendonça Mischek – Centro Universitário Internacional Uninter [8]
Yuri Rezende dos Santos – Centro Universitário Internacional Uninter [9]
Tiele Rodrigues dos Santos – Centro Universitário Internacional Uninter [10]

1 INTRODUÇÃO

A produção científica sobre mudanças climáticas no Brasil aumentou de forma significativa nas últimas décadas, acompanhando a incorporação do tema em programas de pesquisa, políticas públicas e agendas institucionais. Esse crescimento pode ser observado na ampliação do número de artigos e no interesse de participação de instituições e pesquisadores localizadas em diferentes regiões do país. No entanto, o aumento do volume de publicações não permite, por si só, compreender como essa produção está organizada em termos de relações entre pesquisadores.

A colaboração científica constitui uma fonte possível de investigação, uma vez que grande parte da produção acadêmica ocorre por meio de publicações assinadas por dois ou mais autores. Essas publicações documentam vínculos de trabalho entre

[6]Doutorando em Geografia e Mestre em Ciência política – andre.fr@uninter.com
[7]Especialista em Teoria crítica e bacharel em Geografia – lucasfabsch@gmail.com
[8]Jornalista e Internacionalista – tatianamendonca@icloud.com
[9]Especialista em Relações Internacionais, Metodologias do ensino e bacharel em Geografia – yurirssfagundes@hotmail.com
[10]Licenciada em História e especialista em Relações Internacionais – tielesantos1999@gmail.com

pesquisadores, fornecendo subsídios para observar quem colabora com quem, com que frequência e em quais contextos institucionais. No caso das mudanças climáticas, essas relações despertam interesse, pois o tema envolve a articulação entre diferentes áreas do conhecimento e a participação de múltiplos grupos de pesquisa.

Apesar disso, ainda são limitados os estudos que examinam, de forma sistemática, os padrões de colaboração científica na produção brasileira sobre mudanças climáticas. Em particular, existe um crescente interesse sobre como se configuram as redes de coautoria nesse campo, quais pesquisadores e instituições concentram maior número de conexões e como essas relações se distribuem entre as universidades e institutos de pesquisa.

Diante disso, o problema de pesquisa, que esse capítulo pretende auxiliar a esclarecer, pode formulado nos seguintes termos: como se estruturam as relações de colaboração científica na produção brasileira sobre mudanças climáticas quando observadas a partir das redes de coautoria? A questão direciona a análise para as conexões estabelecidas entre autores, considerando a coautoria como registro investigável dessas relações. A partir desse enfoque, pretende-se examinar a distribuição das conexões, a concentração de vínculos em determinados autores, instituições e temas, bem como a existência de um padrão relacional de colaboração no campo.

O objetivo geral deste estudo é analisar a colaboração científica na produção brasileira sobre mudanças climáticas a partir das redes de coautoria registradas no catálogo *OpenAlex*. O foco recai sobre a estrutura dessas relações, buscando compreender como os vínculos entre pesquisadores se distribuem no interior do campo e quais padrões de conexão podem ser identificados.

De forma específica, o estudo busca recuperar e delimitar a produção científica brasileira relacionada às mudanças climáticas a partir do catálogo *OpenAlex* (OPENALEX, [s.d.]); elaborar as redes de coautoria com base nos metadados de autoria e afiliação, utilizando o software *VOSviewer* (VAN ECK; WALTMAN, 2010, p. 523-538); identificar padrões de colaboração entre autores, considerando a frequência e a intensidade dos vínculos registrados nas publicações; examinar a distribuição institucional dos autores e das conexões estabelecidas entre organizações científicas

(OPENALEX, [s.d.]); mapear os termos mais citados, buscando identificar às áreas disciplinares envolvidas com a pesquisa.

2 METODOLOGIA

A pesquisa adota a abordagem de *science mapping*, definida como um conjunto de procedimentos voltados à representação das estruturas de um campo científico a partir de dados bibliográficos. Essa abordagem opera com a organização e a análise de metadados de publicações, permitindo examinar relações entre autores, instituições e termos associados aos trabalhos. A construção dessas representações baseia-se na conversão de registros bibliográficos em estruturas relacionais, que podem ser analisadas por meio de técnicas de mapeamento e visualização (BÖRNER; CHEN; BOYACK, 2003, p. 179-255).

A coleta de dados foi realizada no catálogo *OpenAlex*, que reúne informações sobre produção científica, incluindo autoria, afiliações institucionais, títulos, resumos e palavras-chave. Foram selecionados registros de publicações relacionadas às mudanças climáticas com participação de autores vinculados a instituições brasileiras. Os dados extraídos foram organizados em um conjunto estruturado, contendo informações necessárias para a modelagem das relações de coautoria e para a identificação de elementos associados ao conteúdo das publicações (PRINCE; SMITH; LARIVIÈRE, 2022).

A modelagem das relações de colaboração foi realizada por meio de redes de coautoria, nas quais os nós correspondem aos autores e as conexões indicam a ocorrência de publicações assinadas em conjunto. A força das conexões foi definida com base na frequência de coautorias entre pares de autores. Esse procedimento permite representar a estrutura das relações estabelecidas na produção científica, a partir dos vínculos registrados nos documentos analisados (NEWMAN, 2004, p. 5200-5205; GLÄNZEL, 2002, p. 257-276).

A análise e a visualização das redes foram conduzidas no software *VOSviewer*, que permite a construção de mapas bibliométricos a partir de dados relacionais. O software aplica técnicas de normalização e algoritmos de clusterização para agrupar elementos com base na intensidade das conexões. Os agrupamentos resultantes

correspondem a conjuntos de autores com maior densidade de vínculos entre si, definidos a partir dos parâmetros estabelecidos no processamento dos dados.

2.1 DESCRIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE BUSCA E RECORTE DOS DADOS (STRING)

A delimitação do corpus foi realizada diretamente na interface do catálogo OpenAlex, por meio da aplicação de filtros combinados sobre o conjunto de publicações indexadas. O recorte foi estruturado a partir de três dimensões principais: temática, geográfica e institucional.

Inicialmente, foi aplicado o filtro temático associado ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável “Climate Action” (SDG 13), utilizado como critério de identificação de trabalhos relacionados às mudanças climáticas. Esse filtro opera sobre a classificação temática do próprio OpenAlex, permitindo selecionar publicações indexadas sob categorias vinculadas ao tema. Em seguida, foi aplicado o filtro geográfico “South America”, restringindo o conjunto de resultados a publicações associadas a instituições localizadas nesse continente.

A delimitação do caso brasileiro foi realizada por meio da seleção de instituições, com a inclusão de organizações científicas brasileiras identificadas no catálogo. Foram selecionadas universidades federais, universidades estaduais, institutos de pesquisa e órgãos governamentais com participação na produção científica sobre mudanças climáticas, conforme listado na interface da plataforma. Esse procedimento restringiu o conjunto de publicações àquelas com participação de autores vinculados a essas instituições.

Adicionalmente, foram mantidos os diferentes tipos de documentos disponíveis no catálogo, incluindo artigos científicos, capítulos de livro, preprints, revisões e dissertações. A combinação desses filtros resultou em um conjunto de dados composto por publicações associadas ao tema das mudanças climáticas, com participação de instituições brasileiras, a partir do qual foram extraídos os metadados

utilizados na modelagem das redes de coautoria. Para fins de reprodutibilidade, o recorte pode ser recuperado diretamente via API do OpenAlex[11].

2.2 PROCEDIMENTOS - VOS

Para a elaboração dos três grafos — coautoria de autores, coautoria institucional e coocorrência de termos — foram utilizados os dados recuperados por meio da API do OpenAlex descrita na seção anterior. Os registros obtidos foram organizados em formato compatível com o software VOSviewer, contendo informações de autoria, afiliação institucional, títulos, resumos e palavras-chave. O processamento foi realizado por meio da opção *Create a map based on bibliographic data*, que permite a construção de mapas a partir de arquivos estruturados. Durante a importação, foi selecionado o método de contagem *full counting*, no qual cada ocorrência de coautoria ou termo é considerada integralmente na formação das conexões (VAN ECK; WALTMAN, [s.d.]).

Para a construção da rede de coautoria entre autores, foi selecionada a opção *co-authorship* com unidade de análise definida como *authors*. Nesse procedimento, cada nó representa um autor e cada ligação indica a ocorrência de pelo menos uma publicação em coautoria entre dois autores. A força das conexões foi calculada com base no número de publicações compartilhadas. Foi estabelecido o limiar mínimo de um documento por autor para inclusão na rede, com o objetivo de maximizar a visualização dos autores com participação mais recorrente no conjunto de dados. O VOSviewer aplicou o método de mapeamento baseado em similaridade, posicionando os autores de acordo com a intensidade das conexões (VAN ECK; WALTMAN, 2010, p. 523-538).

A rede de coautoria institucional foi construída a partir da opção *co-authorship* com unidade de análise definida como *organizations*. Nesse caso, os nós representam

[11]https://api.openalex.org/works?filter=sustainable_development_goals.id%3A13%2Cauthorships.institutions.continent%3AQ18%2Cauthorships.institutions.lineage%3Ai17974374%7Ci4210151455%7Ci80849659%7Ci122140584%7Ci181391015%7Ci879563668%7Ci130442723%7Ci150729083%7Ci199691007%7Ci52418104%7Ci59606676%7Ci40034438%7Ci2699952%7Ci2801200668%7Ci243754102%7Ci169045520%7Ci41455075%7Ci68106152%7Ci1283613182%7Ci126158947%7Ci169248161%7Ci1293487690%7Ci32393484%7Ci62921916%7Ci51235708%7Ci1315085146%7Ci32725510%7Ci79889768%7Ci80850581%7Ci88273585%7Ci4210151127%7Ci122558511%7Ci107428990%7Ci161460629%7Ci101100930%7Ci126460647%7Ci71715416%7Ci4210142721%7Ci62885914%7Ci164790352%7Ci190085865%7Ci44202434%7Ci127110123%7Ci10824318%7Ci3121799822%7Ci123443094%7Ci52325%7Ci187079419%7Ci177909021%7Ci35046152%7Ci33501960%7Ci161127581%7Ci146165071%7Ci25112270%7Ci4104125%7Ci110200422

instituições e as conexões indicam a ocorrência de publicações assinadas por autores vinculados a diferentes organizações. A força das ligações corresponde à frequência de colaboração entre instituições. Também foi aplicado o critério mínimo de ao menos uma ocorrência para inclusão das instituições na rede. A estrutura resultante foi organizada pelo algoritmo de clusterização do VOSviewer, que agrupa instituições com maior densidade de vínculos entre si (VAN ECK; WALTMAN, 2010, p. 523-538).

A análise de coocorrência de termos foi realizada por meio da opção *co-occurrence*, utilizando como unidade de análise os termos extraídos de títulos e resumos. Nesse procedimento, os nós representam termos e as conexões indicam a frequência com que dois termos aparecem conjuntamente nos documentos analisados. Foi aplicado o limiar mínimo de ao menos uma ocorrência de termos para inclusão na rede. O *VOSviewer* utilizou as mesmas técnicas de normalização e agrupamento para identificar conjuntos de termos com alta coocorrência, permitindo representar padrões de associação temática no corpus analisado (VAN ECK; WALTMAN, [s.d.]).

2.3 REDES DE COAUTORIA E COMUNIDADES CIENTÍFICAS

O estudo de redes de coautoria parte da observação em que a publicação conjunta produz estruturas relacionais que permitem examinar a organização interna de um campo científico. Newman (2004, p. 5200-5205) descreve redes desse tipo a partir de propriedades mensuráveis, como distribuição do grau, coeficientes de agrupamento, distâncias médias e modularidade. Esses parâmetros revelam agrupamentos delimitados por padrões de colaboração específicos, cuja composição se torna visível quando representada como grafo. A análise apresentada pelo autor mostra que tais agrupamentos não surgem de forma aleatória; eles resultam de vínculos recorrentes entre subconjuntos de autores, evidenciando concentrações de colaboração que podem ser tratadas como unidades de análise.

Glänzel (2002, p. 257-276) examina redes de coautoria com foco na estrutura interna dos vínculos. O autor demonstra que esses dados permitem identificar núcleos de maior conectividade e regiões periféricas, cada uma com densidades distintas e posições estruturais específicas. A descrição enfatiza que a coautoria fornece um

registro verificável da interação entre autores, o que possibilita distinguir subgrupos e delimitar fronteiras dentro do campo analisado. A partir desses padrões, é possível reconhecer grupos estabelecidos por práticas de colaboração reiteradas.

Ding (2011, p. 187-203) compara redes de coautoria e redes de citação e mostra que ambas podem apresentar padrões estruturais correlacionáveis. O autor observa que determinados subconjuntos de autores colaboram entre si e também recebem citações de maneira concentrada, formando unidades estruturais reconhecíveis tanto na rede de produção quanto na rede de reconhecimento. Essa correspondência fornece evidências de que os agrupamentos observados na coautoria refletem associações intelectuais documentadas em outros indicadores, sem recorrer a interpretações externas ao comportamento observado nos dados.

Kumar (2015, p. 55-73) apresenta um levantamento sistemático das aplicações de redes de coautoria em estudos de colaboração científica. O autor identifica usos recorrentes da coautoria para a detecção de grupos, análise da distribuição de produtividade e identificação de estruturas internas de campos específicos.

A breve revisão sinaliza que a coautoria se mantém como um indicador de emprego seguro devido à sua disponibilidade em bases de dados abertas e às possibilidades de investigação dos padrões estruturais que produz.

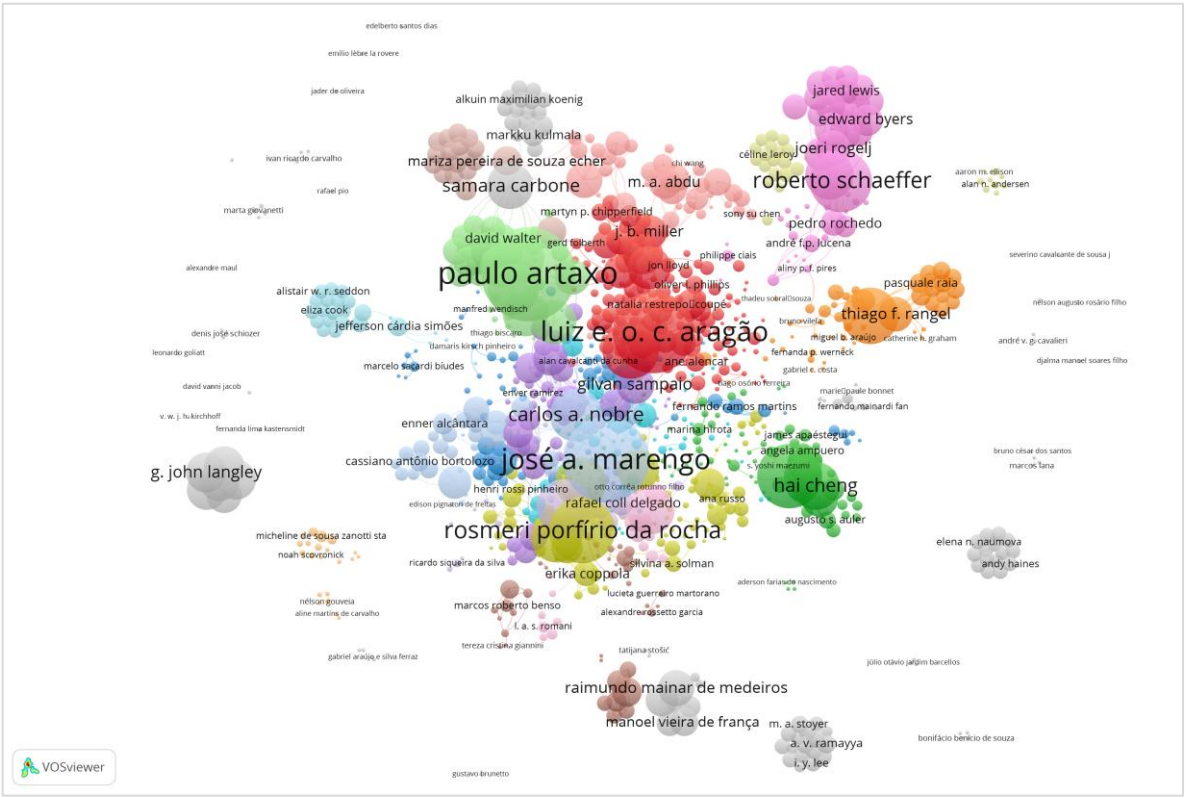
3 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da análise das redes de coautoria entre autores e instituições, bem como da rede de coocorrência de termos, construídas a partir dos dados do catálogo OpenAlex e processadas no software VOSviewer. A descrição considera a estrutura dos grafos, a distribuição das conexões e a organização dos elementos em clusters, com o objetivo de explicitar como se configuram as relações de colaboração científica e os domínios temáticos associados à produção brasileira em mudanças climáticas.

A Figura 1 corresponde a uma rede de coautoria de autores construída no software VOSviewer, a partir de dados extraídos da base OpenAlex. O grafo apresenta 1000 itens (autores), 69.863 conexões (links) e uma força total de ligação de 213.191, organizados em 11 clusters. Cada nó representa um autor, e seu tamanho é

proporcional ao número de documentos associados no conjunto analisado. As ligações entre os nós indicam relações de coautoria, sendo sua espessura proporcional à intensidade dessas relações, medida pela frequência de publicações compartilhadas. A disposição espacial dos elementos foi definida pelo algoritmo de layout do VOSviewer, que posiciona autores com maior proximidade relacional em regiões mais próximas no plano. As cores indicam os diferentes agrupamentos (clusters) identificados automaticamente pelo algoritmo de modularidade.

Figura 1 – Redes de coautoria em ação climática (ODS 13) – autores



Fonte: Elaboração própria com base em VOS. Disponível em: https://tinyurl.com/2b7m99z7

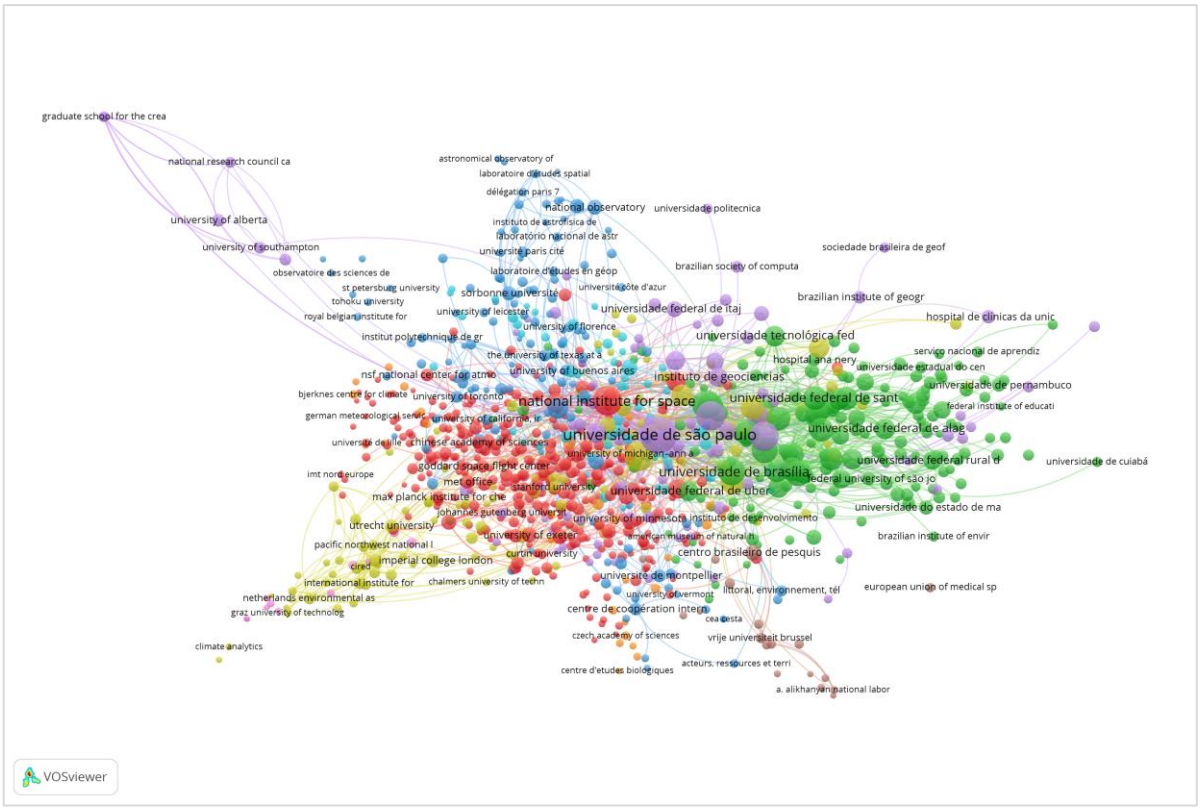
No conteúdo da rede, observa-se um núcleo central altamente denso, concentrado principalmente no cluster vermelho, no qual se destacam autores como José A. Marengo, Lincoln Muniz Alves e José Francisco de Oliveira Júnior. Esse agrupamento apresenta elevada densidade de conexões internas e concentra grande parte das ligações da rede. Em torno desse núcleo, identificam-se outros clusters relevantes, como o cluster verde, centrado em Paulo Artaxo e Luiz E. O. C. Aragão, com forte articulação interna e conexões com outros grupos.

Na porção superior da rede, destaca-se um cluster associado a Roberto Schaeffer, conectado a autores como Keywan Riahi e Eduardo Viola, indicando a presença de vínculos com redes de pesquisa internacionais. À esquerda do núcleo principal, observa-se um agrupamento que inclui autores como Sin Chan Chou e Rosmeri Porfírio da Rocha, com forte proximidade em relação ao cluster central. Outro conjunto relevante aparece na parte inferior, com autores como Francisco W. Cruz e E. Echer, formando um agrupamento mais delimitado, porém conectado ao restante da rede por meio de ligações específicas.

Além desses grupos, a rede apresenta um cluster relativamente isolado à direita, centrado em José Alexandre Felizola Diniz, composto por autores como Daniel Paiva Silva, Rafael Loyola e Mariana M. Vale. Esse agrupamento apresenta menor número de conexões com o núcleo central, sendo visualmente separado do restante da estrutura. Também são visíveis autores periféricos e subgrupos menores distribuídos nas extremidades do grafo, caracterizados por menor número de conexões e menor integração na rede geral de coautoria.

A Figura 2 apresenta a rede de coautoria entre instituições na produção científica sobre mudanças climáticas, construída no software VOSviewer a partir dos dados extraídos via API da OpenAlex. O grafo contém 1000 itens (instituições), 41.351 conexões e uma força total de ligação de 91.022, distribuídos em 9 clusters. Cada nó representa uma instituição, com tamanho proporcional ao volume de produção científica associado. As conexões indicam relações de coautoria institucional, sendo sua espessura proporcional à intensidade dessas colaborações. A disposição espacial segue o algoritmo de layout do VOSviewer, aproximando instituições com maior frequência de colaboração, enquanto as cores representam os agrupamentos identificados automaticamente.

Figura 2 – Redes de coautoria em ação climática (ODS 13) – Instituições



Fonte: Elaboração própria com base em VOS. Disponível em: https://tinyurl.com/23vhfq9e

No conteúdo da rede, observa-se um núcleo central dominado por instituições brasileiras, com destaque para a Universidade de São Paulo (USP), que aparece como o maior nó do grafo, indicando centralidade na produção e nas conexões de coautoria. Em proximidade direta, identificam-se instituições como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e outras universidades e centros de pesquisa nacionais, formando um agrupamento denso com elevado número de conexões internas.

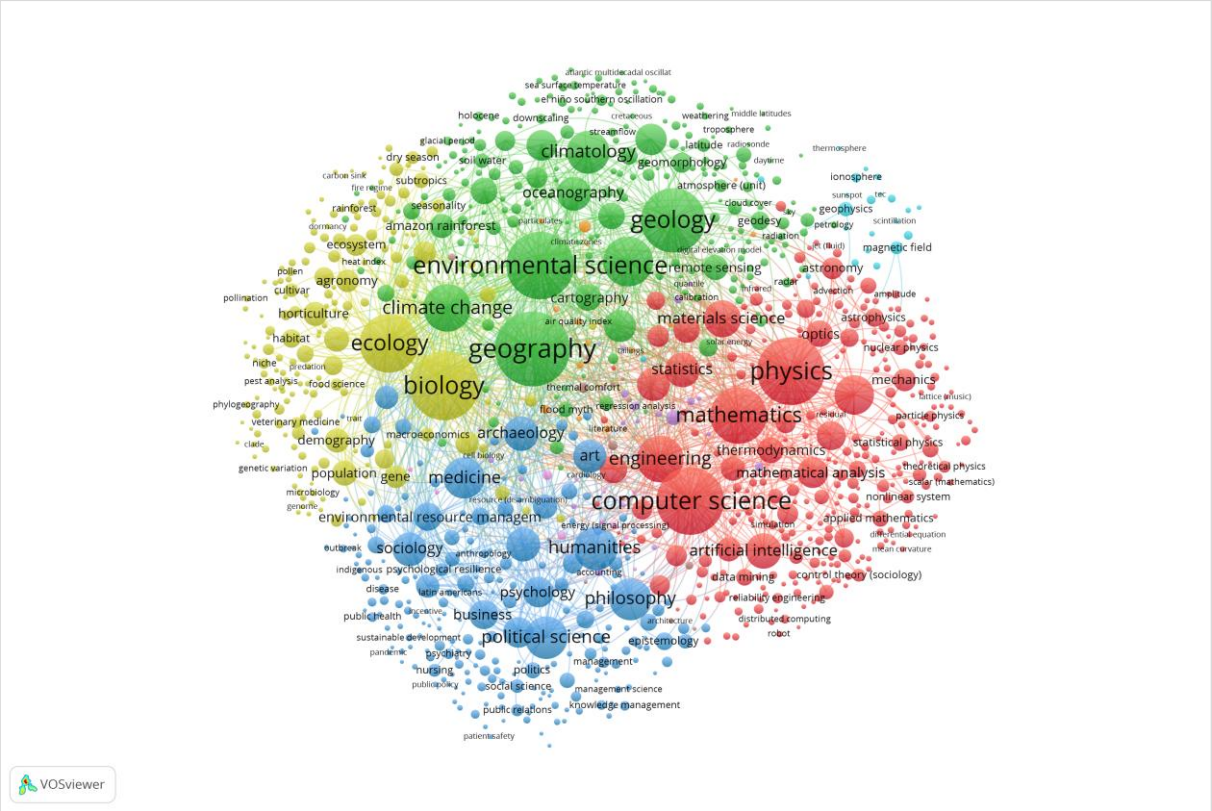
Esse núcleo central conecta-se a um conjunto de instituições internacionais, visível sobretudo no cluster vermelho, no qual aparecem organizações como o National Institute for Space Research (INPE, em sua denominação em inglês), o Met Office e diferentes universidades europeias e norte-americanas. Observa-se também a presença de instituições como o Max Planck Institute, Imperial College London e University of Exeter, que aparecem conectadas ao núcleo principal por meio de múltiplas relações de coautoria.

Na porção superior esquerda, identifica-se um cluster com instituições como University of Alberta, University of Southampton e Louisiana State University, conectadas entre si e ao restante da rede por ligações mais longas. Já na parte inferior esquerda, observa-se um agrupamento associado a instituições como Kyoto University, University of Leeds e Pacific Northwest National Laboratory, compondo um conjunto de colaborações com forte presença internacional.

De modo geral, a rede evidencia uma estrutura em que um núcleo institucional brasileiro altamente conectado se articula com múltiplos agrupamentos internacionais, formando uma rede ampla de colaboração científica entre instituições, com variação na densidade e na distribuição das conexões ao longo do grafo.

A Figura 3 apresenta a rede de coocorrência de palavras-chave associadas à produção científica sobre mudanças climáticas, construída no software VOSviewer a partir dos dados extraídos via API da OpenAlex. O grafo contém 1000 itens (termos), 128.838 conexões e uma força total de ligação de 1.543.580, organizados em 9 clusters. Cada nó representa um termo extraído dos metadados das publicações, e seu tamanho é proporcional à frequência de ocorrência no corpus analisado. As conexões indicam a coocorrência de termos em um mesmo documento, sendo sua espessura proporcional à intensidade dessa coocorrência. A disposição espacial segue o algoritmo de layout do VOSviewer, que posiciona termos com maior frequência de associação em regiões mais próximas, enquanto as cores indicam os agrupamentos identificados automaticamente.

Figura 3 – Co-ocorrência – ação climática (ODS 13)



Fonte: Elaboração própria com base em VOS. Disponível em: https://tinyurl.com/28ho3ota

No conteúdo da rede, observa-se um núcleo central composto por termos como environmental science, climate change, geography, biology e ecology, que aparecem com maior dimensão e elevada densidade de conexões. Esses termos ocupam a região central do grafo e estabelecem múltiplas ligações com diferentes áreas do conhecimento representadas na rede.

A rede organiza-se em diferentes agrupamentos. Um cluster verde concentra termos associados às ciências da Terra e ambientais, como geology, climatology, oceanography e atmosphere, distribuídos na porção superior da figura. Um cluster amarelo reúne termos ligados à ecologia e às ciências biológicas, incluindo ecology, habitat, biodiversity e amazon rainforest, posicionados à esquerda do núcleo central.

Na porção inferior da rede, observa-se um cluster azul que agrega termos relacionados às ciências sociais e à saúde, como political science, sociology, public health, medicine e humanities. À direita, destaca-se um cluster vermelho associado às ciências exatas e tecnológicas, com termos como computer science, engineering,

mathematics, physics e artificial intelligence, formando um conjunto denso de conexões internas.

Além desses agrupamentos principais, a rede apresenta subgrupos menores e termos periféricos distribuídos nas extremidades do grafo, com menor frequência de ocorrência e menor número de conexões. Esses elementos aparecem como nós de menor dimensão, indicando participação mais restrita no conjunto de coocorrências analisado.

4 DISCUSSÃO

A análise integrada dos três grafos permite avançar hipóteses sobre a organização da colaboração científica em mudanças climáticas no Brasil, ainda que de forma cautelosa. A literatura de análise de redes científicas aponta que a coautoria constitui um dos principais indicadores empíricos da colaboração, pois registra vínculos formais entre pesquisadores e possibilita a observação de padrões de interação e estruturas de conectividade no interior de um campo científico (GLÄNZEL, 2002, p. 257-276). No entanto, trata-se de um indicador parcial, uma vez que nem toda colaboração se traduz em coautoria e nem toda coautoria implica interação intensa ou simétrica (DING, 2011, p. 187-203). Nesse sentido, os grafos analisados devem ser compreendidos como representações estruturais das relações formalizadas na produção científica, e não como a totalidade das interações existentes.

No caso da rede de coautoria entre autores (Figura 1), observa-se a presença de um núcleo mais denso articulado a agrupamentos periféricos. Esse padrão é consistente com a organização modular descrita na literatura, na qual subconjuntos de autores apresentam maior densidade de conexões internas em comparação com o restante da rede (NEWMAN, 2004, p. 5200-5205). Uma hipótese de trabalho é que esse núcleo concentre trajetórias de colaboração mais consolidadas, possivelmente associadas a maior volume de produção e inserção institucional mais ampla. Já os agrupamentos periféricos podem estar relacionados a especializações temáticas, redes regionais ou colaborações menos frequentes. Ainda assim, a partir desse tipo de evidência, não é possível inferir, de maneira direta, hierarquias intelectuais ou

centralidade normativa no campo, sendo necessário articular essa análise com outros indicadores.

A rede de coautoria entre instituições (Figura 2) sugere um padrão de concentração institucional, no qual algumas organizações ocupam posições centrais e estabelecem múltiplas conexões com outras instituições. Esse tipo de configuração tem sido associado, na literatura, à distribuição desigual de infraestrutura científica, financiamento e programas de formação avançada, que influenciam a capacidade de articulação e produção das instituições (GLÄNZEL, 2002, p. 257-276). A hipótese, nesse caso, é que a centralidade institucional observada decorra, em parte, desses fatores estruturais. Ao mesmo tempo, a presença de conexões com instituições internacionais indica a inserção do campo brasileiro em redes transnacionais de pesquisa, o que está em consonância com estudos que destacam a crescente internacionalização da produção científica e a formação de redes globais de colaboração (BÖRNER; CHEN; BOYACK, 2003, p. 179-255).

A rede de coocorrência de palavras (Figura 3), por sua vez, evidencia uma organização temática estruturada em quatro grandes clusters. Um primeiro agrupamento reúne termos associados às ciências da Terra e ambientais, como *environmental science*, *climatology*, *oceanography* e *geography*. Um segundo cluster concentra termos ligados às ciências biológicas e ecológicas, como *ecology*, *biology*, *habitat* e *amazon rainforest*. Um terceiro agrupamento organiza termos das ciências exatas e tecnológicas, como *physics*, *mathematics*, *computer science*, *engineering* e *artificial intelligence*. Por fim, um quarto cluster agrega termos relacionados às ciências sociais, humanas e da saúde, como *political science*, *sociology*, *medicine*, *public health* e *humanities*. Essa configuração sugere uma estrutura temática segmentada, na qual grandes domínios disciplinares se organizam em blocos relativamente coesos, com maior densidade de conexões internas do que entre si. A literatura de mapeamento científico indica que esse tipo de padrão é recorrente em análises de coocorrência, refletindo a especialização disciplinar e os modos de comunicação próprios de diferentes áreas (BÖRNER; CHEN; BOYACK, 2003, p. 179-255).

Considerados em conjunto, os três grafos indicam que a colaboração científica em mudanças climáticas no Brasil se estrutura a partir de um núcleo relacional mais

denso, articulado a uma base institucional concentrada e a um campo temático organizado em grandes domínios disciplinares. Ao mesmo tempo, a presença de conexões entre clusters e de vínculos com instituições internacionais sugere a existência de zonas de articulação entre áreas e escalas distintas. Essas observações permitem formular hipóteses iniciais sobre a organização do campo, mas não esgotam sua explicação. Investigações futuras podem explorar, por exemplo, a relação entre centralidade em redes de coautoria, impacto científico e inserção em agendas internacionais, bem como examinar a evolução temporal dessas estruturas.

5 CONSIDERAÇÕES

As redes analisadas buscaram delimitar, de forma exploratória, a estrutura da colaboração científica em mudanças climáticas no Brasil, a partir da concentração de conexões entre autores, da centralidade de determinadas instituições e da organização temática em grandes domínios disciplinares.

Nesse sentido, algumas questões se colocam para investigações futuras. A centralidade de certos autores corresponde também a maior impacto científico, em termos de citações ou circulação em agendas públicas? A posição de instituições como a Universidade de São Paulo e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais está associada à capacidade de articulação entre diferentes clusters ou à concentração de recursos e infraestrutura? As conexões internacionais identificadas configuram padrões estáveis de cooperação ou dependem de vínculos específicos entre grupos e pesquisadores?

No plano temático, a organização em grandes áreas levanta a questão sobre o grau de interação entre esses domínios e a existência de interfaces mais consolidadas entre disciplinas. A incorporação de recortes temporais pode indicar se a estrutura observada se mantém ou se altera ao longo do tempo, enquanto a articulação com indicadores de citação e outras métricas permite explorar a relação entre posição nas redes e visibilidade da produção científica.

Em vias de síntese, os dados apresentados tiveram por objetivo contribuir para o desenvolvimento de pesquisas sobre a formação e a estrutura das comunidades de pesquisa sobre mudanças climáticas no Brasil.

REFERÊNCIAS

BÖRNER, Katy; CHEN, Chaomei; BOYACK, Kevin W. Visualizing knowledge domains. **Annual Review of Information Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 179–255, 2003.

DING, Ying. Scientific collaboration and endorsement: network analysis of coauthorship and citation networks. Journal of Informetrics, v. 5, n. 1, p. 187–203, 2011. DOI: 10.1016/j.joi.2010.10.008.

GLÄNZEL, Wolfgang. Analysing scientific networks through co-authorship. In: MOED, Henk F.; GLÄNZEL, Wolfgang; SCHMOCH, Ulrich (org.). **Handbook of Quantitative Science and Technology Research**. Dordrecht: Springer, 2002. p. 257–276.

KUMAR, Sameer. Co-authorship networks: a review of the literature. Aslib **Journal of Information Management**, v. 67, n. 1, p. 55–73, 2015. DOI: 10.1108/AJIM-09-2014-0116.

NEWMAN, Mark E. J. Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 101, supl. 1, p. 5200–5205, 2004. DOI: 10.1073/pnas.0307545100.

OPENALEX. Open index of scholarly works, authors, venues, institutions and concepts. Disponível em: https://openalex.org. Acesso em: 20 mar. 2026

PRINCE, Richard; SMITH, Anthony; LARIVIÈRE, Vincent. OpenAlex: A fully open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts. **arXiv preprint**, 2022.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics,** v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010. DOI: 10.1007/s11192-009-0146-3.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. **VOSviewer manual: version 1.6.20**. Leiden: Centre for Science and Technology Studies (CWTS), Leiden University, [s.d.]. Disponível em: https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.20.pdf. Acesso em: 20/03/2026.



ESCOLHA CERTA
Editora