

Edison Barbieri — Erick Paiva Barbieri



Mudanças climáticas no Antropoceno

Diagnóstico, prognóstico e perspectivas

Mudanças climáticas no Antropoceno

Diagnóstico, prognóstico e perspectivas

Edison Barbieri



Erick Paiva Barbieri

São Paulo, SP — Brasil — 2025

Mudanças climáticas no Antropoceno: diagnóstico, prognóstico e perspectivas

© Copyright 2025. Centro Universitário São Camilo.
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS.

Centro Universitário São Camilo

Reitor e Diretor Administrativo – *Anísio Baldessin*

Produção editorial

Coordenadora Editorial – *Bruna San Gregório*

Analista Editorial – *Cintia Machado dos Santos*

Assistente Editorial – *Bruna Diseró*

Autores

Edison Barbieri

Erick Paiva Barbieri

B191

Barbieri, Edison

Mudanças climáticas no antropoceno: diagnóstico, prognóstico e perspectivas / Edison Barbieri, Erick Paiva Barbieri. -- São Paulo: Setor de Publicações - Centro Universitário São Camilo, 2025.

312 p.

ISBN 978-85-87121-97-4

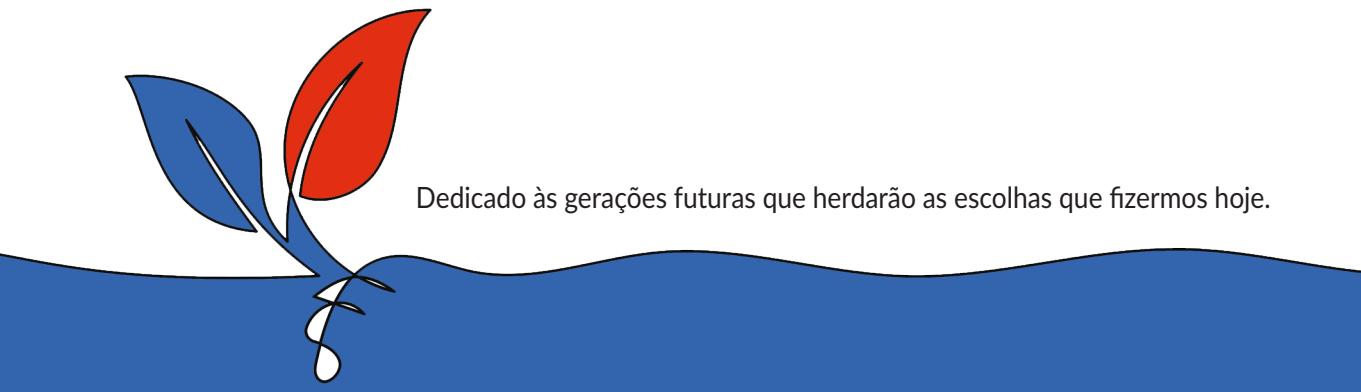
1. Mudanças climáticas 2. Impacto 3. Saúde 4. Mitigação I. Barbieri, Erick Paiva II. Título

CDD: 551.6

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária Ana Lucia Pitta

CRB 8/9316





Dedicado às gerações futuras que herdarão as escolhas que fizermos hoje.

“

Entender o clima é o primeiro passo para proteger tudo o que depende dele — inclusive nós. A crise climática não é apenas ambiental: é uma questão de civilização. O futuro será definido por nossa capacidade de respeitar os limites do planeta. Quando os ecossistemas falam, é nosso dever escutar — e agir.

Conteúdo

Introdução

11

CAPÍTULO 1

O conceito de mudanças climáticas

14

CAPÍTULO 2

**Evolução do conceito de mudanças climáticas
causadas pelo ser humano**

20

CAPÍTULO 3

**Histórico do estudo do clima:
da filosofia natural à ciência interdisciplinar**

54

CAPÍTULO 4

**Como o clima é estudado:
meteorologia, climatologia e modelagem climática**

60

CAPÍTULO 5
Impactos das mudanças climáticas
146

CAPÍTULO 6
Mudanças climáticas e seus efeitos na saúde pública
156

CAPÍTULO 7
Soluções para mitigação e adaptação
212

CAPÍTULO 8
**O papel dos governos na luta
contra as mudanças climáticas**
254

Considerações finais
298

Referências
300

**Mudanças climáticas no Antropoceno:
diagnóstico, prognóstico e perspectivas**

Uma abordagem integrada sobre os mecanismos físicos do aquecimento global, os efeitos sobre os ecossistemas e os desafios da governança climática no século XXI.



Introdução

Ao longo da história geológica, o clima terrestre foi modulado por variações naturais decorrentes de forças externas e internas, como ciclos orbitais (Milankovitch), tectônica de placas, irradiação solar e vulcanismo (Oliveira *et al.*, 2015). Contudo, nas últimas décadas, as alterações observadas destacam-se pela velocidade e magnitude sem precedentes, associadas principalmente à ação antrópica. Embora oscilações térmicas tenham marcado o último milênio, o atual aquecimento difere pela taxa acelerada e pela ausência de paralelos nos registros paleoclimáticos.

Durante o Período Quente Medieval (séculos IX-XIII), o aumento das temperaturas médias globais favoreceu a agricultura e o crescimento populacional, especialmente em regiões temperadas. Esse intervalo foi sucedido pela Pequena Idade do Gelo (XIV-XIX), caracterizada por resfriamento persistente com impactos socioeconômicos, como redução da produtividade agrícola e crises de subsistência (Kimble, 2013). Tais variações são atribuídas a fatores combinados, como vulcanismo intenso, alterações na circulação oceânica e diminuição da irradiância solar.

No século XX, ocorreu uma mudança substancial na dinâmica climática. Dados instrumentais revelam elevação progressiva das temperaturas, particularmente após 1950 (Jones *et al.*, 1999). Segundo o IPCC (2023), esse fenômeno correlaciona-se com o aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE), como CO₂, CH₄ e N₂O, que excedem em 50% os níveis pré-industriais. As causas incluem combustão de fósseis, desmatamento e conversão de ecossistemas para agropecuária (Leite *et al.*, 2015).

As consequências, segundo informe da OPAS (2008), abrangem sistemas biofísicos e a saúde humana, com elevação do nível do mar, eventos extremos (ondas de calor, secas, ciclones), perda de biodiversidade e riscos socioambientais (insegurança alimentar, escassez hídrica, doenças sensíveis ao clima). Em resposta, acordos multilaterais, como o de Paris (2015), visam limitar o aquecimento a <2°C, exigindo transformações nos setores energético, agrícola e de transportes.

A distinção entre variabilidade natural e antrópica requer análise de arquivos paleoclimáticos, especialmente em períodos com mínima influência humana. O último milênio é estratégico por combinar registros históricos e *proxies* naturais. Embora dados instrumentais (termômetros, pluviômetros) ofereçam precisão, sua cobertura temporal (<200 anos) limita estudos em escalas longas. Reconstruções dependem de *proxies* como anéis de árvores, núcleos de gelo, espeleotemas, corais e sedimentos, que fornecem informações indiretas sobre temperatura, precipitação e circulação atmosférica em escalas centenárias ou milenares (Bradley, 1999).

A interpretação desses dados exige abordagens interdisciplinares, integrando geoquímica, estatística e modelagem climática. Apesar da menor resolução temporal, os *proxies* são cruciais para validar modelos e identificar tendências multidecadais. O Holoceno (últimos 11.700 anos), marcado por estabilidade relativa, oferece *insights* sobre condições pré-industriais, com sedimentos continentais e marinhos servindo como arquivos paleoambientais.

As flutuações climáticas do último milênio refletem padrões cílicos naturais, mas o aquecimento atual destaca-se pela rapidez e vinculação com atividades humanas. Compreender essa dinâmica é essencial para estratégias de mitigação e adaptação, garantindo resiliência ecossistêmica e social no Antropoceno.

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios contemporâneos, com efeitos sobre ecossistemas, saúde pública e economia. Seus fundamentos científicos envolvem mecanismos físico-químicos, GEE e ciclos biogeoquímicos, especialmente o do carbono. O tema mobiliza a comunidade internacional, refletido em publicações e políticas públicas.

Conforme o IPCC (2021), mudanças climáticas referem-se a alterações estatisticamente significativas no estado médio do clima ou em sua variabilidade, persistindo por décadas ou mais. Embora causas naturais (vulcanismo, ciclos solares) existam, o consenso dos cientistas climáticos aponta para a ação humana como principal fator recente pelas emissões de GEE. O aquecimento global, vinculado ao aumento dos gases estufa, impacta ciclos hidrológicos, circulação oceânica e distribuição de espécies, exacerbando desigualdades na sociedade.

Ecologicamente, observa-se acidificação oceânica, perda de habitats (recifes, manguezais) e alterações fenológicas. Ambientes marinhos e polares são especialmente vulneráveis. Politicamente, a crise exige cooperação global, como o Acordo de Paris, que visa limitar o aquecimento a 1,5–2°C. Sua eficácia depende da integração entre ciência, tecnologia e justiça climática.



CAPÍTULO 1

O conceito de mudanças climáticas



O tratado internacional adotado em 1992 durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento — a chamada Rio-92, ou UNFCCC (1992) (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima) — definiu mudanças climáticas como aquelas atribuíveis à atividade humana, distinguindo-as da variabilidade natural. Historicamente, essas variações estiveram ligadas a fatores astronômicos (ciclos de Milankovitch), vulcanismo e oscilações oceânicas. Durante o Quaternário (últimos 2,6 milhões de anos), eras glaciais e interglaciais resultaram de mudanças na insolação (Hay *et al.*, 1976).



A ciência climática moderna originou-se no século XIX, com Fourier (1827) descrevendo o efeito estufa, Tyndall (1861) demonstrando a absorção de radiação por GEE e Arrhenius (1896) quantificando o impacto do CO₂. No século XX, testemunhos de gelo (Petit *et al.*, 1999) confirmaram a correlação entre GEE e temperatura em escalas milenares. A Revolução Industrial rompeu esse equilíbrio, acelerando o aquecimento. Hoje, a disciplina integra conhecimentos multidisciplinares, consolidando o papel antrópico nas mudanças climáticas.

A figura 1 apresenta a evolução da temperatura média global anual entre aproximadamente 1940 e 2024, em comparação com a média do período pré-industrial (1850-1900), com base em dados da reanálise climática ERA5, produzida pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF/C3S). Cada barra vertical representa a anomalia de temperatura média anual em relação à linha de base pré-industrial, sendo que a coloração, que varia do rosa claro ao vermelho escuro, indica a intensidade crescente do aquecimento — quanto mais escura a tonalidade, maior a anomalia térmica. A partir da década de 1980, observa-se uma tendência clara de aquecimento progressivo e acelerado, com destaque para os últimos anos, que concentram os valores mais elevados.

O ano de 2024 destaca-se por ser o primeiro a registrar uma média anual superior a +1,5°C, atingindo +1,6°C acima da média pré-industrial, ultrapassando simbolicamente o limite estabelecido pelo Acordo de Paris (figura 2). Esse resultado reforça os alertas da comunidade científica sobre a intensificação do aquecimento global e os riscos iminentes de impactos climáticos potencialmente irreversíveis.

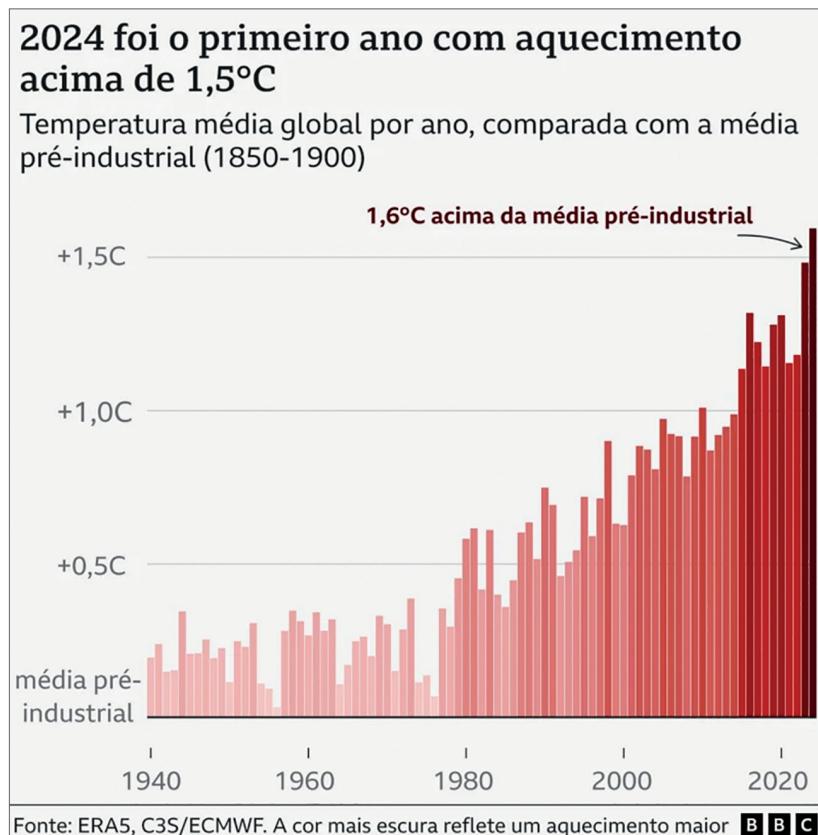


Figura 1. Evolução das anomalias de temperatura média global entre 1940 e 2024, em relação à média pré-industrial (1850-1900). As barras representam as anomalias térmicas anuais com base em dados da reanálise ERA5 (C3S/ECMWF), com coloração gradativa refletindo o aumento da temperatura ao longo do tempo. O ano de 2024 é o primeiro a registrar média anual superior a +1,5°C, atingindo +1,6°C acima dos níveis pré-industriais, superando o limite definido como crítico pelo Acordo de Paris. Essa tendência confirma o avanço do aquecimento global e suas implicações potenciais para a estabilidade dos sistemas climáticos e ecológicos planetários.

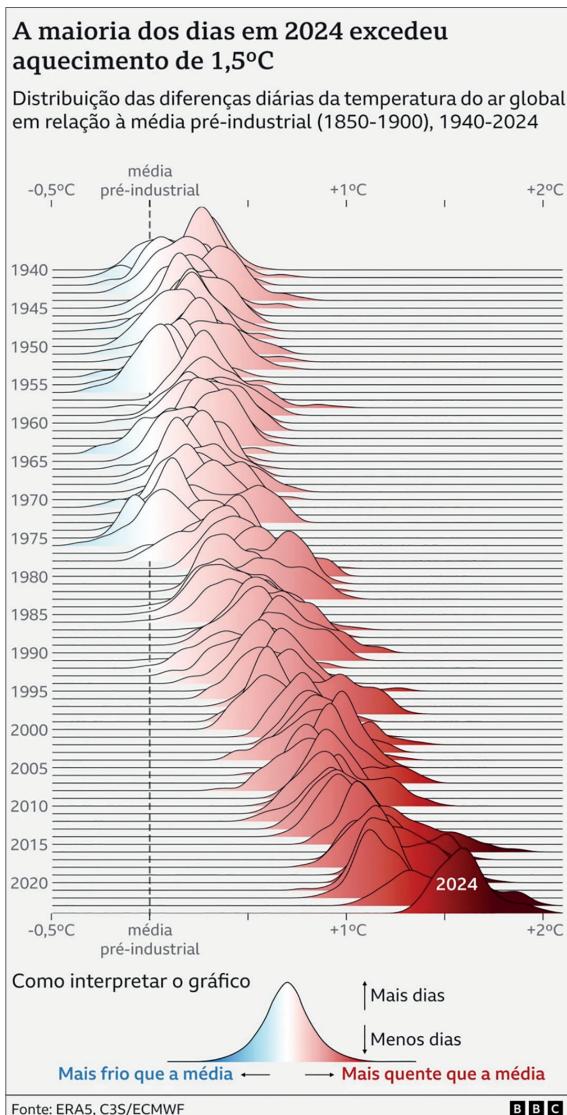


Figura 2. Distribuição das anomalias diárias de temperatura do ar global entre 1940 e 2024, em relação à média pré-industrial (1850-1900). Cada curva representa a densidade de frequência de dias, por ano, em que a anomalia diária de temperatura global desviou-se da média do período pré-industrial. As cores variam do azul (dias mais frios) ao vermelho (mais quentes), destacando a tendência sistemática de aquecimento ao longo das décadas. Os dados de 2024 revelam que a maior parte dos dias daquele ano excede +1,5°C em relação à linha de base pré-industrial, ultrapassando o limite estabelecido pelo Acordo de Paris como critério para evitar impactos climáticos irreversíveis.

”

A partir da década de 1980, observa-se uma tendência clara de aquecimento progressivo e acelerado, com destaque para os últimos anos, que concentram os valores mais elevados.



CAPÍTULO 2

Evolução do conceito de mudanças climáticas causadas pelo ser humano



A compreensão científica das mudanças climáticas resultou de uma trajetória histórica complexa e acumulativa. Desde a Antiguidade há registros de observações sobre o clima, como as de Hipócrates, que relacionavam condições ambientais à saúde humana. No entanto, foi apenas no século XIX que a noção de mudanças climáticas permanentes ganhou corpo, impulsionada por avanços no conhecimento científico e pela sistematização de observações atmosféricas.



O acúmulo de evidências empíricas e a consolidação da ciência climática levaram, no fim da década de 1980, à percepção da necessidade de uma resposta multilateral coordenada. Nesse contexto, foi criado, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), uma iniciativa conjunta da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O IPCC passou a sintetizar e avaliar o conhecimento científico disponível, servindo como base técnica para negociações internacionais e fornecendo projeções detalhadas sobre aquecimento global, elevação do nível do mar, acidificação dos oceanos e eventos climáticos extremos (IPCC, 2021).

A figura 3 apresenta a série temporal das anomalias da temperatura média global ao longo dos últimos 2019 anos, destacando eventos climáticos significativos que moldaram o sistema climático terrestre em diferentes escalas temporais e espaciais, na qual o IPCC baseou-se para chegar às conclusões do aumento da temperatura. Os dados utilizados provêm do banco de dados PAGES2k, que reúne múltiplos *proxies* paleoclimáticos — como anéis de crescimento de árvores, núcleos de gelo, sedimentos e corais — utilizados para a reconstrução das temperaturas globais até o ano 2000, e do conjunto instrumental HadCRUT4.6, amplamente empregado em estudos de temperatura global moderna, que cobre o período de 2001 a 2019. O eixo horizontal representa os anos do calendário comum (d.C.), de 0 a 2019, enquanto o eixo vertical indica as anomalias de temperatura em relação à média do período de referência (1961-

1990). As áreas coloridas do gráfico evidenciam desvios positivos (vermelho) ou negativos (azul) da média histórica, ou seja, períodos de aquecimento ou resfriamento. Entre os principais eventos climáticos ilustrados, destacam-se o Período Quente Romano (~250-400 d.C.), caracterizado por temperaturas elevadas no Hemisfério Norte, particularmente na Europa; o Período Frio da Alta Idade Média (~500-900 d.C.), marcado por declínio térmico que afetou negativamente a agricultura; o Período Quente Medieval (~950-1250), com registros de aquecimento regional na Europa, América do Norte e Groenlândia; e a Pequena Idade do Gelo (~1450-1850), associada a resfriamento prolongado e impactos socioeconômicos adversos. O Aquecimento Global Moderno, iniciado após 1850, é evidenciado por uma elevação abrupta das anomalias térmicas, especialmente nas últimas décadas, sendo o período entre 2001 e 2019 marcado por valores inéditos nos últimos dois milênios. Esse padrão recente de aquecimento distingue-se por sua magnitude, velocidade e abrangência planetária, atributos sem precedentes no registro paleoclimático recente e amplamente atribuídos à intensificação das emissões antrópicas de gases de efeito estufa, como reconhecido pelos principais relatórios do IPCC.

”

O acúmulo de evidências empíricas
e a consolidação da ciência climática levaram,
no fim da década de 1980, à percepção da
necessidade de uma resposta multilateral coordenada.

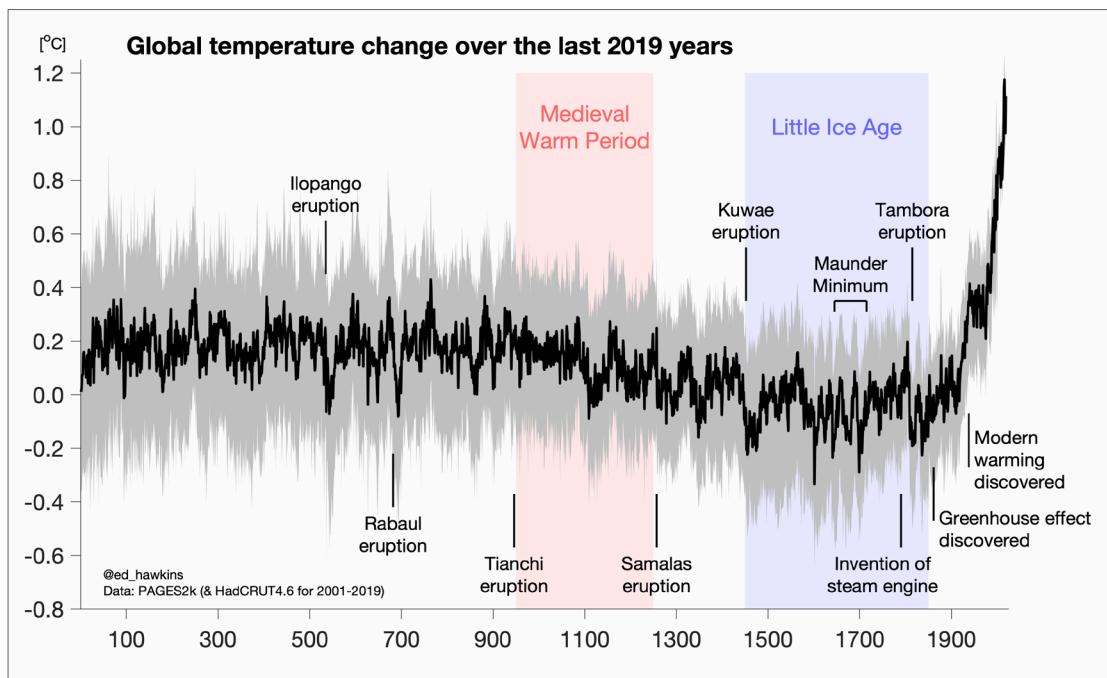


Figura 3. Anomalias da temperatura média global ao longo dos últimos 2000 anos, com base em reconstruções paleoclimáticas (PAGES2k) e registros instrumentais modernos (HadCRUT4.6, 2001–2019). As áreas sombreadas indicam desvios em relação à média do século XX, com destaque para eventos climáticos significativos, como o Período Quente Medieval (MWP), a Pequena Idade do Gelo (LIA) e o recente aquecimento global. A curva moderna evidencia uma elevação acentuada da temperatura sem precedentes no contexto dos últimos dois milênios, reforçando o papel determinante das atividades humanas no forçamento radiativo recente.

Com esse respaldo técnico-científico, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92), realizada no Rio de Janeiro em 1992, resultou na criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Essa convenção estabeleceu o arcabouço legal para a cooperação internacional em mitigação e adaptação climática, além de inaugurar as Conferências das Partes (COPs), eventos anuais que se tornaram o principal fórum de governança climática global.

Na COP3, realizada em Kyoto, em 1997, foi adotado o Protocolo de Kyoto, primeiro acordo internacional juridicamente vinculante que estabeleceu metas de redução de emissões para países desenvolvidos, segundo o princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas. Apesar de sua importância histórica, o protocolo enfrentou desafios políticos e econômicos: os Estados Unidos não o ratificaram e outros países tiveram dificuldades em cumprir suas metas, o que comprometeu sua efetividade. Ainda assim, ele representou um passo decisivo rumo à operacionalização dos compromissos internacionais assumidos em 1992.

No início do século XXI, a produção científica sobre mudanças climáticas expandiu-se exponencialmente. A evolução dos modelos climáticos e o refinamento das observações empíricas proporcionaram uma base mais robusta para a ação internacional. O Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, publicado em 2007, afirmou com mais de 90% de certeza científica que o aquecimento observado desde meados do século XX era “muito provavelmente” causado pelas atividades humanas. O relatório apresentou evidências de aumentos na temperatura média global, no nível do mar e na frequência de eventos extremos, como ondas de calor, secas e tempestades intensas.

Além dos impactos físicos, o relatório de 2007 destacou as consequências ecológicas, sociais e econômicas das mudanças climáticas, especialmente em países em desenvolvimento e em regiões tropicais e costeiras. Enfatizou-se que o aquecimento global compromete a segurança alimentar, intensifica o estresse hídrico, acelera a perda de biodiversidade e aprofunda desigualdades socioeconómicas. Com isso, o debate internacional passou a incluir questões de justiça climática, adaptação e financiamento climático, ampliando a agenda global.

Esses avanços culminaram na assinatura do Acordo de Paris, durante a COP21, em 2015, que representou um novo paradigma da diplomacia climática. O acordo estabeleceu o objetivo de limitar o aquecimento global a “bem abaixo de 2°C” em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para não ultrapass-

sar 1,5°C. Introduziu ainda o conceito de neutralidade de carbono (Net Zero), estabelecendo que as emissões líquidas globais devem ser reduzidas a zero até a metade do século XXI. A partir de então, metas de redução passaram a ser definidas por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), com mecanismos de transparência e revisão periódica (UNEP, 2023).

A figura 4 ilustra, por meio de mapas globais organizados por décadas (de 1970 a 2020), a evolução das anomalias de temperatura do ar anual em relação à média do período de referência 1991-2020. Cada mapa representa um ano, com as cores indicando desvios positivos (vermelho) ou negativos (azul) da temperatura média: quanto mais escura é a tonalidade vermelha, maior o aquecimento; quanto mais azul, maior o resfriamento. Observa-se uma clara tendência de aquecimento global ao longo das décadas. Nos anos 1970 e 1980 predominam áreas azuis, com regiões do planeta registrando temperaturas inferiores à média atual. Já nos anos 1990 há um equilíbrio crescente entre áreas mais quentes e frias. A partir dos anos 2000, especialmente após 2010, há um predomínio quase absoluto de tons vermelhos, indicando aquecimento generalizado em praticamente todas as regiões do globo. Os anos da década de 2020, destacados por um contorno em vermelho, evidenciam o agravamento da crise climática, sendo classificados como os mais quentes já registrados. A visualização reforça a consistência da tendência de aquecimento global, alinhando-se aos alertas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sobre os efeitos das emissões antrópicas de gases de efeito estufa.

”

[...] o aquecimento observado desde meados do século XX é “muito provavelmente” causado pelas atividades humanas.

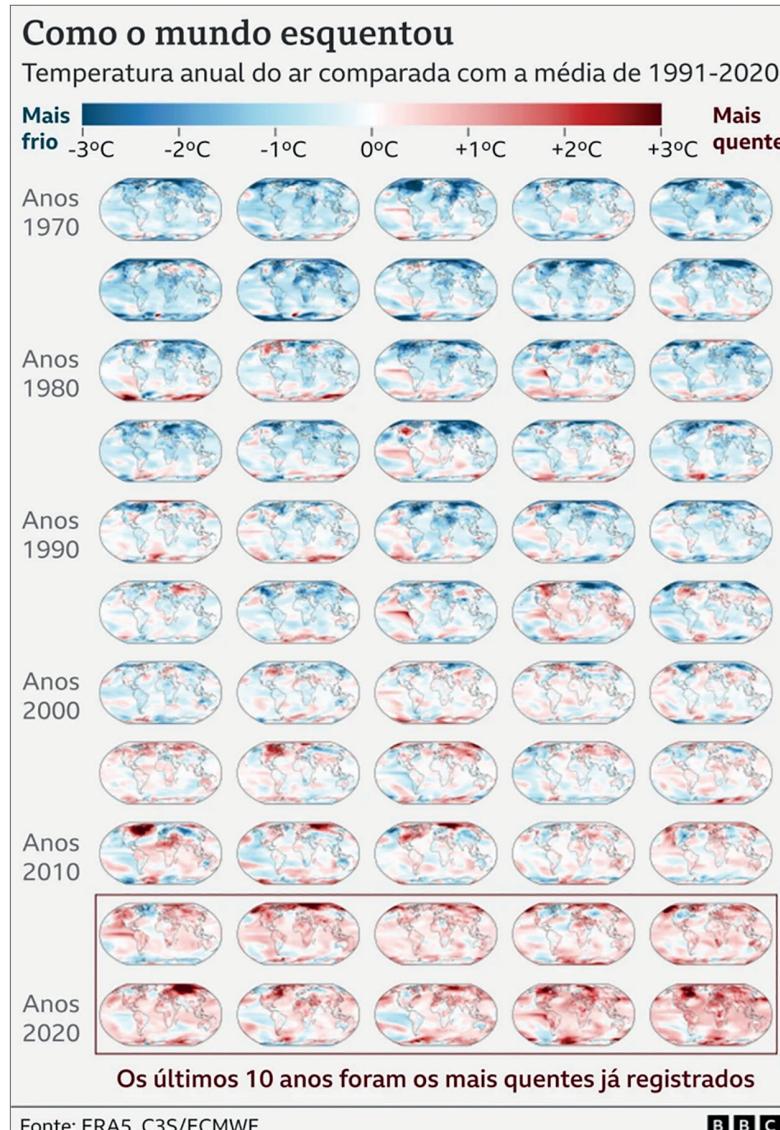


Figura 4. Distribuição espacial das anomalias de temperatura anual do ar em relação à média de 1991-2020, de 1970 a 2023. Os tons de azul representam anos mais frios do que a média, enquanto os tons de vermelho indicam anos mais quentes. A transição progressiva para o vermelho ao longo das décadas evidencia o avanço do aquecimento global. Os mapas dos anos 2020 estão destacados para indicar que essa foi a década mais quente desde o início dos registros instrumentais.

Fonte: ERA5, C3S/ECMWF.

Diferentemente do Protocolo de Kyoto, o Acordo de Paris adotou uma abordagem inclusiva, com compromissos voluntários para países desenvolvidos e em desenvolvimento. Isso incentivou a mobilização de governos, setor privado, instituições financeiras e sociedade civil, tornando a emergência climática um tema transversal nas agendas econômicas, ambientais e geopolíticas (figura 5). O reconhecimento das mudanças climáticas como uma crise sistêmica fortaleceu o engajamento global e impulsionou a adoção de políticas climáticas em múltiplas escalas, com ênfase na sustentabilidade, equidade e inovação tecnológica.

Atualmente, o conceito de mudanças climáticas transcende o simples aumento das temperaturas globais médias, incorporando uma ampla gama de consequências sistêmicas. Entre elas, destacam-se: o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (como ondas de calor, inundações, secas prolongadas e ciclones tropicais), o degelo acelerado de calotas polares e geleiras continentais, a elevação do nível do mar, a acidificação dos oceanos e as perturbações nos ciclos biogeoquímicos (IPCC, 2021; Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Esses efeitos, além de comprometerem a integridade de ecossistemas naturais, já afetam diretamente a segurança alimentar, a saúde pública, os padrões migratórios humanos e a estabilidade econômica global.

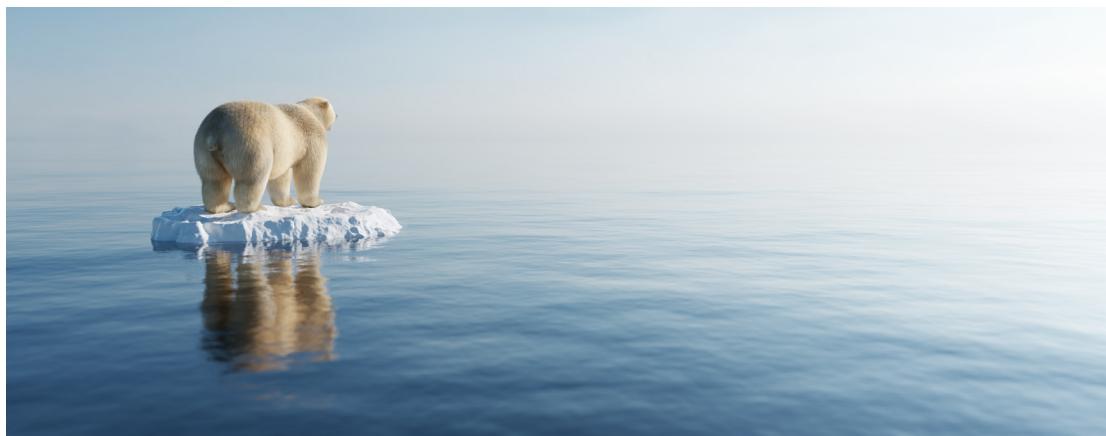




Figura 5. Esquema conceitual representando os principais elementos interconectados no entendimento e enfrentamento das mudanças climáticas globais. A parte superior apresenta os fundamentos científicos, que englobam os processos físico-químicos do aquecimento global, a atuação dos gases de efeito estufa e os ciclos biogeoquímicos. À esquerda, destaca-se o papel da comunidade científica na formulação das teorias climáticas, com contribuições históricas de Fourier (1827), Tyndall (1861) e Arrhenius (1896), que estabeleceram as bases para a compreensão do efeito estufa. À direita estão os impactos das mudanças climáticas, incluindo eventos extremos, elevação do nível do mar, acidificação dos oceanos, alterações em habitats e riscos à saúde humana. Na parte inferior são apresentados os acordos climáticos internacionais, como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e o Acordo de Paris (2015), que formalizam a resposta política global aos desafios climáticos. As setas indicam a relação cíclica e integrada entre o conhecimento científico, os impactos observados e as medidas de governança internacional.

Efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas naturais: mecanismos, impactos e abordagens de mitigação

Impactos sobre ecossistemas terrestres

Os ecossistemas terrestres são particularmente vulneráveis às mudanças climáticas, que vêm provocando alterações profundas e multifacetadas em seus componentes bióticos e abióticos. O aumento da temperatura média global, a intensificação de eventos extremos e a alteração dos regimes de precipitação estão entre os principais fatores de estresse climático que afetam a integridade ecológica de florestas, savanas, campos, zonas áridas e sistemas de montanha. Em especial, regiões sensíveis, como florestas boreais, áreas alpinas e tropicais montanhosas, têm experimentado mudanças rápidas e substanciais na estrutura e funcionalidade de suas comunidades biológicas (Chen *et al.*, 2011; Pecl *et al.*, 2017).

A elevação da temperatura média anual tem promovido deslocamentos altitudinais e latitudinais de diversas espécies, que migram em direção a regiões mais frias na tentativa de manter suas faixas climáticas ideais. Embora esses movimentos possam representar uma estratégia de sobrevivência, eles nem sempre são acompanhados por outras espécies ecologicamente interdependentes, como mutualistas, dispersores ou competidores, o que compromete redes tróficas complexas e interações ecológicas críticas (Tylianakis *et al.*, 2008). Em ecossistemas de montanha, por exemplo, esse processo pode levar ao chamado “efeito penhasco”, em que espécies adaptadas a altitudes elevadas enfrentam restrição espacial extrema, sem possibilidade de migração adicional, resultando em extinções locais.

As alterações fenológicas — entendidas como mudanças no calendário sazonal de eventos biológicos, como floração, frutificação, reprodução e migração — constituem outro impacto bem documentado (Parmesan; Yohe, 2003). Essas alterações interferem na sincronia entre espécies, como no caso da relação entre plantas e seus polinizadores ou entre presas e predadores, gerando

desequilíbrios ecológicos com repercussões diretas na biodiversidade funcional e na estabilidade de ecossistemas. Em sistemas agrícolas e florestais, tais descompassos fenológicos podem comprometer tanto a produtividade quanto a resiliência dos cultivos, particularmente aqueles que dependem de interações biológicas complexas (Kudo; Ida, 2013).

Além das mudanças graduais no clima, eventos extremos vêm tornando-se mais frequentes, intensos e imprevisíveis. Secas prolongadas, ondas de calor, enchentes e incêndios florestais exercem pressões adicionais sobre a biodiversidade terrestre, contribuindo para a degradação de habitats, erosão de solos, mortalidade em massa de plantas e animais e amplificação de processos de desertificação (Trenberth *et al.*, 2013). A maior intensidade e frequência de incêndios, por exemplo, afetam a regeneração de espécies vegetais, alteram a composição florística e reduzem a capacidade de sequestro de carbono das florestas, agravando os efeitos das mudanças climáticas.

A floresta amazônica, ícone da biodiversidade global, é um caso emblemático de vulnerabilidade climática. Estudos indicam que a combinação entre desmatamento, aumento da temperatura e redução da precipitação pode levar o bioma amazônico a ultrapassar um ponto de inflexão ecológica — *tipping point* —, em que retroalimentações negativas, como a perda de evapotranspiração e umidade atmosférica, desencadeiam uma transição irreversível para uma vegetação de tipo savânico (Lovejoy; Nobre, 2018). Esse colapso teria implicações globais, dada a função da Amazônia no ciclo hidrológico sul-americano e na regulação climática planetária.

Em síntese, os impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas terrestres não se restringem à perda de biodiversidade, mas comprometem a estrutura, o funcionamento e os serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano, como o sequestro de carbono, a fertilidade dos solos, a regulação hídrica e o fornecimento de alimentos e matérias-primas. A compreensão des-

ses processos é fundamental para orientar estratégias de mitigação e adaptação que considerem a conservação da biodiversidade e a resiliência socioecológica frente às transformações em curso.

A figura 6 apresenta as anomalias anuais da temperatura média global do ar em relação à média do período pré-industrial (1850–1900), com base nos dados do repositório ERA5, do Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo (ECMWF), abrangendo os anos de 1940 a 2024. O eixo vertical indica a variação de temperatura em graus Celsius (°C), e o eixo horizontal



mostra a sequência temporal. Cada barra representa o valor anual da anomalia de temperatura, com coloração em degradê de amarelo a vermelho escuro, simbolizando o aumento progressivo do aquecimento global. O destaque recai sobre o ano de 2024, que aparece como o mais quente já registrado, superando pela primeira vez a média de +1,5°C acima dos níveis pré-industriais — limiar simbólico e crítico estabelecido pelo Acordo de Paris. O dado de 2024 evidencia uma tendência alarmante de intensificação do aquecimento global nas últimas décadas, especialmente após os anos 1980.



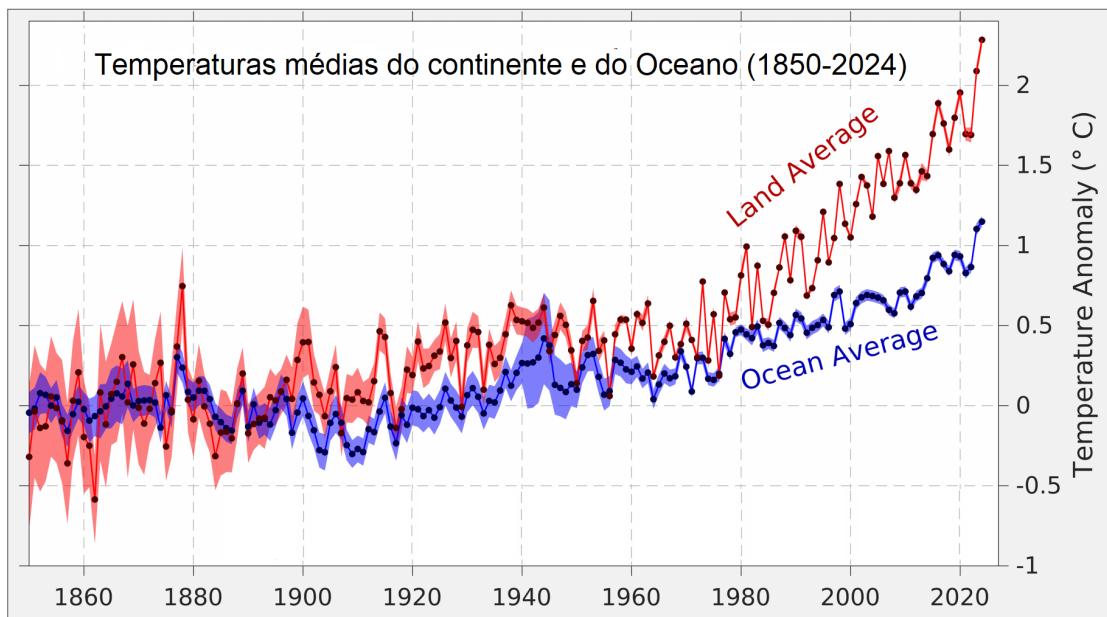


Figura 6. As áreas terrestres geralmente apresentam cerca do dobro do aquecimento em comparação com os oceanos. Em relação às médias de 1850-1900, a média terrestre em 2024 aumentou $2,28 \pm 0,12^\circ\text{C}$ ($4,11 \pm 0,22^\circ\text{F}$) e a temperatura da superfície do oceano, excluindo as regiões de gelo marinho, aumentou $1,15 \pm 0,07^\circ\text{C}$ ($2,07 \pm 0,12^\circ\text{F}$). A maior parte deste aquecimento ocorreu desde 1970. Tanto o continente quanto o oceano estabeleceram novos recordes observacionais individuais em 2024. A figura a seguir mostra as mudanças de temperatura na terra e no oceano em relação à média de 1850 a 1900. A tendência de as médias terrestres aumentarem mais rapidamente do que as médias oceânicas é claramente visível. Tanto a tendência do continente aquecer mais rapidamente do que o oceano quanto a maior taxa de aquecimento no Ártico são esperadas com base na compreensão de como o aumento nas concentrações de gases de efeito estufa impactará o clima da Terra. Conforme relatado pelo Global Carbon Project e outros observadores, 2024 registrou um novo recorde para o nível de dióxido de carbono na atmosfera. Isso se deve à contínua acumulação de dióxido de carbono proveniente de atividades humanas. A quantidade anual de dióxido de carbono emitida em 2024 foi 0,8% maior do que em 2023 e estabeleceu um novo recorde de todos os tempos.

O colapso da Amazônia frente às mudanças climáticas: um cenário de retroalimentação e colapso socioecológico

A floresta amazônica, maior floresta tropical do mundo, desempenha papel central na regulação climática regional e global, atuando como um importante sumidouro de carbono, regulador do ciclo hidrológico e repositório de biodiver-

sidade. Contudo, a combinação entre desmatamento, degradação florestal e o agravamento das mudanças climáticas tem aproximado a região de um ponto de não retorno, em que a floresta perde sua capacidade de se manter funcionalmente e entra em colapso ecológico.

A dinâmica climática da Amazônia é fortemente modulada pela intensa evapotranspiração de sua cobertura vegetal, responsável pela formação de nuvens e pela redistribuição de umidade atmosférica por meio dos chamados “rios voadores”. Essa umidade é fundamental não apenas para o sistema florestal amazônico, como também para regimes pluviométricos de regiões distantes, como o Centro-Oeste e o Sudeste do Brasil, e até mesmo para o Cone Sul do continente. Entretanto, com o aumento da temperatura global e o prolongamento de períodos de seca, a floresta torna-se mais suscetível à degradação, incêndios e perda de cobertura vegetal.

Modelos climáticos apontam que, com um aumento médio da temperatura global entre 3 e 4°C, e uma redução significativa da precipitação anual, grande parte da floresta amazônica pode ser substituída por savanas ou ecossistemas degradados. Esse processo é acelerado por *feedbacks* positivos, como a perda de cobertura vegetal que reduz a evapotranspiração, levando a menos chuvas e, portanto, a maior estresse hídrico e novas perdas florestais. O colapso da capacidade de reciclagem da umidade é uma das manifestações mais preocupantes desse ciclo de retroalimentação (quadro 1).

Do ponto de vista biogeoquímico, o colapso da Amazônia compromete a capacidade de sequestro de carbono. A floresta, que historicamente atuou como um importante sumidouro de CO₂, tem apresentado sinais crescentes de perda de funcionalidade, passando a ser fonte líquida de carbono em algumas regiões, sobretudo nas áreas mais afetadas por queimadas e degradação (Gatti *et al.*, 2021). A substituição da floresta por formações vegetais de menor biomassa reduz significativamente o estoque de carbono, agravando a concentração atmosférica de GEE e retroalimentando o aquecimento global.

”

Do ponto de vista biogeoquímico, o colapso da Amazônia compromete a capacidade de sequestro de carbono.

Os impactos sociais também são relevantes. Milhões de pessoas dependem diretamente dos serviços ecossistêmicos fornecidos pela floresta, como regulação climática, qualidade da água, fertilidade do solo e biodiversidade. Comunidades ribeirinhas, indígenas e populações urbanas da região Norte enfrentam desafios crescentes decorrentes da escassez de água, perda de peixes, incêndios frequentes e aumento de doenças transmitidas por vetores. O colapso da floresta compromete também a segurança alimentar e hídrica de regiões produtoras de alimentos no Brasil e em países vizinhos.



As evidências científicas sugerem que, caso as tendências atuais se mantenham, a Amazônia poderá atingir o ponto de inflexão ainda neste século, o que terá implicações irreversíveis para o equilíbrio climático do planeta. Políticas de mitigação eficazes, como o fim imediato do desmatamento ilegal, a recuperação de áreas degradadas, o reconhecimento de territórios indígenas e a valorização da bioeconomia da floresta em pé, são medidas urgentes e imprescindíveis. A integração da Amazônia nas agendas globais de clima e biodiversidade deve ser acompanhada de investimentos em ciência, monitoramento e cooperação internacional.

O colapso da Amazônia não é apenas uma tragédia ambiental local, mas um evento de ruptura sistêmica de alcance global. Evitá-lo é uma tarefa civilizatória que transcende fronteiras nacionais e exige respostas urgentes, baseadas no conhecimento científico, na justiça ambiental e na cooperação internacional.

Quadro 1. Impactos nos ecossistemas terrestres.

	<h3>ALTERAÇÕES FENOLÓGICAS</h3> <p>Ciclos sazonais alterados levam a desencontros tróficos e falhas reprodutivas (Parmesan; Yohe, 2003; Kudo; Ida, 2013).</p>
	<h3>DESLOCAMENTO DE FAIXAS DE DISTRIBUIÇÃO E EXTINÇÕES LOCAIS</h3> <p>Espécies migram em direção aos polos ou a altitudes maiores, modificando comunidades e aumentando o risco de extinção (Chen <i>et al.</i>, 2011; Walther <i>et al.</i>, 2002).</p>
	<h3>TRANSFORMAÇÕES DE BIOMAS</h3> <p>Retroalimentações ecológicas, como redução da evapotranspiração, podem levar ao colapso de biomas como a Amazônia (Lovejoy; Nobre, 2018).</p>

Impactos sobre ecossistemas marinhos e costeiros

Os ecossistemas marinhos e costeiros estão entre os mais afetados pelas mudanças climáticas globais, sofrendo múltiplas pressões ambientais simultâneas que interagem de forma sinérgica e cumulativa. Entre os principais vetores de impacto destacam-se a elevação do nível do mar, a acidificação dos oceanos, a redução da oxigenação das águas profundas e o aquecimento das massas oceânicas, fenômenos que vêm se intensificando nas últimas décadas como resultado do aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (Bindoff *et al.*, 2019).

A elevação do nível do mar, decorrente da expansão térmica da água e do derretimento de calotas polares e geleiras continentais, tem consequências diretas sobre zonas costeiras densamente povoadas, estuários, recifes de coral e manguezais. Esses ambientes, além de abrigarem alta biodiversidade, exercem funções ecossistêmicas essenciais, como proteção contra tempestades, regulação do ciclo do carbono e suporte à reprodução de espécies marinhas economicamente importantes.

A acidificação dos oceanos — processo resultante da absorção de cerca de um terço do dióxido de carbono (CO_2) emitido na atmosfera — altera o pH da água do mar e prejudica organismos calcificantes, como corais, moluscos e certos grupos de fitoplâncton (Fabry *et al.*, 2008). Essa acidificação reduz a disponibilidade de carbonato de cálcio, comprometendo processos biogeoquímicos fundamentais e gerando efeitos em cascata nas cadeias alimentares marinhas e nas economias costeiras dependentes da pesca artesanal e do turismo ecológico.

Entre os ecossistemas mais vulneráveis estão os recifes de coral, considerados verdadeiros hotspots de biodiversidade marinha. Esses sistemas vêm sofrendo episódios recorrentes e cada vez mais intensos de branqueamento de corais, fenômeno induzido pelo estresse térmico que leva à expulsão das zooxantelas simbióticas, essenciais à nutrição e ao crescimento dos corais (Hughes *et al.*, 2017). O colapso dos recifes compromete diretamente a biodiversidade marinha associada e reduz a resiliência ecológica frente a distúrbios climáticos e antrópicos.

Além dos efeitos físicos e químicos, as mudanças climáticas interagem com estressores ambientais locais, como eutrofização, sobrepesca, introdução de espécies exóticas e poluição química. Em estuários e zonas costeiras, o estresse térmico age sinergicamente com contaminantes emergentes, como metais pesados, pesticidas e nanopartículas plásticas, elevando os riscos ecotoxicológicos. Estudos recentes mostram que o aquecimento pode aumentar a biodisponibilidade e a toxicidade de poluentes, interferir na resposta imunológica de organismos marinhos e comprometer a funcionalidade ecológica de comunidades inteiras (Noyes, 2009).

Mudanças nos padrões de circulação oceânica e nas correntes marinhas — como a desaceleração da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC) — afetam as rotas migratórias de peixes pelágicos e mamíferos marinhos, além de modificar a distribuição espacial dos estoques pesqueiros (Cheung *et al.*, 2010). Essas alterações já provocam deslocamentos geográficos da atividade pesqueira, acarretando tensões geopolíticas, desafios à governança multilateral e à repartição equitativa dos recursos vivos marinhos.

Em zonas tropicais costeiras, como manguezais, marismas e pradarias marinhas, os efeitos combinados da elevação do nível do mar, salinização dos solos e variações hidrológicas ameaçam a integridade ecológica e reduzem a capacidade desses ecossistemas de prover serviços ambientais essenciais. Entre esses serviços, destacam-se o sequestro de carbono, a proteção contra erosão litorânea, a filtragem de poluentes e a produção de biomassa pesqueira (Alongi, 2012).

Portanto, os impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas marinhos e costeiros são multifatoriais e transversais, afetando desde processos biofísicos elementares até dimensões socioeconômicas complexas (figura 7). A compreensão integrada dessas dinâmicas é fundamental para a formulação de políticas de gestão costeira integrada, de conservação marinha baseada em ecossistemas e de adaptação climática orientada pela ciência, especialmente em regiões tropicais, onde a vulnerabilidade ecológica e social tende a ser mais acentuada.

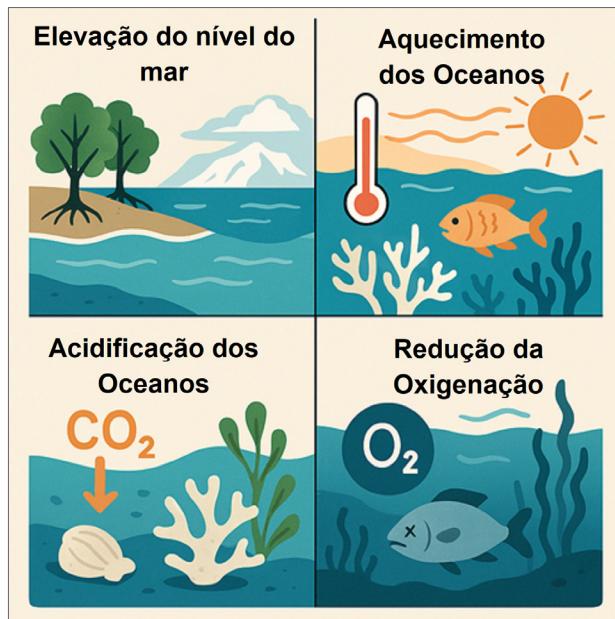


Figura 7. Apresenta os principais impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas marinhos e costeiros. No quadrante superior esquerdo, a elevação do nível do mar ameaça manguezais e zonas costeiras. No quadrante superior direito, o aquecimento dos oceanos provoca estresse térmico em organismos marinhos. No inferior esquerdo, a acidificação dos oceanos, causada pela absorção de CO₂ atmosférico, compromete organismos calcificantes, como moluscos e corais. No inferior direito, a redução da oxigenação das águas profundas afeta a sobrevivência de diversas espécies, alterando a funcionalidade ecológica dos ecossistemas.

Quadro 2. Impactos nos ecossistemas marinhos e costeiros.

Declínio dos recifes de coral: eventos de branqueamento aumentam com o aquecimento e a acidificação, ameaçando a biodiversidade (Hughes *et al.*, 2017).

Mudanças nas pescarias e cadeias alimentares: alterações na produtividade e distribuição das espécies afetam a segurança alimentar (Cheung *et al.*, 2010; Poloczanska *et al.*, 2013).

Degradação costeira: manguezais e marismas perdem funcionalidade frente ao aumento do nível do mar e à salinização (Alongi, 2012).

Acidificação dos oceanos e diminuição do oxigênio (figura 7).

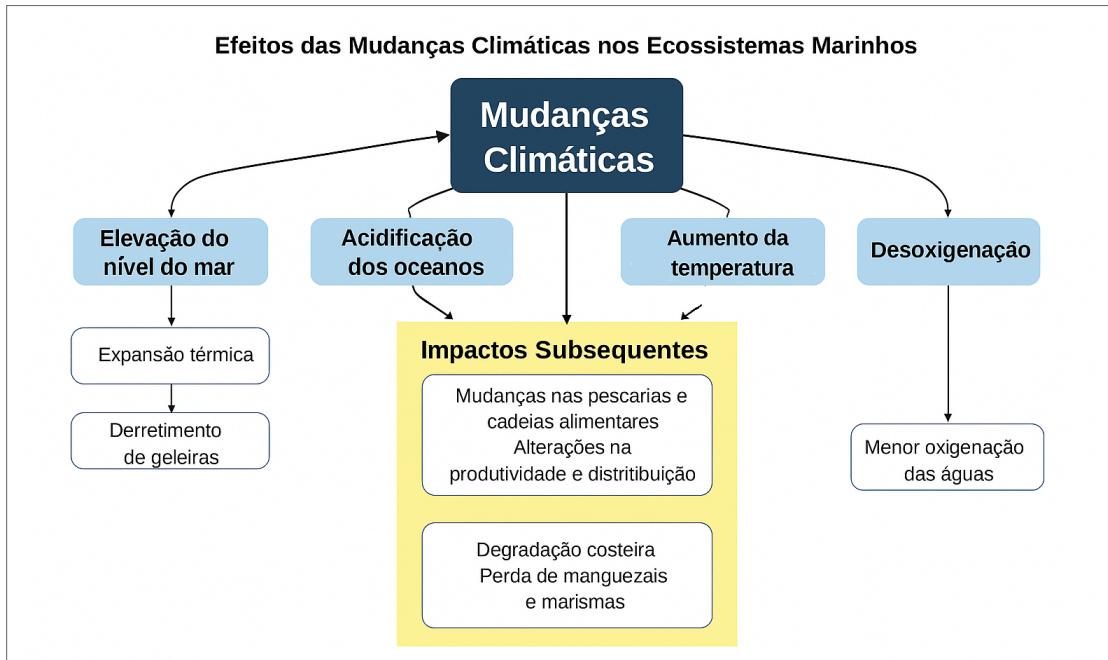


Figura 8. Diagrama explicativo dos principais efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas marinhos e costeiros. A figura centraliza as “mudanças climáticas” como fator indutor de processos interligados, incluindo: elevação do nível do mar (devido à expansão térmica e ao derretimento de geleiras), acidificação dos oceanos (pela absorção de CO₂), desoxigenação (redução do oxigênio dissolvido) e aumento da temperatura das águas. Esses processos desencadeiam impactos subsequentes, como o declínio dos recifes de coral (eventos de branqueamento), alterações na produtividade e na distribuição das cadeias alimentares e das pescarias e a degradação de habitats costeiros, como manguezais e marismas. A imagem ressalta a natureza interconectada e cumulativa dos impactos climáticos sobre os sistemas oceânicos.

Impactos sobre ecossistemas de água doce e zonas úmidas

Os ecossistemas de água doce — incluindo rios, lagos, pântanos, várzeas e zonas úmidas continentais — exercem funções ecológicas essenciais, como o fornecimento de água potável, suporte à biodiversidade aquática, regulação do clima local e sequestro de carbono orgânico. Entretanto, esses sistemas vêm sendo severamente afetados pelas mudanças climáticas globais, com impactos

que se somam à crescente pressão antrópica resultante da urbanização, poluição, agricultura intensiva e fragmentação de habitats (Dudgeon *et al.*, 2006).

A redução na precipitação em muitas regiões e o consequente aumento da evaporação, impulsionado pelas temperaturas mais elevadas, têm contribuído para a intensificação da escassez hídrica. Esse processo compromete diretamente a disponibilidade e a qualidade dos habitats aquáticos, afetando organismos como peixes, anfíbios, macroinvertebrados e microrganismos planctônicos — todos fundamentais para a manutenção da estrutura e do funcionamento trófico dos ecossistemas (Dudgeon *et al.*, 2006; Reid *et al.*, 2013). A diminuição dos níveis de água e a fragmentação de corpos hídricos reduzem a conectividade longitudinal e lateral entre habitats, limitando fluxos genéticos e ecológicos e dificultando processos migratórios e reprodutivos (Reid *et al.*, 2013).

As secas severas e os eventos de represamento — seja por construção de barragens ou pela perda de regime natural de cheias — alteram profundamente a dinâmica hidrológica, impedindo a renovação de habitats críticos, como lagoas marginais, canais de inundação e florestas ripárias. Essa desconexão ecológica entre os ambientes aquáticos e terrestres adjacentes afeta negativamente a diversidade funcional e genética das espécies, bem como os serviços ecossistêmicos associados à regulação hidrológica, ciclagem de nutrientes e produtividade biológica.

Outro efeito importante das mudanças climáticas é a alteração dos pulsos de inundação em planícies aluviais, o que compromete ciclos ecológicos dependentes da sazonalidade, como a reprodução de peixes migradores, a dispersão de sementes hidrocóricas e a germinação de espécies vegetais adaptadas a regimes de alagamento (Junk *et al.*, 1989). A produtividade primária é reduzida, assim como a disponibilidade de nutrientes, gerando impactos em cascata sobre as redes alimentares aquáticas e terrestres.

Um exemplo emblemático dessa vulnerabilidade é o Pantanal brasileiro, reconhecido como a maior área úmida continental do planeta. Estudos recentes demonstram que a combinação entre o aquecimento global e o avanço do

agronegócio tem levado à redução da extensão e duração do pulso de inundação, promovendo a conversão de áreas alagadas permanentes em ambientes secos e favorecendo a ocorrência de incêndios de grande escala. Esse processo compromete a biodiversidade, reduz a oferta de água doce, ameaça populações tradicionais e pode levar ao colapso ecológico do sistema (Reid *et al.*, 2019).

Além disso, o aquecimento das águas interiores altera a solubilidade do oxigênio, promove a estratificação térmica e pode favorecer o crescimento de florações de cianobactérias tóxicas, com efeitos deletérios sobre a fauna aquática e riscos à saúde humana. A intrusão salina em aquíferos e lagos costeiros, provocada pela elevação do nível do mar, representa outro fator crítico em regiões litorâneas, afetando a qualidade da água e a sobrevivência de espécies dulcícolas adaptadas a baixos níveis de salinidade.

Portanto, os impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas de água doce e zonas úmidas são diversos, interdependentes e muitas vezes irreversíveis (figura 9). Esses sistemas desempenham papel estratégico na conservação da biodiversidade e na regulação de ciclos biogeoquímicos. A proteção e a restauração desses ambientes, por meio de políticas integradas de gestão de bacias hidrográficas, conservação de nascentes, corredores ecológicos e adaptação climática baseada na natureza, são fundamentais para preservar sua resiliência frente às transformações ambientais em curso.

Quadro 3. Ecossistemas de água doce e zonas úmidas.

Regimes hidrológicos alterados: a maior evaporação e frequência de secas afetam a biodiversidade e a funcionalidade ecossistêmica (Dudgeon *et al.*, 2006; Reid *et al.*, 2019).

Fragmentação de habitats aquáticos: a perda de conectividade prejudica o deslocamento e a adaptação das espécies (Liermann *et al.*, 2012).

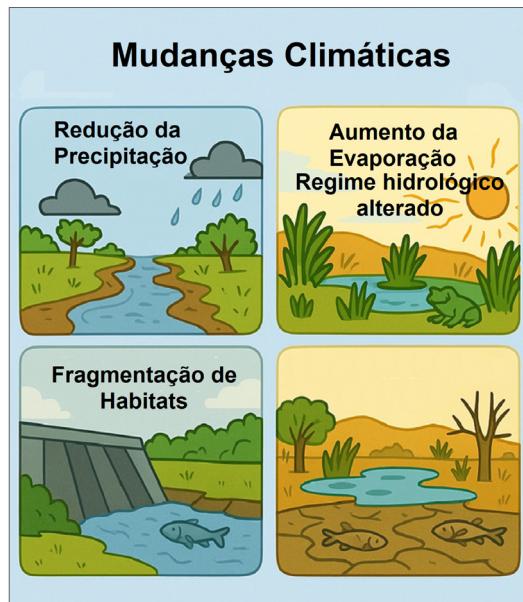


Figura 9. Aborda os impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas aquáticos continentais. A figura ilustra quatro efeitos principais: (1) redução da precipitação, que compromete a disponibilidade hídrica e afeta os fluxos naturais de rios e lagos; (2) aumento da evaporação, intensificado pelas altas temperaturas, resultando em perda de volume hídrico e estresse hídrico para a fauna e flora; (3) fragmentação de habitats, muitas vezes causada por construções como barragens, que impedem a conectividade ecológica entre ambientes aquáticos; e (4) regimes hidrológicos alterados, caracterizados por secas mais intensas e prolongadas, afetando negativamente a sobrevivência de espécies aquáticas e a estabilidade ecológica dos ambientes úmidos. Esses efeitos são interdependentes e contribuem para o declínio da biodiversidade e a degradação dos serviços ecossistêmicos.

Abordagens interdisciplinares e perspectivas para a conservação

A mitigação dos impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas naturais requer uma abordagem inter e transdisciplinar, capaz de articular saberes provenientes das ciências naturais, sociais e aplicadas. A complexidade e a escala dos processos envolvidos exigem não apenas conhecimento técnico-científico especializado, como também a integração entre áreas como climatologia, ecologia funcional, biologia da conservação, economia ecológica, direito ambiental e governança socioambiental.

Nesse contexto, políticas públicas de conservação adaptativa, restauração ecológica, planejamento territorial participativo e manejo baseado em ecossistemas emergem como estratégias centrais. Tais abordagens devem ser orientadas pela resiliência ecológica e pela capacidade adaptativa dos sistemas socioecológicos, considerando dinâmicas climáticas futuras e múltiplos cenários de impacto. A implementação de Áreas Protegidas Climaticamente Inteligentes (*Climate-Smart Protected Areas*), que integram dados climáticos, conectividade ecológica e participação comunitária, representa uma inovação promissora para ampliar a efetividade da conservação em contextos de rápida transformação ambiental (Seddon *et al.*, 2020).

Outro eixo estratégico é o fortalecimento de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), que incluem ações como a proteção e restauração de ecossistemas costeiros, florestais e úmidos para aumentar a resiliência climática, promover a biodiversidade e gerar cobenefícios socioeconômicos. Tais soluções não apenas mitigam os efeitos das mudanças climáticas, como também oferecem alternativas mais sustentáveis, equitativas e economicamente viáveis em relação a soluções puramente tecnológicas ou estruturais.

Paralelamente, torna-se imprescindível o fortalecimento de sistemas de monitoramento ambiental de longo prazo, em especial em ecossistemas considerados *hotspots* de vulnerabilidade, como manguezais, estuários, florestas tropicais e zonas úmidas interiores. A geração contínua de dados de alta resolução é fundamental para alimentar modelos preditivos, avaliar respostas ecológicas em escalas distintas e subsidiar processos decisórios em políticas públicas. Nesse contexto, é igualmente necessário ampliar o investimento em pesquisa científica aplicada, com incentivo à formação de redes colaborativas que integrem instituições acadêmicas, centros de monitoramento e comunidades locais.

A promoção da justiça climática também deve estar no cerne das estra-

tégias de adaptação. Comunidades tradicionais, povos indígenas, populações ribeirinhas e extrativistas são frequentemente os grupos mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas, mesmo sendo os menos responsáveis por suas causas estruturais. Garantir a participação efetiva desses grupos nos processos de planejamento, decisão e manejo ambiental é uma exigência ética, política e epistemológica (Schlosberg; Collins, 2014). Essa inclusão fortalece o protagonismo local, incorpora saberes tradicionais à gestão adaptativa e amplia a legitimidade das ações implementadas.

Na interface entre ecologia e toxicologia, a ecotoxicologia contemporânea encontra um novo desafio: incorporar os efeitos das mudanças climáticas como moduladores-chave das interações entre contaminantes e organismos. Alterações em temperatura, salinidade, pH e oxigênio dissolvido, por exemplo, podem modificar a toxicidade de compostos químicos, sua biodisponibilidade e os efeitos fisiológicos sobre a biota. A compreensão dessas interações sinérgicas ou antagonistas é fundamental para o desenvolvimento de avaliações de risco ambiental mais realistas, com implicações diretas para políticas regulatórias, licenciamento ambiental e conservação da biodiversidade aquática (Noyes, 2009).

Nesse sentido, a biologia marinha aplicada à conservação e à gestão de recursos pesqueiros e aquáticos ocupa posição central nas agendas científica e política de adaptação climática. Ferramentas como modelos ecológicos preditivos, estudos genômicos de estresse ambiental, biomarcadores de resposta fisiológica e abordagens integradas da fisiologia da conservação tornam-se essenciais para a identificação de espécies sentinelas, habitats críticos e áreas prioritárias para ação. Além disso, essas ferramentas subsidiam estratégias baseadas em evidência científica para orientar planos de manejo adaptativo, definição de zonas de amortecimento ecológico e implantação de medidas preventivas em áreas de alto risco.

Quadro 4. Sinergias com outros estressores antrópicos.

	<p>As mudanças climáticas raramente atuam de maneira isolada. Ao contrário, elas potencializam os efeitos de outros estressores antrópicos — como a fragmentação de habitats, a poluição química, a sobrepesca, a introdução de espécies exóticas invasoras e a conversão de uso da terra. Essa interação multifatorial resulta em processos de degradação ecológica cumulativa, que reduzem drasticamente a resiliência dos ecossistemas e aumentam a probabilidade de colapsos ecológicos abruptos (Brook <i>et al.</i>, 2008; Tylianakis <i>et al.</i>, 2008). Estratégias de mitigação e adaptação, portanto, devem considerar esse cenário multicausal para maximizar sua efetividade e alcance (figura 10).</p>
---	---



Figura 10. A conservação da biodiversidade e dos ecossistemas frente às mudanças climáticas requer a integração de múltiplos campos do conhecimento. As ciências naturais contribuem com fundamentos ecológicos e biológicos; as ciências sociais oferecem ferramentas para entender e intervir nas dimensões humanas e institucionais da conservação; as ciências aplicadas propõem soluções práticas por meio de políticas públicas, planejamento territorial e manejo ecossistêmico; e as perspectivas emergentes indicam caminhos inovadores, como Áreas Protegidas Clímaticamente Inteligentes, Soluções Baseadas na Natureza e estratégias de monitoramento de longo prazo. A figura sintetiza essa abordagem inter e transdisciplinar como essencial para enfrentar os desafios contemporâneos da conservação.

Novo cenário das mudanças climáticas: expansão conceitual, desafios emergentes e perspectivas integradas

O conceito de mudanças climáticas evoluiu de uma abordagem centrada em aspectos físico-climáticos para uma compreensão sistêmica, que abrange dimensões ecológicas, econômicas, éticas e geopolíticas. A literatura científica contemporânea destaca, entre outros pontos, a distribuição desigual dos impactos sobre os países em desenvolvimento, as responsabilidades históricas das nações industrializadas e a urgência de transições energéticas rumo a economias de baixo carbono (figura 11).

Diante desse novo contexto, surgem debates sobre temas emergentes, como a geoengenharia climática, que reúne propostas de intervenção deliberada no sistema climático da Terra com o objetivo de mitigar o aquecimento global. Entre essas técnicas, destacam-se a injeção de aerossóis estratosféricos para refletir a radiação solar (SRM – *Solar Radiation Management*) e a remoção de dióxido de carbono atmosférico (CDR – *Carbon Dioxide Removal*) por meio de abordagens como bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BEC-CS) e mineralização artificial (*National Academies of Sciences*, 2021). Apesar de tecnicamente promissoras, tais estratégias suscitam preocupações quanto a riscos geopolíticos, externalidades ecológicas imprevistas e possíveis efeitos climáticos regionais indesejados.

Em paralelo, estratégias de mitigação e adaptação climática consolidaram-se como eixos centrais das respostas institucionais ao desafio climático. A mitigação busca reduzir as causas do fenômeno — sobretudo a emissão de gases de efeito estufa — por meio da substituição de fontes fósseis por energias renováveis, reflorestamento, mudanças no uso da terra e descarbonização da economia. A adaptação, por sua vez, refere-se à implementação de medidas que permitam a indivíduos, comunidades e ecossistemas lidar com os impactos

inevitáveis das mudanças em curso. Exemplos incluem a reconfiguração de cidades costeiras, a adoção de sistemas agrícolas resilientes à seca e o reforço da infraestrutura de saúde frente a doenças transmitidas por vetores climáticos, como dengue, zika e cólera.

Dentro desse espectro, o conceito de resiliência climática ganha destaque. Ele descreve a capacidade de sistemas sociais e ecológicos de resistir, absorver, recuperar-se e adaptar-se a choques climáticos, mantendo suas funções essenciais. Essa abordagem é particularmente relevante para países tropicais e em desenvolvimento, como o Brasil, onde vulnerabilidades socioambientais e limitações institucionais se combinam, agravando os riscos e reduzindo a capacidade de resposta (Adger *et al.*, 2005; PBMC, 2016).



A dimensão socioeconômica e distributiva das mudanças climáticas tornou-se central. Diversos estudos apontam que comunidades indígenas, populações tradicionais e habitantes de áreas costeiras empobrecidas — embora pouco responsáveis pelas emissões históricas — figuram entre os grupos mais vulneráveis aos impactos climáticos. Esse reconhecimento impulsiona o debate sobre justiça climática, que reivindica uma repartição equitativa de responsabilidades, tecnologias e financiamentos, conforme previsto no Acordo de Paris e reiterado por organismos multilaterais.

O entendimento contemporâneo sobre mudanças climáticas, portanto, reflete um avanço não apenas no campo científico, como também na capacidade da sociedade de integrar múltiplas dimensões da crise climática. Isso inclui a mobilização de tecnologias limpas — como energia solar, eólica, hidrogênio verde, agricultura regenerativa e biotecnologias para captura de carbono — bem como transformações culturais, institucionais e comportamentais rumo a sociedades verdadeiramente sustentáveis.

Diante do agravamento das emissões globais e da redução da janela de oportunidade para manter o aquecimento abaixo de 1,5°C, conforme advertido pelo IPCC (2023), a urgência de uma ação climática coordenada e informada por evidência científica robusta nunca foi tão evidente.

Nos últimos anos, o reconhecimento das mudanças climáticas como uma emergência planetária intensificou esforços coordenados entre governos, sociedade civil, setor produtivo e instituições científicas. A década de 2020 inaugurou uma nova fase nas negociações climáticas internacionais, focada na implementação efetiva do Acordo de Paris, no fortalecimento dos mecanismos de transparência e no estabelecimento de metas mais ambiciosas de neutralidade de carbono.

Durante a COP26 (Glasgow, 2021) consolidou-se o objetivo de limitar o aquecimento global a 1,5°C, conforme defendido no Relatório Especial do IPCC (2018), que demonstrou que aumentos superiores a essa margem trariam con-

sequências graves para a biodiversidade, ecossistemas e sociedades humanas. O Pacto Climático de Glasgow reforçou a necessidade de eliminação gradual de subsídios aos combustíveis fósseis e o incremento do financiamento climático para nações mais vulneráveis.

Na sequência, a COP28 (Dubai, 2023) realizou o primeiro Global Stocktake, uma avaliação coletiva do progresso global frente aos compromissos climáticos. O balanço revelou que, embora avanços tenham ocorrido, as políticas atuais ainda estão aquém do necessário para limitar o aquecimento a 2°C, e muito distantes do que é preciso para 1,5°C (United Nations Climate Change, 2023; UNEP, 2023). Como resposta, foi lançada uma convocação global para acelerar a transição energética com base em energias renováveis, tecnologias de captura de carbono e soluções baseadas na natureza.

Nesse cenário, a ciência tem papel crucial na formulação de políticas públicas e na definição de metas climáticas baseadas em evidências. O conhecimento gerado tornou-se cada vez mais interdisciplinar, integrando climatologia, ecologia, saúde pública, economia ambiental, biologia marinha e ecotoxicologia. Esses campos demonstram que os efeitos do aquecimento global — como estresse térmico, acidificação dos oceanos, elevação do nível do mar e contaminação por poluentes emergentes — ocorrem de forma sinérgica, agravando os riscos para ecossistemas aquáticos, especialmente em regiões tropicais da América do Sul.

Estudos recentes mostram que o aumento da temperatura pode intensificar a toxicidade de compostos como pesticidas, metais pesados e microplásticos, afetando organismos marinhos fundamentais à cadeia alimentar (Gissi *et al.*, 2020; Guild *et al.*, 2025). Alterações em parâmetros físico-químicos — como pH e oxigênio dissolvido — interferem na fisiologia de peixes e invertebrados, comprometendo reprodução, crescimento e imunidade. Esses efeitos são críticos para áreas como o litoral brasileiro, onde estuários e zonas costeiras funcionam como berçários ecológicos e sustentam atividades pesqueiras e de aquicultura.

Frente a esses desafios, cresce a expectativa de que a ciência contribua diretamente para a formulação de instrumentos de gestão ambiental, planejamento costeiro e estratégias de adaptação climática. Organismos como o IPCC e o IPBES reforçam a importância de integrar conhecimentos tradicionais, ciência aplicada e inovação tecnológica para enfrentar a crise climática de maneira justa e eficaz. No Brasil, iniciativas como o PBMC e o programa AdaptaClima representam avanços na conexão entre ciência e política pública, ainda que enfrentem entraves institucionais e orçamentários.

O fortalecimento dessas ações exigirá abordagem científica transdisciplinar, financiamento contínuo à pesquisa e cooperação internacional estruturada. À medida que os impactos climáticos se intensificam — comprometendo a segurança hídrica, alimentar, energética e ecológica —, torna-se imperativo consolidar uma governança climática eficaz, justa e baseada no conhecimento.

Quadro 5. Estratégias de conservação e adaptação.

Soluções Baseadas na Natureza (SbN): a restauração de ecossistemas, a proteção de biomas ricos em carbono e o aumento da conectividade paisagística contribuem simultaneamente para a mitigação e resiliência ecológica (Seddon *et al.*, 2020).

Áreas Protegidas Inteligentes para o Clima (Climate-Smart Protected Areas): as ações de conservação devem ser dinâmicas e incorporar projeções climáticas e retroalimentações socioecológicas (Heller; Zavaleta, 2009).

Inclusão de saberes tradicionais e indígenas: a valorização de saberes tradicionais amplia a eficácia e a legitimidade cultural das ações de conservação (Schlosberg; Collins, 2014).

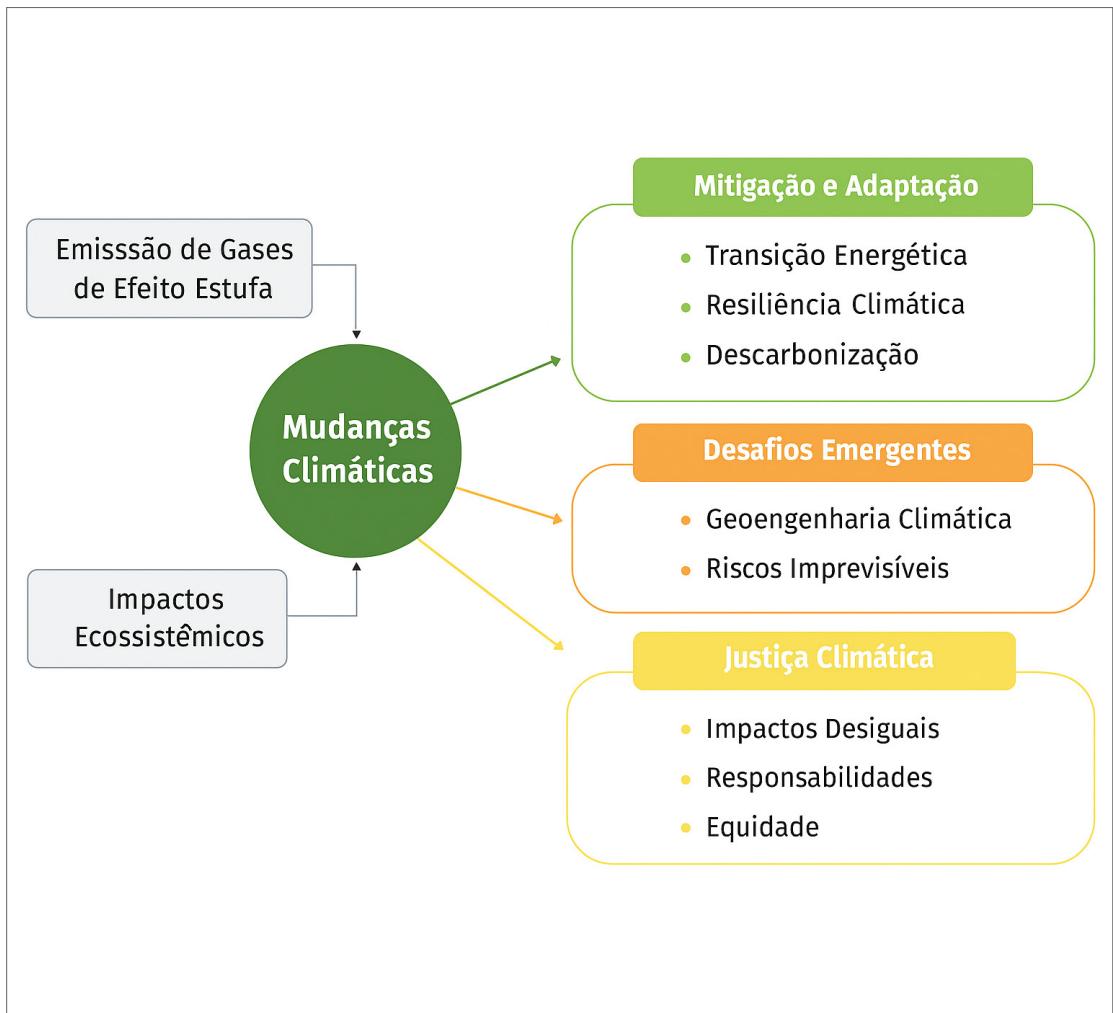


Figura 11. A figura ilustra a evolução do conceito de mudanças climáticas, evidenciando sua ampliação para além da tradicional esfera ecológica e físico-climática. No centro, a dimensão ecológica representa a base da discussão, com foco na emissão de gases de efeito estufa e nos impactos sobre os ecossistemas. Ao redor, três dimensões integradas ampliam essa abordagem: a mitigação e adaptação, dimensão que contempla ações como a transição energética, o fortalecimento da resiliência climática e a descarbonização, destacando a importância de respostas técnicas e estruturais; os desafios emergentes, que apontam para os riscos imprevistos associados a soluções tecnológicas, como a geoengenharia climática, e a imprevisibilidade dos cenários futuros; e a justiça climática, que trata da distribuição desigual dos impactos, da responsabilidade histórica entre nações e da necessidade de equidade nas políticas públicas e decisões globais. A figura, assim, reforça a urgência de abordagens interdisciplinares e integradas, que incorporem dimensões éticas, sociais e geopolíticas às estratégias de enfrentamento da crise climática.

CAPÍTULO 3

Histórico do estudo do clima: da filosofia natural à ciência interdisciplinar





O conhecimento sobre o clima terrestre evoluiu substancialmente ao longo dos séculos, passando de observações empíricas fragmentadas e interpretações filosóficas para uma ciência robusta, orientada por modelos matemáticos, tecnologias de sensoriamento remoto e dados paleoclimáticos. Essa trajetória foi moldada por avanços conceituais, disputas epistemológicas e transformações tecnológicas que conferiram à climatologia sua atual capacidade explicativa e preditiva. Este capítulo apresenta uma síntese dos principais marcos científicos que fundamentaram o entendimento moderno sobre o clima e suas mudanças.



a) Concepções filosóficas e registros precoces

As primeiras reflexões sobre o clima estão ancoradas nas cosmologias das civilizações antigas, que associavam os fenômenos atmosféricos a explicações mitológicas ou influências astrais. Na Grécia Antiga, Hipócrates (460-370 a.C.) destacou, em “Ares, águas e lugares”, o papel do ambiente climático sobre a saúde humana, antecipando uma perspectiva ambiental determinista. Durante a Idade Média, embora o pensamento aristotélico tenha limitado o avanço empírico, instituições monásticas e universidades europeias iniciaram o registro sistemático de dados meteorológicos, principalmente a partir do século XIII.

b) A Revolução Científica e o surgimento da instrumentação meteorológica

Com o advento da Revolução Científica nos séculos XVII e XVIII, a meteorologia começou a se consolidar como um campo empírico. A invenção de instrumentos como o barômetro (Torricelli, 1643), o termômetro (aperfeiçoados por Fahrenheit) e o higrômetro permitiu mensurações sistemáticas dos elementos climáticos. A criação de observatórios meteorológicos nas capitais europeias e em territórios coloniais promoveu a formação de grandes séries históricas de dados, que serviram de base para o desenvolvimento da climatologia estatística. Embora ainda distante da compreensão sistêmica do clima, essa etapa foi crucial para estabelecer a base empírica da ciência climática.

c) Século XIX: a construção do conceito de efeito estufa

O século XIX representou um ponto de inflexão teórica. Jean-Baptiste Joseph Fourier (1824) introduziu a ideia de que a atmosfera terrestre atua como uma camada isolante, retendo parte da radiação solar. John Tyndall (1861) confirmou

experimentalmente que gases como CO₂ e vapor d'água absorvem radiação infravermelha, estabelecendo os fundamentos físico-químicos do efeito estufa. Svante Arrhenius (1896) foi pioneiro ao quantificar a relação entre o aumento das concentrações de CO₂ e a elevação da temperatura global, estimando que a duplicação do CO₂ poderia elevar a temperatura média da Terra em até 6°C — um valor notavelmente próximo das projeções atuais.

d) Primeira metade do século XX: avanços e incertezas

Nas primeiras décadas do século XX, a climatologia seguiu predominantemente descritiva, com foco em classificações regionais e médias históricas. A contribuição de Wladimir Köppen, que elaborou um sistema de classificação climática ainda amplamente utilizado, foi central nesse período. Em contrapartida, a climatologia dinâmica emergiu com os trabalhos de Vilhelm Bjerknes, que aplicou princípios da física dos fluidos à previsão do tempo. A introdução do conceito de frente atmosférica pela Escola de Bergen trouxe uma abordagem mecanicista ao estudo das perturbações atmosféricas. Entretanto, oscilações naturais, como o período quente entre 1920 e 1940, seguidas por fases de resfriamento, contribuíram para o ceticismo inicial sobre o papel das emissões antrópicas.

e) Segunda metade do século XX: revolução tecnológica e sistematização global

A partir da década de 1950, a climatologia foi profundamente transformada pelo avanço tecnológico. O uso de computadores possibilitou a criação de modelos climáticos numéricos, integrando equações termodinâmicas para simular interações entre atmosfera, oceanos, superfície continental e criossfera. Em 1958, Charles David Keeling iniciou a medição contínua de CO₂ atmosférico no Observatório de Mauna Loa, dando origem à Curva de Keeling, que evidenciou o aumento persistente das emissões antrópicas.

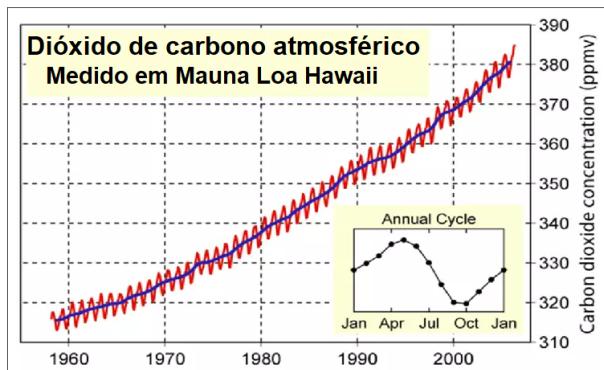


Figura 12. Mostra a Curva de Keeling, com base em uma simulação aproximada dos dados observados no Observatório de Mauna Loa desde 1958. A curva evidencia: o aumento persistente da concentração de CO₂ atmosférico, reflexo direto das emissões antrópicas; a variação sazonal anual (flutuações cíclicas) associada à dinâmica de absorção e liberação de carbono pelas florestas do Hemisfério Norte.

A consolidação da ciência climática como campo estratégico culminou, em 1988, na criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que passou a compilar, avaliar e sintetizar as evidências científicas sobre o aquecimento global, oferecendo subsídios técnicos para políticas internacionais. Seus relatórios tornaram-se referências centrais na definição de metas de mitigação e adaptação.

f) Século XXI: interdisciplinaridade, alerta global e governança climática

No século XXI, a climatologia passou a operar de forma decididamente transdisciplinar, incorporando saberes da química atmosférica, ecologia, geologia, oceanografia, economia e ciências sociais. Os modelos climáticos acoplados — como os desenvolvidos pelo Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) — passaram a projetar cenários climáticos com maior precisão, considerando diferentes trajetórias de emissão. Simultaneamente, avanços na paleoclimatologia, com base em testemunhos de gelo, sedimentos marinhos e anéis de crescimento arbóreo, revelaram que o atual ritmo de aquecimento não tem precedentes nos últimos 800 mil anos (Lüthi *et al.*, 2008; IPCC, 2021).

A climatologia contemporânea ultrapassou os limites da ciência física, transformando-se em arena de disputas geopolíticas, éticas e econômicas. A ascensão do conceito de justiça climática, a integração dos saberes indígenas e a crescente influência da climatologia política demonstram a maturidade e complexidade do campo. A trajetória histórica da ciência do clima reflete, assim, a profunda interconexão entre humanidade, conhecimento e biosfera.

O conhecimento acumulado ao longo dos séculos permite hoje compreender o sistema climático terrestre com rigor, sensibilidade histórica e responsabilidade política. Diante da atual crise climática de origem antropogênica, esse arcabouço científico é não apenas indispensável, como também urgente para subsidiar decisões globais em favor da sustentabilidade planetária.



Figura 13. Linha do tempo da evolução do estudo do clima, destacando os principais marcos históricos e o avanço do pensamento científico. A figura ilustra a transição do conhecimento climático desde as concepções filosóficas e registros empíricos da antiguidade até a ciência interdisciplinar do século XXI. Os marcos incluem: a Revolução Científica e o desenvolvimento da instrumentação meteorológica; os estudos do século XIX sobre o efeito estufa e o papel do CO₂; a introdução da modelagem numérica na segunda metade do século XX; e a consolidação de abordagens interdisciplinares contemporâneas, com destaque para os avanços tecnológicos e a integração entre ciências naturais e sociais. Observa-se ainda a incorporação de novos paradigmas analíticos e a valorização de saberes diversos, refletindo a complexidade dos desafios climáticos atuais.

The background image shows a vast expanse of clouds from an aerial perspective, likely from an airplane. The clouds are layered, with darker, more textured ones in the foreground and lighter, more wispy ones above. A portion of the airplane's wing and a solar panel array are visible in the upper right corner.

CAPÍTULO 4

Como o clima é estudado: meteorologia, climatologia e modelagem climática



O estudo do clima exige a integração de diversas disciplinas científicas que atuam em escalas temporais e espaciais distintas, mas complementares. A meteorologia dedica-se à análise do estado momentâneo da atmosfera, focalizando fenômenos de curta duração como temperatura, umidade, pressão e ventos. Seu objetivo é compreender e prever o “tempo” em escalas horárias e diárias. Essa ciência opera com base na coleta contínua de dados em tempo real, utilizando estações meteorológicas, satélites, balões atmosféricos, boias oceânicas e radares, sendo indispensável para o monitoramento de eventos extremos e da variabilidade atmosférica.



Já a climatologia ocupa-se do estudo dos padrões médios do clima e suas variações ao longo de décadas ou séculos. Trata-se de uma abordagem sistêmica que investiga a dinâmica entre os componentes do sistema climático — atmosfera, hidrosfera, litosfera, biosfera e criossfera. Um dos seus ramos mais importantes, a climatologia histórica, utiliza registros paleoclimáticos — como anéis de crescimento de árvores, sedimentos marinhos e testemunhos de gelo — para reconstruir as variações climáticas passadas. Esses estudos permitem distinguir entre flutuações naturais e alterações induzidas por atividades humanas, contribuindo para a compreensão da sensibilidade do sistema climático.

Com os avanços da tecnologia computacional, a modelagem climática tornou-se uma ferramenta central na previsão de cenários futuros. Os Modelos Climáticos Globais (GCMs) são sistemas matemáticos que simulam as interações entre os diferentes elementos do sistema terrestre por meio de equações que descrevem os fluxos de energia e matéria. Esses modelos, validados com dados históricos e observacionais, possibilitam testar diferentes trajetórias de emissão de gases de efeito estufa, alterações no uso da terra e retroalimentações climáticas. São amplamente empregados pelo IPCC em suas avaliações científicas e na formulação de recomendações políticas (IPCC, 2021).

A compreensão científica do clima decorre de um campo multidisciplinar de estudos, que combina observações empíricas, análises estatísticas, princípios físicos e simulações numéricas. As disciplinas que compõem a ciência climática

— especialmente a meteorologia, a climatologia e a modelagem climática — oferecem abordagens complementares para o diagnóstico, compreensão e previsão dos fenômenos atmosféricos, tanto em escalas temporais curtas quanto de longo prazo. Este capítulo explora o escopo, os métodos e os avanços dessas áreas, evidenciando seu papel crucial na construção do conhecimento sobre as mudanças climáticas globais.

Meteorologia: a dinâmica atmosférica em escala de curto prazo

A meteorologia é a ciência que estuda os processos físicos e dinâmicos da atmosfera, com foco na previsão do tempo e em eventos meteorológicos de curta duração. Sua origem remonta ao século XVII, mas sua consolidação como ciência quantitativa ocorreu no século XX, com o desenvolvimento da termodinâmica e da física dos fluidos aplicadas à atmosfera.

Observações e instrumentação

A meteorologia depende de redes de observação atmosférica terrestre e marítima, balões-sonda, radares meteorológicos, boias oceânicas e, desde os anos 1960, de satélites meteorológicos. As variáveis monitoradas incluem temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação solar e precipitação.

Previsão numérica do tempo

A previsão meteorológica moderna utiliza modelos de previsão numérica do tempo (PNT), baseados na resolução das equações de Navier-Stokes para fluidos atmosféricos. Esses modelos, como o GFS (Global Forecast System) e o ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), assimilam dados observacionais em tempo real e oferecem projeções com horizontes temporais de horas a alguns dias.

Apesar da alta precisão a curto prazo, a natureza caótica da atmosfera limita a previsibilidade além de 10 a 15 dias, razão pela qual a meteorologia e a climatologia operam em escalas distintas e complementares.

Climatologia: análise estatística do sistema climático

A climatologia, por sua vez, estuda o comportamento médio e os padrões estatísticos do clima em escalas de tempo mais amplas, geralmente superiores a 30 anos, conforme definido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Seu objetivo é compreender as regularidades, variações e tendências do sistema climático terrestre.

Climatologia descritiva e dinâmica

A climatologia descritiva é responsável pela caracterização de tipos climáticos, classificações regionais e análise de médias e extremos. Já a climatologia dinâmica busca explicar as causas físicas das variações climáticas, integrando fatores como circulação geral da atmosfera, correntes oceânicas, padrões de teleconexão (como o El Niño – Oscilação Sul) e o balanço radiativo terrestre.

Registros e séries temporais

A análise climatológica requer séries temporais longas, extraídas de dados observacionais (estações meteorológicas), reanálises e registros paleoclimáticos, como testemunhos de gelo, sedimentos, corais e anéis de crescimento de árvores. Esses registros permitem reconstituir o clima do passado e identificar anomalias em relação ao comportamento esperado.

Modelagem climática: simulando o sistema climático global

A modelagem climática é um dos instrumentos mais poderosos da ciência do clima, permitindo compreender os mecanismos do sistema climático e

projetar cenários futuros de alterações induzidas por mudanças na composição atmosférica ou nas condições da superfície terrestre.

Modelos Climáticos Globais (GCMs)

Os Modelos Climáticos Globais (GCMs) simulam interações entre os principais componentes do sistema climático — atmosfera, oceanos, criossfera, biosfera e litosfera — com base em leis físicas fundamentais. Esses modelos reproduzem processos como convecção, transporte de umidade, trocas radiativas e circulação geral atmosférica.

Os GCMs são desenvolvidos por centros de pesquisa e agências internacionais, e sua validação é feita por meio da comparação entre projeções e dados observacionais históricos. O projeto CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), coordenado pelo IPCC, promove a comparação entre modelos e estabelece os cenários de emissões (como os SSPs – *Shared Socioeconomic Pathways*) utilizados nos relatórios de avaliação.

Modelos regionais e de alta resolução

Para análises mais detalhadas, especialmente em regiões tropicais e costeiras, são utilizados Modelos Climáticos Regionais (RCMs), que, “aninhados” aos GCMs, permitem projeções em escalas espaciais mais finas, capturando características topográficas, usos do solo e dinâmicas atmosféricas locais.

Modelos como o ETA, RegCM e WRF-Chem são amplamente usados para investigar impactos regionais das mudanças climáticas sobre a agricultura, saúde pública, disponibilidade hídrica e biodiversidade.

Incertezas e limitações

Embora os modelos climáticos estejam entre os instrumentos mais avançados da ciência, há incertezas associadas a parametrizações físicas, cenários so-

cioeconômicos e variabilidade natural. No entanto, essas limitações não invalidam suas projeções gerais, especialmente em relação ao aquecimento global e seus principais efeitos. O aumento contínuo na capacidade computacional e no entendimento dos processos atmosféricos e oceânicos tem progressivamente reduzido essas incertezas.

Integração entre as disciplinas: uma abordagem sistêmica

A meteorologia, a climatologia e a modelagem climática não operam de forma isolada. Pelo contrário, a ciência do clima requer uma abordagem sistêmica e interdisciplinar. Dados meteorológicos alimentam modelos climáticos; resultados dos modelos são utilizados em análises climatológicas; e estas, por sua vez, retroalimentam os parâmetros e validações dos modelos.

Essa integração é especialmente relevante em aplicações práticas, como:

- Previsão de eventos extremos e alerta precoce;
- Planejamento de políticas de mitigação e adaptação climática;
- Gestão de riscos em setores como agricultura, energia, saúde e recursos hídricos.

A ciência do clima, ancorada na complementaridade entre meteorologia, climatologia e modelagem climática, representa um dos campos científicos mais dinâmicos, complexos e socialmente relevantes da atualidade. A compreensão aprofundada do sistema climático, e de suas interações com atividades humanas, é essencial não apenas para a produção de conhecimento acadêmico, como também para a formulação de políticas públicas eficazes diante da crise climática global. O contínuo aperfeiçoamento das metodologias, modelos e tecnologias de observação climática será determinante para enfrentar os desafios do Antropoceno com base em evidências científicas sólidas

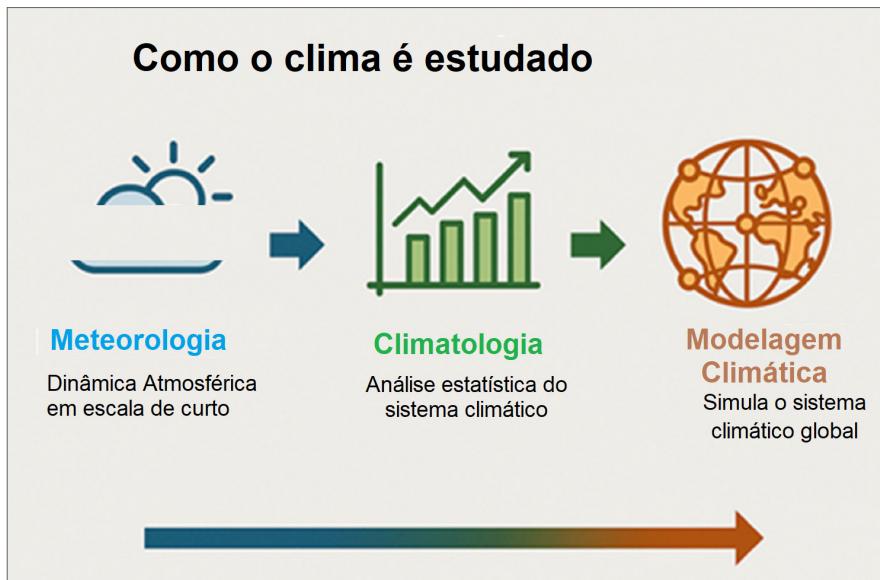


Figura 14. Mostra que o estudo do clima evolui da observação e previsão de curto prazo (meteorologia) para a análise estatística de padrões climáticos (climatologia), culminando na simulação computacional do sistema terrestre (modelagem climática). Cada etapa fornece subsídios críticos para a compreensão e o enfrentamento das mudanças climáticas globais.

Interfaces entre meteorologia, climatologia e modelagem climática

O estudo do clima constitui um dos empreendimentos científicos mais complexos e interdisciplinares da atualidade, exigindo a integração de diversas áreas do conhecimento que abordam o sistema climático em múltiplas escalas temporais e espaciais. A ciência climática moderna baseia-se na articulação entre observações sistemáticas da atmosfera, análises estatísticas de séries temporais, princípios da física atmosférica e oceânica e modelagem numérica de alta complexidade. Nesse contexto, a meteorologia, a climatologia e a modelagem climática formam um tripé fundamental para a construção de diagnósticos, projeções e estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas globais.

Meteorologia: diagnóstico e previsão atmosférica em tempo real

A meteorologia é a ciência dedicada à análise da dinâmica e da termodinâmica da atmosfera terrestre, com ênfase nos fenômenos de curto prazo, como frentes frias, tempestades, ciclones e ondas de calor. Sua evolução histórica, desde as observações empíricas no século XVII até a sua consolidação como ciência matemática e física no século XX, foi impulsionada pelo desenvolvimento de instrumentos de medição, da física dos fluidos e, mais recentemente, da computação de alto desempenho.

As previsões meteorológicas modernas baseiam-se em redes globais de observação e no uso de modelos numéricos de previsão do tempo (PNT), que resolvem as equações fundamentais da mecânica dos fluidos e da termodinâmica aplicadas à atmosfera. A qualidade dessas previsões depende diretamente da densidade e confiabilidade dos dados de entrada, bem como da sofisticação dos algoritmos de assimilação de dados, como os utilizados pelos modelos GFS (EUA), ECMWF (Europa) e GEM (Canadá).

Apesar dos avanços tecnológicos e metodológicos, a previsibilidade atmosférica é limitada pelo caráter caótico do sistema. Segundo Lorenz (1963), pequenas perturbações nas condições iniciais podem gerar grandes diferenças nos resultados, fenômeno conhecido como “efeito borboleta”. Isso impõe um horizonte prático de previsibilidade de até duas semanas, além do qual a incerteza cresce exponencialmente.

Climatologia: entendimento das regularidades e variações do clima

Enquanto a meteorologia dedica-se aos fenômenos de tempo, a climatologia investiga os padrões médios e as variabilidades do clima em escalas decadais, seculares ou até milenares. Essa distinção é fundamental para a compreensão dos processos que moldam o comportamento climático ao longo do tempo. A climatologia, conforme delimitado pela Organização Meteorológica Mundial

(OMM), baseia-se na análise de médias climatológicas de 30 anos ou mais, permitindo a identificação de tendências, anomalias e regimes de variabilidade.

A climatologia descritiva foca na classificação dos climas (como nos sistemas de Köppen-Geiger), na análise de médias térmicas e pluviométricas e na identificação de extremos climáticos. Já a climatologia dinâmica busca compreender os mecanismos físicos que regulam as oscilações e tendências do clima, incluindo a influência de fenômenos globais (ENSO, Oscilação Decadal do Pacífico, Oscilação do Atlântico Norte), *feedbacks* radiativos e interações entre os componentes da Terra.

Instrumentalmente, a climatologia depende de séries temporais longas e contínuas, originadas em estações meteorológicas convencionais, redes automáticas, dados de satélites, reanálises numéricas e registros paleoclimáticos, como testemunhos de gelo, isótopos estáveis, anéis de crescimento de árvores, espeleotemas e registros marinhos. A convergência entre essas fontes possibilita a reconstrução de climas passados e a comparação com padrões contemporâneos, permitindo inferências sobre a origem antrópica das mudanças climáticas observadas desde a Revolução Industrial.

”

[...] a meteorologia, a climatologia e a modelagem climática formam um tripé fundamental para a construção de diagnósticos, projeções e estratégias de mitigação e adaptação frente

Modelagem climática: simulação integrada do sistema climático

A modelagem climática ocupa papel central na ciência do clima contemporânea ao permitir a simulação de interações complexas entre atmosfera, oceanos, criosfera, biosfera e litosfera. Os Modelos Climáticos Globais (GCMs – *General Circulation Models*) são sistemas matemáticos baseados em leis físicas fundamentais, que discretizam o planeta em grades horizontais e verticais e simulam processos como transporte de energia, balanço radiativo, ciclo hidrológico e trocas biogeoquímicas.

O desenvolvimento e a validação dos GCMs são conduzidos por consórcios científicos internacionais, com destaque para o Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), que subsidia os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os cenários utilizados, como os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), incorporam diferentes trajetórias de desenvolvimento humano e emissões de gases de efeito estufa, permitindo projeções probabilísticas sobre aquecimento global, elevação do nível do mar, acidificação oceânica e frequência de eventos extremos.

Modelos Climáticos Regionais (RCMs) são utilizados para refinar as projeções dos GCMs em escalas menores, fundamentais para subsidiar políticas públicas locais. Esses modelos são sensíveis a características geográficas e ambientais específicas, como topografia, uso do solo, cobertura vegetal e condições costeiras. Modelos como o ETA, RegCM e WRF-Chem têm sido amplamente aplicados em estudos de impactos sobre a agricultura, recursos hídricos, urbanização, saúde pública e conservação da biodiversidade.

As incertezas nos modelos decorrem de três fontes principais: a representação matemática imperfeita de processos físicos (parametrizações), a variabilidade natural do sistema climático e a imprevisibilidade das ações humanas futuras. No entanto, o consenso científico aponta que tais incertezas não comprometem as tendências gerais projetadas, sobretudo o aquecimento global contínuo e suas

implicações. A melhoria dos modelos e o uso de inteligência artificial para refinamento de parametrizações constituem fronteiras emergentes nesse campo.

Integração disciplinar: a abordagem sistêmica da ciência do clima

A compreensão do sistema climático exige uma abordagem transdisciplinar e integrada. A meteorologia fornece os dados de alta frequência necessários à assimilação em modelos numéricos; os modelos climáticos, por sua vez, geram cenários que alimentam estudos climatológicos; e as análises climatológicas retroalimentam os modelos, aprimorando suas parametrizações e validações. Essa interdependência fortalece a robustez das projeções e amplia a capacidade preditiva da ciência climática.

A sinergia entre essas disciplinas é essencial para a gestão do risco climático e para a formulação de políticas públicas. Entre as aplicações práticas, destacam-se:

- Sistemas de alerta precoce e prevenção de desastres naturais;
- Planejamento de infraestrutura resiliente em áreas urbanas e rurais;
- Dimensionamento de estratégias de mitigação de emissões e adaptação a impactos;
- Análises de vulnerabilidade em setores críticos, como segurança alimentar, energia, saúde e biodiversidade.

A ciência do clima, ao articular previsões de curto prazo com projeções de longo prazo e com diagnósticos baseados em dados históricos, constitui um dos pilares do enfrentamento da crise climática no século XXI. Em um mundo marcado por rápidas transformações ambientais e pressões antropogênicas intensas, o avanço na observação, modelagem e interpretação climática será determinante para a sustentabilidade planetária e para a segurança das sociedades humanas no Antropoceno.

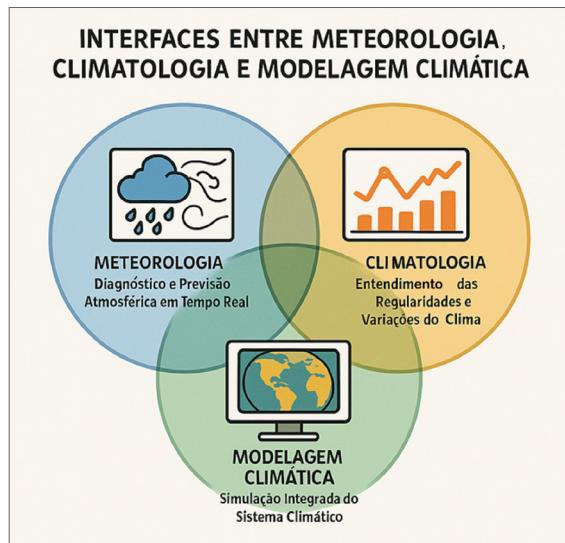
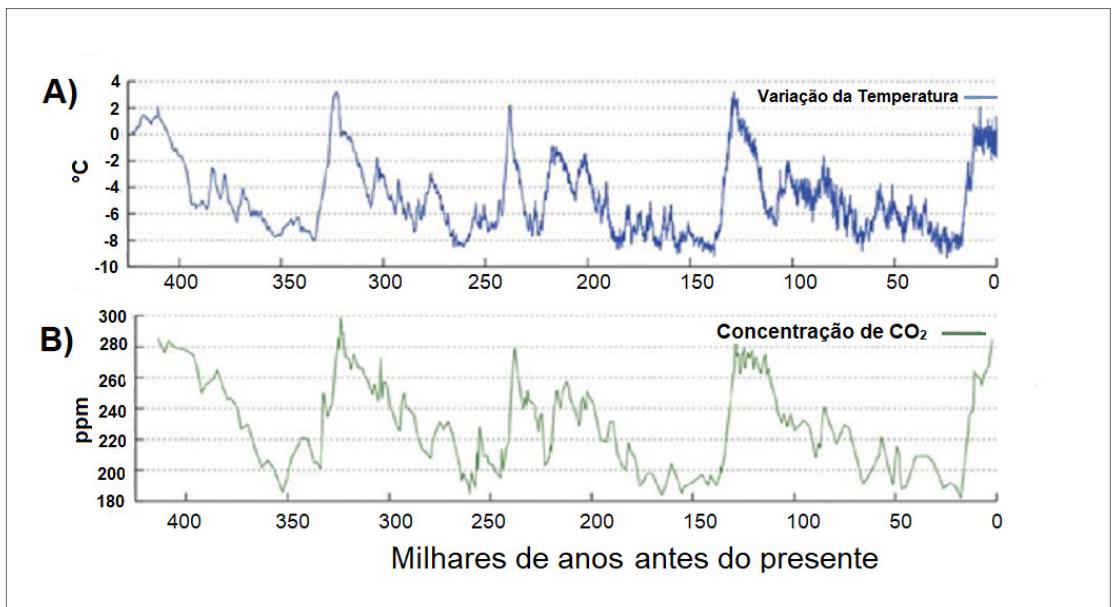


Figura 15. Demonstra que o estudo do clima é uma ciência integrada, que depende tanto da observação empírica (meteorologia), quanto da análise histórica (climatologia) e da simulação preditiva (modelagem). O diálogo entre essas áreas é essencial para compreender os desafios das mudanças climáticas e formular respostas adequadas para mitigação e adaptação.

A meteorologia, com seu foco em previsões em tempo real, encontra na climatologia fundamentos para interpretar padrões climáticos em larga escala. A modelagem climática complementa essas áreas por meio de simulações, ajudando a projetar cenários futuros e a testar hipóteses sobre a dinâmica atmosférica e climática.

Histórico das mudanças climáticas na Terra

A história climática da Terra é marcada por ciclos de aquecimento e resfriamento que ocorrem em escalas de tempo que variam de milhares a milhões de anos. Esses ciclos resultam da interação entre fatores astronômicos, geofísicos, químicos e biológicos. Entre os mecanismos naturais mais relevantes estão os Ciclos de Milankovitch, que envolvem variações nos parâmetros orbitais da Terra — excentricidade, obliquidade e precessão — e influenciam a distribuição da radiação solar, especialmente nas altas latitudes (Hays; Imbrie; Shackleton, 1976).



Fonte: Dados de core de gelo da estação Vostok, Antártica. Disponível em: www.ncdc.noaa.gov. Reconstrução da mudança da temperatura (A) e concentração de CO₂ atmosférico (B) nos últimos 420 ka. Acesso em: 03 set. 2025.

Figura 16. Ciclos de Milankovitch com as três principais variações orbitais da Terra representadas: excentricidade (variações na forma da órbita da Terra, com ciclos de ~100 mil e ~413 mil anos); obliquidade (variações na inclinação axial da Terra, com ciclo de ~41 mil anos); precessão (movimento de oscilação do eixo terrestre, com ciclo de ~23 mil anos). Essas variações modulam a quantidade e a distribuição da radiação solar que atinge o planeta, influenciando diretamente a ocorrência de períodos glaciais e interglaciais ao longo do Quaternário, conforme descrito por Hays, Imbrie e Shackleton (1976).

Tais ciclos explicam a alternância entre períodos glaciais, com avanço das calotas polares e temperaturas globais reduzidas, e períodos interglaciais, caracterizados por retração das massas de gelo e aquecimento. No entanto, as variações orbitais não explicam sozinhas a complexidade das mudanças climáticas. Outros fatores, como a composição atmosférica, a atividade vulcânica, as correntes oceânicas e o albedo planetário, também exercem influência determinante (Lenton *et al.*, 2008).

Esses elementos podem atuar por meio de mecanismos de retroalimenta-

ção. Por exemplo, o avanço das geleiras aumenta o albedo terrestre, refletindo mais radiação solar e intensificando o resfriamento; em contrapartida, a retração do gelo favorece a absorção de radiação e acentua o aquecimento (Budyko, 1969; Sellers, 1969).

Um caso extremo de retroalimentação positiva foi proposto pela hipótese da Terra Bola de Neve (*Snowball Earth*), segundo a qual o planeta teria passado por um congelamento quase completo durante o período Criogeniano, entre 790 milhões e 635 milhões de anos atrás. Evidências geológicas em latitudes tropicais sugerem a existência de geleiras em regiões hoje quentes (Hoffman; Schrag, 2002). A causa provável teria sido a queda abrupta na concentração de gases de efeito estufa, associada à redução da atividade vulcânica e ao aumento do sequestro de carbono por intemperismo continental. Com o aumento do albedo, o planeta entrou em um estado de equilíbrio térmico de baixa energia.

A saída desse estado ocorreu após longos períodos de emissão vulcânica de CO₂, não mais sequestrado devido à cobertura de gelo. Isso provocou um efeito estufa acelerado, elevando a temperatura global e levando ao derretimento progressivo das calotas (Pierrehumbert, 2005). Tal evento foi seguido por reorganizações ecológicas significativas e pelo surgimento de formas de vida multicelulares mais complexas no fim do Pré-Cambriano (Knoll, 2003).

Na atualidade, a possibilidade de um retorno a um estado de congelamento global é considerada remota, em função do aumento constante da irradiação solar, resultante da evolução estelar do Sol (Caldeira; Kasting, 1992), e da presença contínua de gases de efeito estufa na atmosfera, tanto naturais quanto antropogênicos. Mecanismos de regulação biogeoquímica e a própria atividade tectônica também contribuem para a estabilidade relativa do clima em escalas geológicas.

Portanto, a trajetória climática da Terra demonstra que o sistema climático é sensível a perturbações relativamente pequenas, capazes de desencadear

transformações drásticas. O entendimento desses processos naturais é fundamental para contextualizar a atual crise climática e projetar os possíveis desdobramentos das pressões antrópicas sobre a estabilidade climática planetária.

Precessão da Terra, glaciações e nível do mar

A figura 17 representa o movimento de precessão da Terra, que é a lenta oscilação do eixo de rotação terrestre, semelhante ao movimento de um pião. Atualmente, o eixo da Terra está inclinado cerca de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita ao redor do Sol. Essa inclinação e o movimento de precessão (que se completa a cada ~ 26 mil anos) fazem parte dos chamados Ciclos de Milankovitch, que influenciam diretamente o clima global.

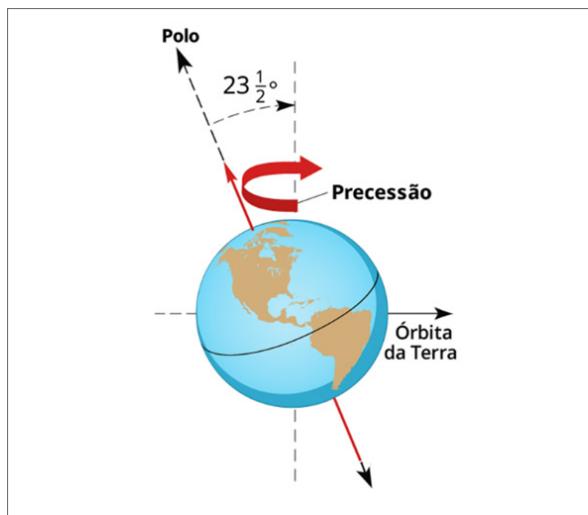


Figura 17. Movimento de precessão da Terra.

Ligaçāo entre precessão, glaciações e nível do mar

Durante os ciclos climáticos da Terra, a variação na quantidade e distribuição da radiação solar recebida (insolação) provoca mudanças graduais na tem-

peratura global. Quando a insolação nos verões de altas latitudes diminui, as geleiras crescem — fenômeno associado às eras glaciais. Por outro lado, quando a insolação aumenta, o gelo derrete, caracterizando períodos interglaciais.

- **Quando gela (glaciação):** grandes volumes de água ficam armazenados nas calotas polares e geleiras continentais. Isso provoca uma regressão marinha, com queda do nível do mar em até ~120 metros em relação aos valores atuais, expondo grandes áreas da plataforma continental.
- **Quando desgela (interglacial):** o derretimento das geleiras libera água de volta aos oceanos, causando transgressão marinha, ou seja, a elevação do nível do mar e a inundação de áreas costeiras.

Períodos de glaciação e o movimento do eixo

A precessão atua em conjunto com outros dois fatores:

1. **Excentricidade da órbita terrestre (~100 mil anos)** — Altera a forma da órbita da Terra (mais circular ou mais elíptica), influenciando a distância média ao Sol.
2. **Obliquidade do eixo (~41 mil anos)** — Varia a inclinação do eixo entre cerca de 22° e $24,5^\circ$, modificando a intensidade das estações do ano.

Esses parâmetros combinados modulam a intensidade dos verões e invernos, controlando o crescimento e derretimento das calotas polares. Foi essa alternância que gerou os principais ciclos glaciais e interglaciais dos últimos 2,6 milhões de anos (período Quaternário), como o último máximo glacial (~20 mil anos atrás) e o atual Holoceno (interglacial).

Efeitos nos movimentos de regressão e transgressão marinha devido às glaciações

Transgressões e regressões marinhas

A variação do nível relativo do mar ao longo do tempo geológico é um fenômeno complexo e multifatorial, controlado por processos climáticos, tectônicos e isostáticos, que se manifesta principalmente por dois eventos contrastantes: transgressões e regressões marinhas. Essas oscilações, denominadas variações eustáticas quando de origem global, têm desempenhado papel determinante na modelagem das zonas costeiras, influenciando diretamente a distribuição de habitats e a evolução das comunidades biológicas (Fairbanks, 1989; Lambeck *et al.*, 2014).

Transgressão marinha

A transgressão marinha ocorre quando o nível do mar se eleva em relação ao continente, resultando na inundação de áreas antes emersas. Na escala geológica, esse fenômeno está frequentemente associado a períodos interglaciais, quando o aumento das temperaturas globais provoca o derretimento de geleiras continentais e calotas polares, liberando grandes volumes de água para os oceanos (Fleming *et al.*, 1998; Rohling *et al.*, 2009).

No contexto dos últimos 35 mil anos, representado no gráfico eustático, a transgressão é evidenciada pela subida gradual da curva em direção ao nível atual (0 m) após cerca de 20 mil anos antes do presente (AP). Esse intervalo coincide com o fim da Última Máxima Glacial, período no qual as temperaturas globais começaram a aumentar e o degelo acelerado levou a uma elevação global de aproximadamente 120 metros no nível do mar (Clark *et al.*, 2009).

Os efeitos ecológicos de uma transgressão são profundos: forma-se uma maior extensão de lagunas, estuários e manguezais, que atuam como áreas de

alta produtividade biológica, servindo de berçário para inúmeras espécies de peixes, crustáceos e aves migratórias (Alongi, 2008). Esses ambientes, porém, também podem representar áreas de perda de habitats terrestres, especialmente em regiões costeiras baixas e densamente povoadas.

Ressagem marinha

A ressagem marinha, por sua vez, corresponde ao recuo do mar em direção ao oceano, expondo áreas anteriormente submersas. Esse evento está associado a períodos glaciais, quando grandes volumes de água ficam armazenados em geleiras, reduzindo o volume oceânico (Lambeck; Chappell, 2001). No registro gráfico, o ponto mais profundo — cerca de 120 metros abaixo do nível atual por volta de 20 mil anos AP — representa o auge da Última Máxima Glacial, quando extensas áreas de plataforma continental estavam expostas.

Durante ressagens significativas, há alterações marcantes na geomorfologia costeira: a linha de costa avança em direção ao talude continental, ecossistemas marinhos costeiros são retraídos e correntes oceânicas costeiras podem sofrer mudanças devido à nova configuração batimétrica. Além disso, a produtividade primária marinha em zonas costeiras pode ser reduzida, já que a retração das águas limita a área de ecossistemas bentônicos rasos ricos em nutrientes.

Implicações paleoambientais e evolutivas

A alternância entre transgressões e ressagens marinhas moldou, ao longo do Quaternário, não apenas a morfologia costeira, como também a distribuição biogeográfica das espécies. Essas oscilações controlaram a formação de barreiras geográficas, influenciaram rotas migratórias e determinaram a conectividade genética de populações costeiras e marinhas (Montaggioni, 2005).

Eventos rápidos de subida do mar, como os Meltwater Pulses, provocaram

mudanças bruscas em ecossistemas costeiros, levando à reorganização de comunidades e, em alguns casos, à extinção local de espécies incapazes de adaptar-se às novas condições (Deschamps *et al.*, 2012).



Figura 18. Curva eustática da variação do nível do mar nos últimos 35 mil anos (Milliman; Emery, 1968).

Forçantes climáticas: interações naturais, ações antrópicas e o balanço energético global

O clima da Terra é regulado por um conjunto complexo de interações entre fatores naturais e antrópicos que afetam diretamente o balanço energético do planeta. Esse balanço é determinado pela diferença entre a radiação solar incidente e a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre em direção ao espaço. Qualquer alteração nesse equilíbrio — seja por fontes naturais ou pelas atividades humanas — constitui uma força climática, capaz de modificar os padrões de temperatura, precipitação, circulação atmosférica e dinâmica oceânica.

Entre as principais forçantes naturais destacam-se os ciclos de Milankovitch, que consistem em variações nos parâmetros orbitais da Terra: a ex-

centricidade (cerca de 100 mil a 413 mil anos), a obliquidade (41 mil anos) e a precessão axial (23 mil anos). Essas oscilações afetam a distribuição e intensidade da radiação solar ao longo do ano, influenciando o desencadeamento de períodos glaciais e interglaciais durante o Quaternário (Berger, 1978). Alterações na excentricidade modulam a diferença entre periélio e afélio; mudanças na obliquidade intensificam o contraste entre estações nas altas latitudes; e a precessão determina o momento do ano em que ocorrem os extremos orbitais, influenciando a sazonalidade. Por serem resultantes da interação gravitacional da Terra com outros corpos celestes, essas oscilações são classificadas como forçantes externas ao sistema climático.

Outra forçante natural relevante é a atividade solar, caracterizada pela variação cíclica no número de manchas solares e na intensidade do campo magnético do Sol, com média de aproximadamente 11 anos. Esse ciclo influencia o fluxo de radiação solar e está associado a fenômenos como ejeções de massa coronal e variações na radiação ultravioleta, que podem afetar a formação de nuvens por meio da modulação dos raios cósmicos, além de influenciar a ionosfera terrestre (Lean, 2009). Apesar de o impacto direto da irradiância solar sobre o clima ser modesto em comparação com outros fatores, sua influência é reconhecida na modulação da variabilidade climática em escalas multidecadais.

No entanto, a forçante mais significativa nas últimas décadas é de origem antrópica: o aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), resultado da queima de combustíveis fósseis, desmatamento, agropecuária e processos industriais. Gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e compostos halogenados (CFCs e HFCs) absorvem e reemitem radiação infravermelha, intensificando o efeito estufa natural, que mantém a temperatura média do planeta em torno de 15°C. O aumento desses gases tem provocado elevação da temperatura global, derretimento de geleiras,

elevação do nível do mar e alterações nos regimes de precipitação e na frequência de eventos extremos (IPCC, 2014).

Para mensurar e comparar o impacto desses diferentes agentes, emprega-se o conceito de forçante radiativa, definido como a alteração líquida no balanço energético da Terra, expressa em watts por metro quadrado (W/m^2). Essa métrica avalia o potencial de aquecimento ou resfriamento de cada forçante sobre o sistema climático.

De acordo com o *Fifth Assessment Report* do IPCC (2013), os valores médios globais de forçante radiativa são bastante distintos: aproximadamente $0,1 \text{ W}/\text{m}^2$ para os Ciclos de Milankovitch, $0,05 \text{ W}/\text{m}^2$ para a variabilidade solar e cerca de $2,3 \text{ W}/\text{m}^2$ para o aumento das concentrações atmosféricas de GEE de origem antrópica. Esses dados evidenciam que, embora os fatores naturais sejam fundamentais para explicar variações climáticas em escalas geológicas, as atividades humanas são hoje o principal vetor de aquecimento global.

Além da magnitude das forçantes, é crucial considerar suas escalas temporais de atuação. Os ciclos orbitais operam ao longo de dezenas a centenas de milhares de anos, sendo responsáveis pela dinâmica glacial-interglacial do Quaternário (Berger, 1978). Já as alterações provocadas por emissões antrópicas são detectáveis em escalas de poucas décadas, com efeitos rápidos e disruptivos sobre os ecossistemas e sociedades humanas (IPCC, 2013; IPCC, 2014). Essa diferença de tempo de resposta torna particularmente alarmante a atual trajetória de aquecimento, pois os impactos estão ocorrendo em um ritmo significativamente mais acelerado do que os ajustes naturais do sistema climático seriam capazes de absorver.

Portanto, compreender a natureza, intensidade e tempo de ação das diferentes forçantes climáticas é essencial para avaliar os riscos associados às mudanças em curso e projetar cenários de mitigação e adaptação que estejam alinhados com os limites planetários e a estabilidade climática de longo prazo.

Quadro 6. Definição de termos para entender as mudanças climáticas.

CATEGORIA	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS/IMPLICAÇÕES
Variações naturais do clima	Processos físicos e astronômicos que regulam o clima da Terra em escalas geológicas ou interanuais.	São responsáveis por alterações climáticas históricas (por exemplo: períodos glaciais).
Ciclos de Milankovitch	Variações orbitais da Terra que alteram a distribuição da radiação solar.	Excentricidade (~100 mil anos), obliquidade (~41 mil), precessão (~21 mil). Associados a eras glaciais.
Atividade solar	Flutuações na intensidade da radiação solar, em ciclos de 11 anos.	Por exemplo: Mínimo de Maunder (1645-1715), ligado à Pequena Idade do Gelo na Europa.
Vulcanismo	Erupções que lançam aerossóis na estratosfera, bloqueando radiação solar.	A erupção do Monte Pinatubo (1991) causou resfriamento global temporário (~0,5°C).
Variabilidade oceânica-atmosférica	Padrões naturais de interação entre oceanos e atmosfera.	ENSO, PDO, NAO — Influenciam temperatura e precipitação em diferentes regiões.
Mudanças climáticas antrópicas	Alterações no clima atribuídas a ações humanas, especialmente desde a Revolução Industrial.	Intensificam o efeito estufa e provocam aquecimento global.
Emissão de GEE	Liberação de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O por combustíveis fósseis, agropecuária, desmatamento e indústria.	CO ₂ passou de ~280 ppm (pré-industrial) para >420 ppm (2023) (NOAA).
Uso do solo	Conversão de ecossistemas naturais em áreas urbanas ou agrícolas, com perda de sequestro de carbono.	Redução do albedo, erosão, fragmentação de habitats, aquecimento regional.
Poluição e aerossóis	Aerossóis industriais podem refletir radiação solar (resfriamento), mas também afetam nuvens e aumentam o ozônio troposférico (aquecimento).	Efeitos complexos e regionais; curta duração na atmosfera.
Evidências científicas da causa humana	Múltiplas linhas de evidência apontam, com mais de 95% de certeza, para a origem antrópica do aquecimento global (IPCC, 2021).	Modelos climáticos, assinaturas isotópicas, padrões geográficos e séries históricas confirmam a tendência.
Modelos climáticos	Simulações só com causas naturais não reproduzem o aquecimento atual.	Só com forças humanas o modelo ajusta-se aos dados observados.
Assinaturas isotópicas do carbono	Análise química do CO ₂ revela origem fóssil (carbono "leve").	Indicam a queima de combustíveis fósseis como principal fonte.
Distribuição geográfica	Aquecimento maior em latitudes altas do Hemisfério Norte.	Coerente com projeções baseadas em atividades humanas.
Implicações científicas e políticas	A distinção entre causas naturais e antrópicas fundamenta a ação climática baseada em ciência.	Essencial para políticas públicas, acordos internacionais e justiça climática.
Contra o negacionismo	O discurso negacionista omite evidências científicas e compromete respostas globais à crise.	Reforça a urgência de basear decisões em dados e consenso científico.
Interações entre causas	As causas naturais e antrópicas podem se somar ou amplificar impactos climáticos.	Exige análise integrada e gestão sistêmica de riscos.

A figura 19 apresenta a concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO_2) medida na estação de Mauna Loa, Havaí, desde 1960 até projeções futuras para 2060, com o eixo vertical indicando a concentração em partes por milhão (ppm) e o eixo horizontal, os anos. A curva preta serrilhada representa as observações históricas de CO_2 realizadas pelo Scripps Institution of Oceanography, evidenciando um aumento contínuo desde 1960, com variações sazonais regulares. O segmento em vermelho mostra a previsão para 2024 feita pelo Met Office, do Reino Unido, sugerindo a continuidade dessa tendência de crescimento. Já a curva roxa ilustra um cenário hipotético de estabilização compatível com a meta de 1,5°C de aquecimento global, conforme o cenário C1-IMP-SP do IPCC (2022), no qual as concentrações de CO_2 estabilizam-se e começam a declinar moderadamente nas décadas seguintes, mantendo as oscilações sazonais. O destaque circular no gráfico amplia a comparação entre a trajetória observada e projetada (preto/vermelho) e o cenário compatível com a meta climática (roxo), ilustrando de maneira clara o descompasso entre a realidade atual e as reduções de emissões necessárias para conter o aquecimento global.

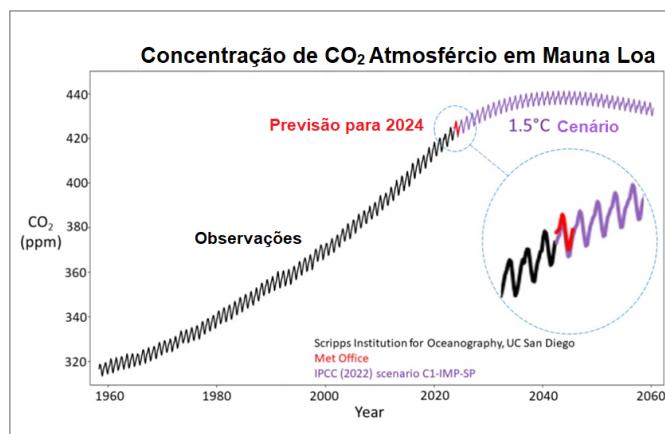


Figura 19. Apresenta a concentração atmosférica de CO_2 observada em Mauna Loa (Havaí) de 1960 até o presente, com projeção para 2024 (em vermelho) e comparação com o cenário compatível com a meta de 1,5°C (em roxo), conforme o IPCC (2022). As observações indicam uma tendência contínua de aumento, contrastando com a estabilização e declínio projetados em cenários climáticos ambiciosos. Dados: Scripps Institution of Oceanography, Met Office e IPCC C1-IMP-SP.

A figura 20 ilustra os principais fatores que atuam como forçantes climáticas, ou seja, elementos naturais e antrópicos que influenciam o balanço energético do planeta e, consequentemente, o clima global. No centro da imagem, observa-se a Terra recebendo radiação solar incidente, principal fonte de energia do sistema climático, parte da qual é refletida ou reemitida para o espaço como radiação infravermelha, sendo esse processo modulável por diversas forçantes. À esquerda, destacam-se as forçantes naturais: a atividade solar, cujas variações cíclicas afetam o fluxo de radiação que chega à Terra; a radiação solar, que varia ao longo do tempo em função de manchas e ciclos solares; e as erupções vulcânicas, capazes de lançar aerossóis na atmosfera e refletir a radiação solar, provocando resfriamento temporário. À direita, são representadas as principais forçantes antrópicas: os gases de efeito estufa, que absorvem a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre e intensificam o aquecimento global; o desmatamento, que reduz a capacidade de absorção de CO₂ e altera o albedo da superfície; e as mudanças na composição atmosférica causadas por atividades industriais, que emitem diretamente GEE e poluentes. A interação entre essas variáveis naturais e humanas determina o equilíbrio energético do planeta e influencia os padrões climáticos em escala regional e global.

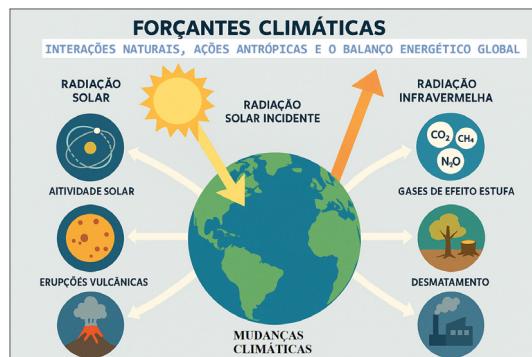


Figura 20. Representação esquemática das principais forçantes climáticas, incluindo fatores naturais (atividade solar, radiação solar e erupções vulcânicas) e antrópicos (emissão de gases de efeito estufa, desmatamento e poluição industrial). Esses elementos interferem no balanço de radiação solar e infravermelha da Terra, alterando o sistema climático global.

O efeito estufa natural e a energia da Terra

A temperatura média da Terra é regulada por um delicado equilíbrio entre a radiação solar que entra no sistema climático e a radiação térmica (infravermelha) que é emitida de volta para o espaço. Esse balanço energético é fundamental para a manutenção de condições habitáveis no planeta, e é controlado por processos físicos descritos por leis da termodinâmica e da radiação. Sem a presença de GEE, a temperatura média da superfície terrestre seria de aproximadamente -18°C . No entanto, graças à absorção e reemissão de radiação por gases e vapor de água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), essa média eleva-se para cerca de $+15^{\circ}\text{C}$ — um fenômeno conhecido como efeito estufa natural.

Esses gases possuem estruturas moleculares capazes de vibrar em múltiplos modos ao interagirem com a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Tal propriedade permite que parte da radiação seja reemitida em direção à superfície, promovendo o aquecimento do sistema terrestre-atmosférico.

Princípios físicos do balanço energético

A energia que chega do Sol à Terra (energia incidente) é parcialmente refletida pela superfície, pelas nuvens e pelos aerossóis atmosféricos — um fenômeno representado pelo albedo planetário médio (cerca de 30%). O restante é absorvido, aquecendo a superfície e a atmosfera. Em seguida, a Terra reemite energia na forma de radiação infravermelha de ondas longas, conforme expressa pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T^4$$

Onde:

- E é a radiância total (energia emitida por unidade de área por unidade de tempo);
- σ (sigma) é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4\text{T}$);
- T é a temperatura absoluta da superfície (em kelvin).

Estrutura molecular e absorção seletiva

Os GEE são eficazes absorvedores de radiação infravermelha, porque possuem estruturas moleculares assimétricas e poliatômicas, que vibram e giram em modos específicos. Isso permite que eles absorvam e reemitem energia em bandas características, particularmente entre 4 e 100 micrômetros de comprimento de onda, uma região na qual o espectro de emissão térmica da Terra é mais intenso.

Essa reemissão de radiação em todas as direções — incluindo de volta à superfície — aquece a troposfera e mantém o planeta significativamente mais quente do que seria apenas sob a ação da radiação solar direta (Ramanathan; Coakley, 1978).

Comparações com Vênus e Marte: extremos do efeito estufa

A importância do efeito estufa pode ser melhor compreendida em uma comparação a outros corpos planetários:

- Vênus, cuja atmosfera é composta por cerca de 96,5% de CO₂, apresenta um efeito estufa extremo. Mesmo estando mais distante do Sol do que Mercúrio, Vênus tem temperatura média na superfície de aproximadamente 464°C, devido à alta concentração de GEE e à espessa camada de nuvens de ácido sulfúrico, que aprisionam a radiação infravermelha (Taylor *et al.*, 2018).
- Marte, por outro lado, também possui CO₂ em sua atmosfera (cerca de 95%), mas sua baixa densidade atmosférica impede um efeito estufa eficiente. Sua temperatura média é de -63°C, mostrando que nem só a composição, mas também a pressão atmosférica e a massa total de gases influenciam o balanço radiativo (Haberle *et al.*, 1996).

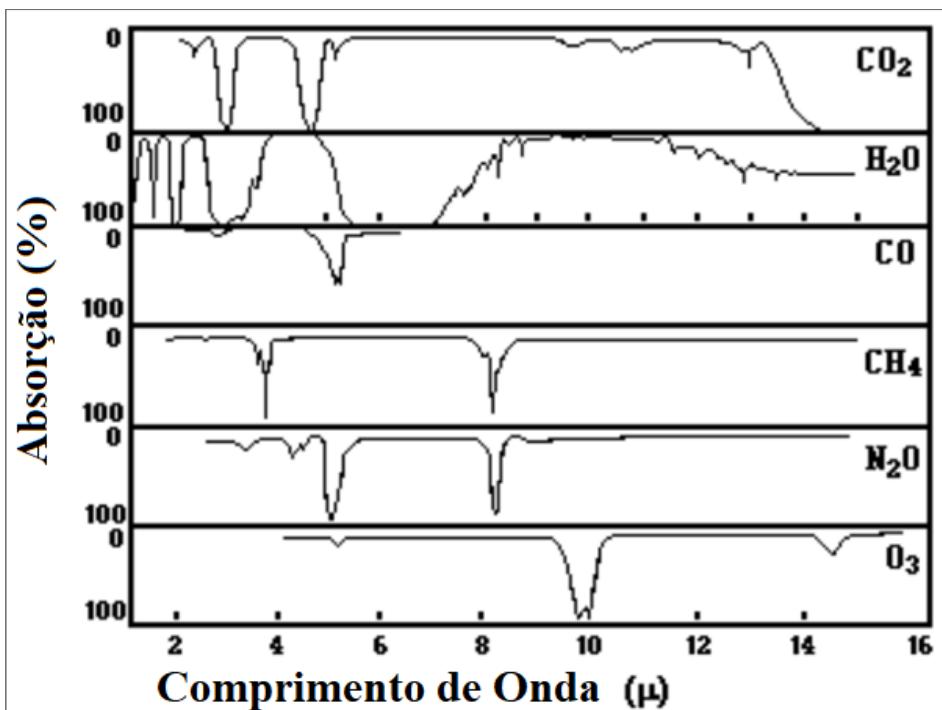


Figura 21. Ilustra as bandas de absorção na faixa do infravermelho para os principais gases de efeito estufa (GEE) — como vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3). Ajuda a compreender o papel de cada gás na retenção de calor emitido pela superfície terrestre, contribuindo para o efeito estufa natural.

Importância climática e vulnerabilidade do sistema

O efeito estufa natural é, portanto, um componente essencial da estabilidade climática do planeta, garantindo a existência de água líquida e, por conseguinte, de vida. Entretanto, o aumento antrópico dos GEE desde a Revolução Industrial — especialmente o CO_2 proveniente da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento — tem causado um desequilíbrio no sistema radiativo da Terra, induzindo o aquecimento global. A radiação adicional absorvida pelo sistema climático está sendo acumulada majoritariamente nos oceanos, pro-

movendo efeitos em cascata que afetam o nível do mar, a circulação oceânica e os ecossistemas.

É esse acréscimo líquido de energia — quantificado por modelos climáticos como forçante radiativa positiva — que está na base do atual processo de mudança climática global.

O papel dos gases de efeito estufa (GEE) e o aquecimento global

O aquecimento global é resultado direto do desequilíbrio energético imposto ao sistema climático terrestre, causado pelo aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE). Esses gases, ao absorverem e reemitirem radiação infravermelha, intensificam o efeito estufa natural, promovendo o acúmulo de energia no sistema terrestre-atmosférico. Embora esse fenômeno seja fundamental para manter a temperatura da Terra em níveis compatíveis com a vida, o aumento antrópico das emissões de GEE desde a Revolução Industrial tem provocado uma intensificação artificial desse processo, com consequências climáticas, ecológicas e socioeconômicas severas e cada vez mais evidentes (IPCC, 2021).

O efeito estufa: natural e intensificado

O efeito estufa natural decorre da capacidade de certos gases atmosféricos de absorver e reemitir a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Essa propriedade, relacionada à estrutura molecular dos gases, permite que a energia solar que chega à Terra em forma de radiação de onda curta seja parcialmente retida após ser transformada em calor. O vapor d'água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e gases industriais, como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), atuam como os principais reguladores desse mecanismo. Sem esses gases, a Terra seria inóspita para a maioria das formas de vida.

Contudo, as atividades humanas vêm alterando esse equilíbrio ao liberar grandes quantidades de GEE, em taxas superiores à capacidade de absorção dos sumidouros naturais (florestas, oceanos e solos). Esse processo intensifica o efeito estufa natural, levando a um desequilíbrio energético denominado forçamento radiativo positivo, cujo valor acumulado desde 1750 é estimado em +2,72 W/m², sendo o CO₂ o maior contribuinte isolado (IPCC, 2021).

Dióxido de carbono (CO₂): o principal motor do aquecimento antrópico

O dióxido de carbono é o GEE de maior impacto climático em razão de sua abundância, persistência atmosférica (variando de 100 a mais de 1.000 anos) e influência direta no balanço radiativo terrestre. Embora seu potencial de aquecimento global (PAG) seja inferior ao de outros gases, sua contribuição ao forçamento radiativo é desproporcionalmente alta, representando cerca de 75% das emissões antrópicas totais (Friedlingstein *et al.*, 2022).

As fontes de emissão de CO₂ incluem a queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural), a produção de cimento, a siderurgia e o desmatamento, que reduz a capacidade de sequestro de carbono da vegetação. De acordo com os registros da Curva de Keeling (Keeling *et al.*, 1976), a concentração atmosférica de CO₂ passou de aproximadamente 280 ppm no período pré-industrial para mais de 421 ppm em 2023 (NOAA, 2023).

Metano (CH₄): alta potência em curto prazo

O metano é um gás de efeito estufa com um Potencial de Aquecimento Global (PAG) 84 vezes maior que o do CO₂ em um horizonte de 20 anos, embora sua permanência atmosférica seja mais curta, cerca de 12 anos. Suas principais fontes antrópicas incluem:

- Fermentação entérica de ruminantes (especialmente bovinos);
- Cultivo de arroz irrigado, com liberação de CH₄ em condições anaeróbicas;

- Aterros sanitários e decomposição de resíduos orgânicos;
- Vazamento em sistemas de extração e transporte de petróleo e gás natural.

Em 2023, a concentração de CH_4 ultrapassou 1.900 ppb — mais que o dobro dos níveis pré-industriais —, sinalizando um crescimento acelerado, especialmente em regiões tropicais e boreais (IPCC, 2024).

Óxido nitroso (N_2O): forçamento combinado e destruição da camada de ozônio

O óxido nitroso tem um PAG 298 vezes superior ao do CO_2 em um horizonte de 100 anos, e uma permanência atmosférica de cerca de 120 anos. Além de sua contribuição ao aquecimento global, o N_2O participa de reações que degradam a camada de ozônio estratosférico, agravando os efeitos da radiação ultravioleta sobre organismos e ecossistemas.

As fontes de emissão incluem:

- Aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados;
- Decomposição de matéria orgânica em solos úmidos e corpos d'água;
- Queima de biomassa e resíduos sólidos urbanos;
- Atividades industriais ligadas à produção de ácido nítrico e nylon.

Gases industriais: elevado potencial e persistência milenar

Gases industriais, como os clorofluorcarbonetos (CFCs), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), embora presentes em concentrações menores, possuem elevado PAG — frequentemente milhares de vezes superior ao do CO_2 . Esses compostos são utilizados como refrigerantes, propelentes, solventes e agentes de expansão

de espumas industriais. Sua persistência atmosférica pode ultrapassar mil anos, o que os torna particularmente preocupantes do ponto de vista do aquecimento cumulativo.

Forçamento radiativo e consequências sistêmicas

O conceito de forçamento radiativo quantifica a alteração no balanço energético da Terra causada por mudanças na composição atmosférica, expresso em watts por metro quadrado (W/m^2). O aumento do FR leva à retenção adicional de calor, promovendo uma série de consequências sistêmicas e interdependentes:

- Elevação da temperatura média global;
- Degelo acelerado de calotas polares e geleiras continentais;
- Expansão térmica e elevação do nível do mar;
- Acidificação dos oceanos;
- Perturbações na circulação oceânica e atmosférica;
- Aumento na frequência e intensidade de eventos extremos (secas, tempestades, ondas de calor).

Observações recentes indicam que o período de 2011 a 2020 foi a década mais quente já registrada, e que o ano de 2023 superou todos os recordes anteriores, refletindo a intensificação do aquecimento global (IPCC, 2023).

Degelo acelerado de calotas polares e geleiras continentais: extensão mínima do gelo marinho no Ártico (1980-2019)

A figura 22 ilustra de forma clara e preocupante a redução progressiva da extensão mínima do gelo marinho no Oceano Ártico, com dados do mês de setembro — período do ano em que essa cobertura de gelo atinge seu menor tamanho, devido ao derretimento acumulado durante o verão boreal.

- A sequência de mapas circulares cobre quatro décadas (1980 a 2019), com o valor de área congelada (em milhões de km²) indicado em cada ano.
- A linha pontilhada branca representa a média histórica da extensão mínima do gelo marinho no período de referência de 1981 a 2010.
- A mancha azul esverdeada sólida indica a extensão real observada naquele ano específico.
- Pode-se observar uma redução acentuada e contínua da área congelada:
 - 1980: 7,7 milhões de km²
 - 1990: 6,1 milhões de km²
 - 2010: 4,9 milhões de km²
 - 2019: 4,2 milhões de km²

Essa tendência de encolhimento da calota de gelo do Ártico é um indicador sensível e visível das mudanças climáticas globais, com os seguintes aspectos críticos:

- Amplificação Ártica: o Ártico aquece mais rapidamente que outras regiões do planeta devido a mecanismos de retroalimentação, como a substituição de gelo branco por água escura, que absorve mais calor.
- Impactos globais: o degelo afeta correntes oceânicas, regimes pluviométricos, estabilidade climática do Hemisfério Norte, comunidades indígenas e animais, como ursos-polares e focas.
- Abertura de rotas marítimas e geopolítica: o recuo do gelo abre caminhos antes intransitáveis, com implicações econômicas, logísticas e militares.

Tendência: a perda de gelo de cerca de 3,5 milhões de km² entre 1980 e 2019 representa uma redução de mais de 45% da área mínima de cobertura do gelo marinho em menos de 40 anos, evidenciando uma aceleração notável no degelo das calotas polares.

Os dados são do National Snow and Ice Data Center (NSIDC), uma das instituições científicas mais reconhecidas no monitoramento da criosfera global; a visualização foi produzida pela BBC.

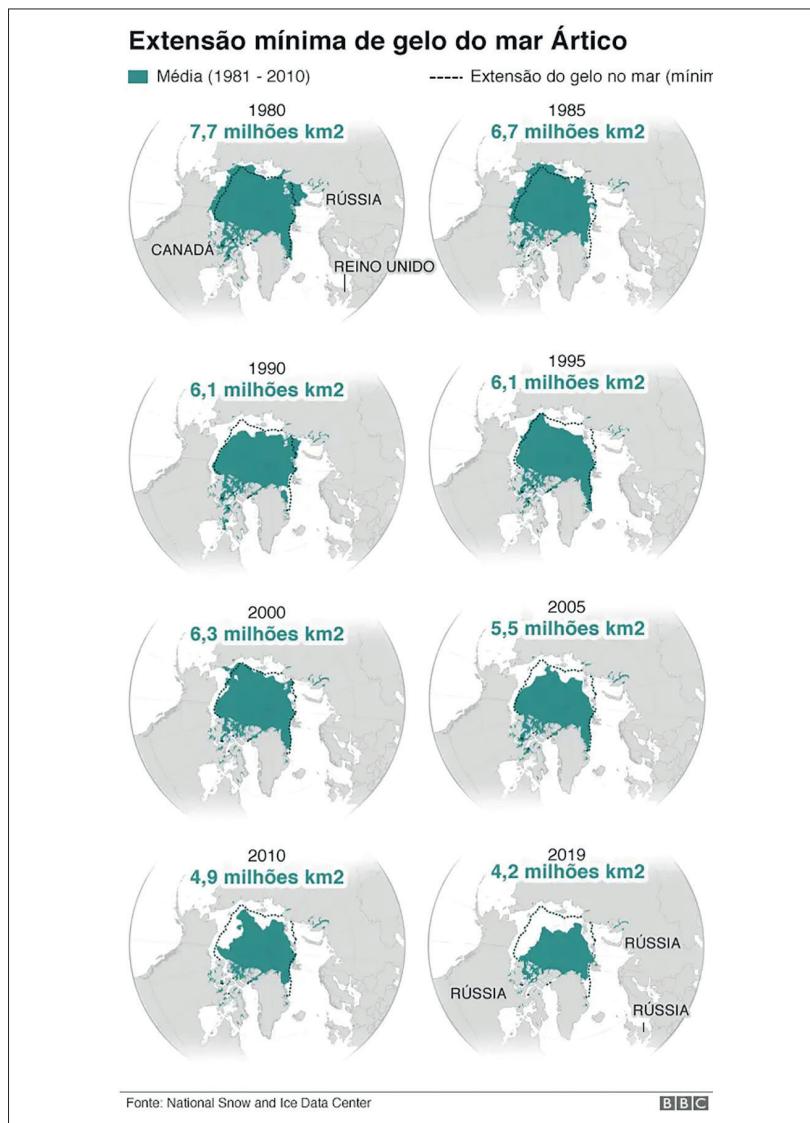


Figura 22. Redução progressiva da extensão mínima do gelo marinho no Oceano Ártico.

Fontes setoriais de emissão e pressões antrópicas

A origem antrópica das emissões de GEE está diretamente relacionada a transformações estruturais nos sistemas de produção e consumo. Os principais setores emissores incluem:

- Energia: queima de combustíveis fósseis em usinas termoelétricas e transporte.
- Agropecuária: emissão de CH₄ e N₂O por ruminantes e uso de fertilizantes.
- Mudanças no uso da terra: desmatamento e degradação de florestas tropicais.
- Indústria: processos com alta intensidade energética e uso de gases fluorados.
- Gestão de resíduos: emissões de CH₄ em aterros e estações de tratamento.

De acordo com o IPCC (2021), as emissões líquidas globais atingiram 59 GtCO₂ em 2019, com tendência de crescimento associada à expansão de economias emergentes e à persistência de matrizes energéticas baseadas em carbono.

A figura 23 apresenta três cenários projetados de emissões de gases de efeito estufa (em gigatoneladas de CO₂ equivalente) e seus respectivos impactos esperados no aquecimento global até o ano de 2100, segundo o Climate Action Tracker, destacando como diferentes níveis de ação climática influenciam as trajetórias de emissão e os aumentos médios de temperatura. A faixa vermelha representa o cenário mais pessimista, no qual os países não adotam novas medidas além das já existentes, resultando em um aumento da temperatura média global entre 4,1°C e 4,8°C até 2100, com emissões em contínua elevação, ultrapassando 150 Gt de CO₂ equivalente. A faixa verde corresponde ao cenário intermediário, que considera a manutenção das políticas climáticas atualmente em vigor, levando a um aquecimento entre 2,8°C e 3,2°C, com

emissões ainda em trajetória ascendente, embora mais contida. Já a faixa azul representa o cenário mais otimista, no qual os países cumprem integralmente suas promessas climáticas atuais, limitando o aquecimento a valores entre 2,5°C e 2,8°C; apesar da redução progressiva nas emissões, esse nível ainda ultrapassa a meta de 1,5°C estabelecida no Acordo de Paris. Assim, a figura evidencia que, mesmo no melhor dos cenários apresentados, os compromissos atuais são insuficientes para evitar os efeitos mais severos das mudanças climáticas, ressaltando a necessidade de ações mais ambiciosas, imediatas e coordenadas globalmente.

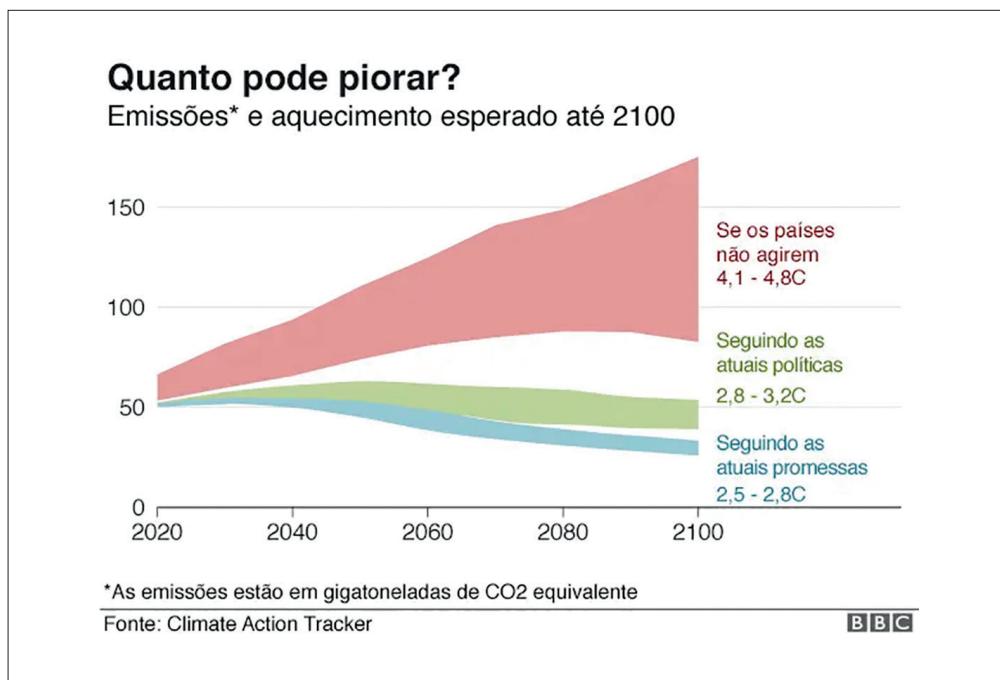


Figura 23. Projeções de emissões globais de gases de efeito estufa (em gigatoneladas de CO₂ equivalente) e aquecimento esperado até 2100, segundo três cenários: ausência de ação climática adicional (vermelho), manutenção das políticas atuais (verde) e cumprimento das promessas já feitas pelos países (azul). Mesmo com a implementação das promessas atuais, o aquecimento global poderá ultrapassar 2,5°C, valor acima da meta estabelecida pelo Acordo de Paris.

Retroalimentações climáticas e persistência atmosférica

Mecanismos de retroalimentação positiva representam um risco adicional ao sistema climático. Exemplos incluem:

- Redução do albedo pela perda de gelo marinho, intensificando a absorção de radiação solar;
- Liberação de metano do permafrost em degelo;
- Aumento da evaporação e concentração de vapor d'água, que reforça o efeito estufa.

A longa permanência do CO₂ na atmosfera implica que, mesmo com a interrupção imediata das emissões, os efeitos do aquecimento global persistirão por séculos, caracterizando o chamado “legado climático” (Solomon *et al.*, 2009).

A figura 24 representa o efeito estufa natural e seu papel fundamental no equilíbrio energético da Terra. A radiação solar incidente (em amarelo) atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre, sendo parcialmente absorvida e posteriormente reemitida na forma de radiação infravermelha (em laranja). Essa radiação térmica ascende em direção ao espaço, mas parte dela é retida pelos gases de efeito estufa (GEE) presentes naturalmente na atmosfera, como vapor d'água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e ozônio (O₃).

Esses gases formam uma camada que atua como um “cobertor térmico”, permitindo a retenção de parte do calor, o que mantém a temperatura média da Terra em torno de +15°C (figura 24). Esse processo é essencial para sustentar a vida no planeta, pois, sem ele, a temperatura média global seria muito inferior. A imagem destaca visualmente a trajetória da radiação solar e da radiação infravermelha reemitida, bem como os principais GEE envolvidos no fenômeno, enfatizando que o efeito estufa é um mecanismo natural e vital, que apenas se torna problemático quando intensificado por ações humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento.

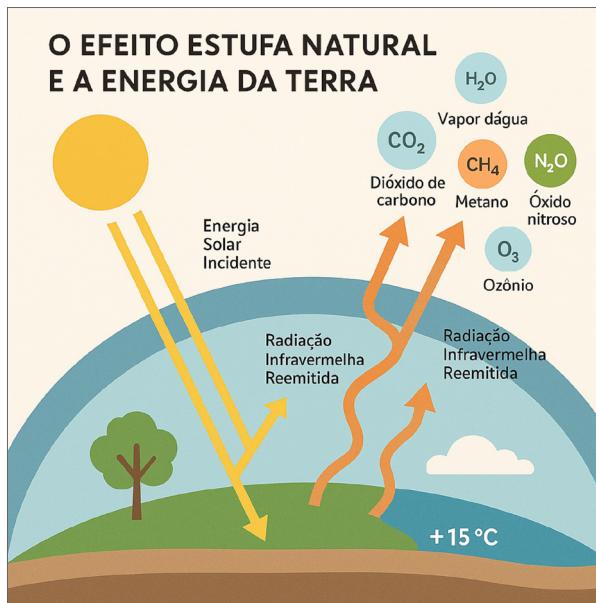


Figura 24. Representação do efeito estufa natural, no qual a radiação solar incidente é absorvida pela superfície terrestre e reemitida como radiação infravermelha. Parte dessa energia térmica é retida na atmosfera por gases de efeito estufa naturais, como vapor d'água, CO_2 , CH_4 , N_2O e O_3 , mantendo a temperatura média global em torno de +15°C. Esse processo é essencial para a manutenção das condições que permitem a vida na Terra.

Ciência, responsabilidade e ação climática

O acúmulo de GEE na atmosfera, impulsionado por atividades humanas, é o principal fator responsável pelo aquecimento global observado nas últimas décadas. A ciência climática, apoiada por múltiplas linhas de evidência — incluindo observações instrumentais, análises isotópicas, paleoclimatologia e modelagem computacional —, confirma a origem antrópica desse processo.

A mitigação das emissões exige transformações profundas nos sistemas energético, agrícola, industrial e urbano, além da construção de políticas climáticas equitativas e embasadas no conhecimento científico. Ignorar a contribuição dos GEE para o aquecimento global equivale a negligenciar um dos maiores desafios ambientais, econômicos e civilizatórios do século XXI.

Atividades humanas e suas consequências para mudanças climáticas

A compreensão dos fatores que impulsionam as mudanças climáticas globais é fundamental para a formulação de estratégias eficazes de mitigação e adaptação. Nas últimas décadas, a ciência tem demonstrado de forma inequívoca que a intensificação do efeito estufa é majoritariamente resultado das atividades humanas, que têm alterado profundamente a composição química da atmosfera e os ciclos biogeoquímicos da Terra. Na figura 25, entre os principais vetores antrópicos das mudanças climáticas, destacam-se as emissões de gases de efeito estufa (GEE), assim como os setores econômicos responsáveis por essas emissões e os mecanismos pelos quais tais atividades afetam o equilíbrio climático planetário.

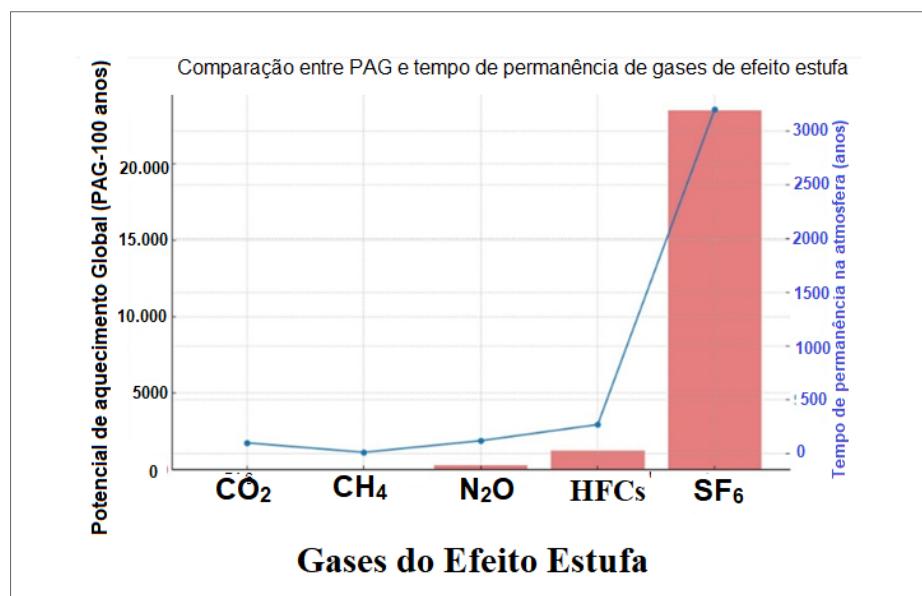


Figura 25. Comparativo entre os principais gases de efeito estufa, destacando o Potencial de Aquecimento Global (PAG) em 100 anos e o tempo médio de permanência na atmosfera. Observa-se que, embora o CO₂ tenha o menor PAG entre os gases representados, sua longa permanência e abundância o tornam o principal responsável pelo aquecimento global. Em contraste, gases industriais, como o SF₆ e os HFCs, possuem PAG extremamente elevados e persistência atmosférica de séculos a milênios, o que os torna altamente preocupantes mesmo em concentrações relativamente pequenas.

Atividades antrópicas e suas contribuições para as emissões de gases de efeito estufa: energia, desmatamento, agricultura e urbanização

A intensificação do aquecimento global nas últimas décadas está diretamente associada às atividades humanas, em especial à queima de combustíveis fósseis, à supressão da cobertura vegetal nativa, à intensificação da agropecuária e à urbanização acelerada. Esses processos interagem de forma complexa, exercendo pressões cumulativas sobre o sistema climático terrestre. As evidências científicas, consolidadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) e pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), confirmam que esses setores são os principais vetores do aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo significativamente para o desequilíbrio do balanço energético da Terra.

A queima de combustíveis fósseis: fonte primária das emissões globais

A queima de combustíveis fósseis — carvão mineral, petróleo e gás natural — permanece como a principal fonte de emissões antrópicas de dióxido de carbono (CO_2), o mais abundante dos GEE associados às mudanças climáticas. Setores como a geração termoelétrica, a indústria pesada, o transporte motorizado e o aquecimento urbano baseiam-se amplamente em fontes fósseis, dificultando a transição energética para modelos sustentáveis de baixa emissão. De acordo com a IEA (2021), o setor energético responde por cerca de 73% das emissões globais de GEE, quando são somados geração elétrica, transporte e calor industrial.

Termelétricas a carvão, em particular, representam um problema crítico: cada quilowatt-hora (kWh) gerado pode emitir até 820 g de CO_2 , enquanto fontes renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica, emitem menos de 50 g/kWh (IPCC, 2021). Além disso, a infraestrutura energética obsoleta, sobretudo em países em desenvolvimento, reforça o padrão fóssil de produção e consumo de energia, ampliando a desigualdade climática global (Robson, 2019).

A figura 26 apresenta um ranking dos maiores emissores anuais de dióxido

de carbono (CO_2) do mundo, com base em dados de 2018 da Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), medidos em megatoneladas por ano (1 megatonelada = 1 milhão de toneladas). O gráfico evidencia a disparidade significativa entre os países, com a China liderando isoladamente, responsável por 11.256 megatoneladas de CO_2 /ano, seguida pelos Estados Unidos (5.275 Mt) e pela União Europeia (3.457 Mt).

Outros grandes emissores incluem Índia (2.622 Mt), Rússia (1.748 Mt) e Japão (1.199 Mt), representando, juntos, parte substancial das emissões globais. Países como Alemanha, Irã, Coreia do Sul, Arábia Saudita, Canadá e Indonésia também figuram entre os principais emissores, ainda que com valores bem inferiores aos três primeiros colocados.

A figura 26 reforça a responsabilidade histórica e atual dessas nações nos processos de aquecimento global e evidencia a necessidade de políticas climáticas rigorosas por parte desses grandes emissores, especialmente no contexto de metas globais como as definidas pelo Acordo de Paris.

”

A origem antrópica das emissões de GEE está diretamente relacionada a transformações estruturais nos sistemas de produção e consumo.

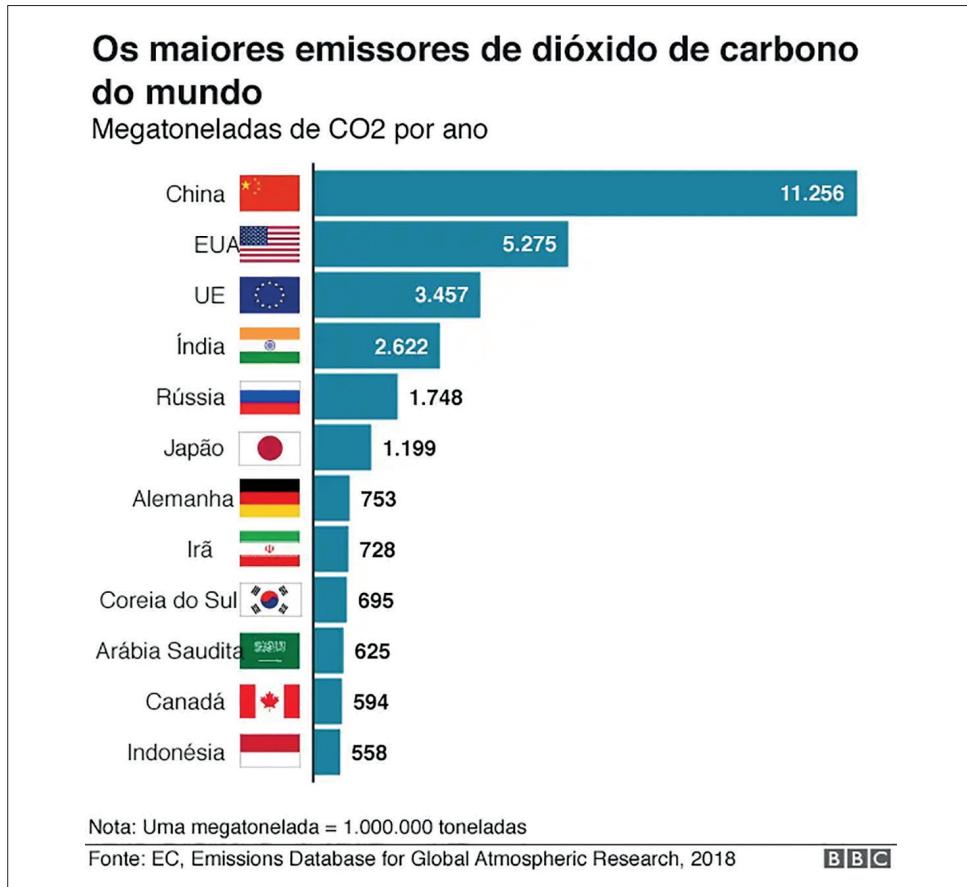


Figura 26. Apresenta os maiores emissores anuais de dióxido de carbono (CO₂) do mundo em 2018, com medição em megatoneladas. A China lidera com ampla margem, seguida por Estados Unidos e União Europeia – os três são os principais responsáveis pelas emissões globais. O gráfico destaca a concentração das emissões em um grupo restrito de países, reforçando o papel central dessas nações na mitigação das mudanças climáticas.

Desmatamento e mudanças no uso da terra: emissões diretas e perda de sumidouros

A supressão da vegetação nativa, especialmente nas regiões tropicais, como a Amazônia e o Cerrado brasileiros, continua sendo uma das principais cau-

sas de emissões de CO₂ ligadas à mudança no uso da terra. As florestas atuam como importantes sumidouros de carbono, absorvendo cerca de 2,6 bilhões de toneladas de CO₂ por ano (Pan *et al.*, 2011). A remoção da cobertura vegetal libera esse carbono estocado tanto na biomassa quanto no solo, agravando o forçamento radiativo global.

Além das emissões diretas, o desmatamento afeta diversos serviços ecosistêmicos regulatórios: reduz a capacidade de retenção hídrica do solo, altera o microclima regional, fragiliza a biodiversidade e acelera processos erosivos e desertificação. A conversão de florestas em áreas agrícolas ou urbanas é, portanto, uma das formas mais impactantes de interferência antrópica no sistema climático, tanto pela liberação de carbono quanto pela redução da capacidade de mitigação natural (Baccini *et al.*, 2017).

Agricultura intensiva e pecuária: emissões de CH₄ e N₂O

A agricultura moderna, marcada pelo uso intensivo de fertilizantes sintéticos e pela expansão da pecuária em larga escala, é responsável por cerca de 20% das emissões globais de GEE, principalmente na forma de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2021). O CH₄ é gerado sobretudo pela fermentação entérica de ruminantes e pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica em cultivos como o arroz irrigado. O N₂O, por sua vez, está ligado ao uso excessivo de fertilizantes nitrogenados e à decomposição de resíduos orgânicos em solos e sistemas aquáticos.

Além disso, práticas como a queima de resíduos agrícolas, a compactação do solo, o uso de agrotóxicos e a irrigação intensiva têm contribuído para a degradação ambiental generalizada, incluindo a poluição de corpos hídricos, a salinização do solo e a perda de fertilidade agrícola. Essas dinâmicas representam não apenas ameaças à produtividade a longo prazo, como também reforçam retroalimentações climáticas, como a liberação adicional de GEE por solos degradados (Lal, 2004).

A figura 27 compara a pegada de carbono (em quilogramas de gases de efeito estufa emitidos por porção) de diferentes alimentos, destacando como o mesmo tipo de alimento pode gerar impactos ambientais variados dependendo do modo de produção. Os alimentos são classificados em três faixas de impacto climático: baixo (verde), médio (laranja) e alto (vermelho).

A carne bovina apresenta, de longe, a maior variabilidade e intensidade de emissões, podendo chegar a mais de 15 kg de CO₂ equivalente por porção quando associada, por exemplo, a áreas de pastagem desmatadas. Outros produtos de origem animal, como carne de cordeiro, camarão de cativeiro e carne suína, também exibem altos níveis de emissão em alguns contextos. Por outro lado, alimentos de origem vegetal, como feijão, tofu, café e nozes, mostram consistentemente baixas emissões, mesmo nas situações de maior impacto.



A figura também chama a atenção para o fato de que certos alimentos comumente percebidos como inofensivos ao clima, como o chocolate, podem ter uma pegada de carbono elevada quando sua produção envolve desmatamento, superando inclusive alimentos de origem animal com menor impacto. De modo semelhante, uma porção de proteína vegetal de alto impacto ainda emite menos gases de efeito estufa do que proteínas animais de baixo impacto, reforçando a importância de considerar tanto o tipo quanto a origem dos alimentos nas decisões alimentares com base climática.

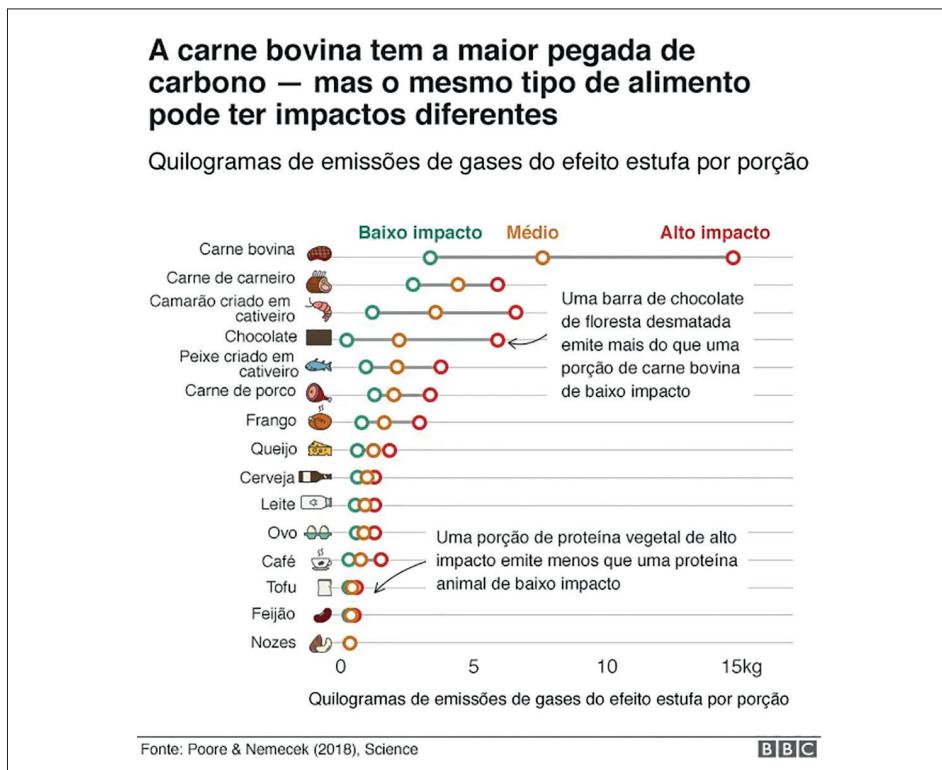


Figura 27. Ilustra as emissões de gases de efeito estufa (em kg de CO₂ equivalente por porção) associadas à produção de diferentes alimentos. A carne bovina apresenta a maior pegada de carbono, mas a figura revela que alimentos de um mesmo tipo, como carne, peixe ou chocolate, podem gerar impactos muito distintos dependendo da forma de produção. Alimentos de origem vegetal, em geral, apresentam emissões significativamente mais baixas.

Industrialização e urbanização: fontes difusas e intensivas de emissões

A industrialização acelerada dos últimos dois séculos transformou profundamente os sistemas produtivos e os padrões de consumo de energia e materiais. A produção de cimento, aço, alumínio, papel e produtos químicos está entre as maiores fontes de emissões industriais, tanto pela queima de combustíveis quanto pelas reações químicas inerentes aos processos produtivos. Somente a indústria do cimento, por exemplo, é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (Andrew, 2019).

A urbanização, por sua vez, concentra emissões difusas associadas ao transporte, à construção civil, ao consumo energético e à geração de resíduos sólidos urbanos. As áreas urbanas também amplificam os efeitos das mudanças climáticas locais por meio do fenômeno das ilhas de calor urbanas, da impermeabilização dos solos e da poluição atmosférica (Oke, 1982). Cidades mal planejadas tornam-se epicentros de vulnerabilidade climática, exigindo estratégias específicas de adaptação, como infraestrutura verde, requalificação energética de edificações e transporte público sustentável.

Setores econômicos e suas contribuições diferenciadas para as emissões globais

De acordo com o IPCC (2021) e a Climate Watch (2022), os principais setores emissores podem ser agrupados da seguinte forma:

- Energia: 73% das emissões totais, incluindo geração elétrica, calor e transporte.
- Transporte: aproximadamente 15% das emissões globais de CO₂, com ênfase no transporte rodoviário e aéreo.
- Agricultura e uso da terra: cerca de 20% das emissões, por fermentação entérica, fertilizantes e queimadas.

- Indústria: emissões diretas de processos produtivos e indiretas via uso energético.
- Resíduos: emissão de CH₄ e N₂O em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

Mitigação, transição justa e desafios estruturais

A mitigação efetiva das emissões de GEE requer medidas multissetoriais e estruturais. Entre as estratégias prioritárias, destacam-se:

- Substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis;
- Descarbonização da matriz industrial;
- Investimento em transporte público de baixo carbono;
- Redução do desmatamento e restauração de ecossistemas nativos;
- Promoção de práticas agroecológicas e uso racional de bioinsumos.

A transição energética e produtiva deve ser justa e inclusiva, considerando as desigualdades sociais e regionais na distribuição dos impactos e capacidades de resposta. Ignorar esse princípio compromete a legitimidade e a viabilidade política das medidas climáticas.

Uma transformação sistêmica é urgente

O consenso científico é inequívoco: a ação humana é a principal responsável pela intensificação do efeito estufa e pelas perturbações climáticas globais observadas. O crescimento populacional, a industrialização predatória, a urbanização desordenada e os padrões insustentáveis de produção e consumo levaram à elevação sem precedentes das concentrações de GEE na atmosfera (IPCC, 2021).

A reversão dessa trajetória exige uma transformação sistêmica de alto al-

cance, que vá além de soluções tecnológicas pontuais e abarque mudanças estruturais nos modelos de desenvolvimento (figura 28). Isso implica articulação entre políticas públicas baseadas em ciência, compromissos internacionais vinculantes, governança climática multiescalar e engajamento social efetivo. Tratar a crise climática como uma questão apenas ambiental seria um erro estratégico: ela é, sobretudo, um desafio civilizacional.

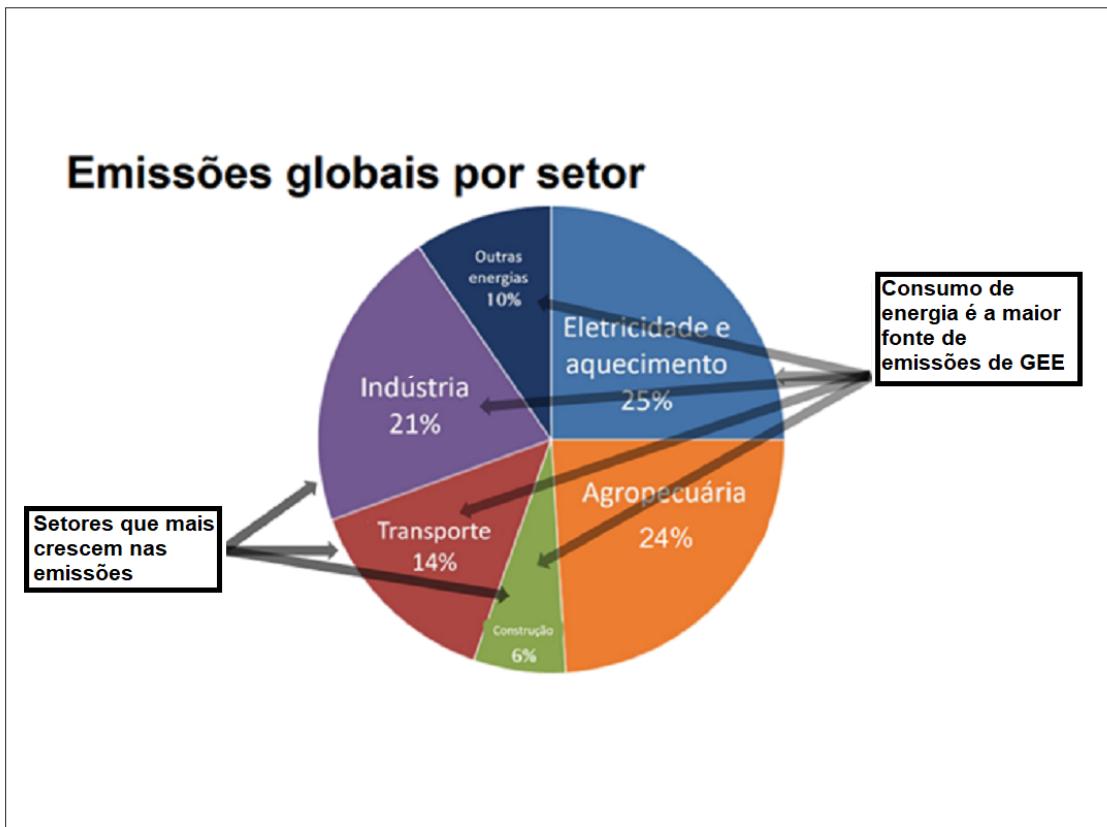


Figura 28. Ilustra a contribuição relativa de diferentes setores para as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). O setor de energia, incluindo geração elétrica e calor, é o principal responsável, seguido por indústria, agricultura e uso da terra e transporte. O setor de resíduos, embora menos expressivo em termos percentuais, ainda representa uma fonte relevante de emissões, especialmente de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O).

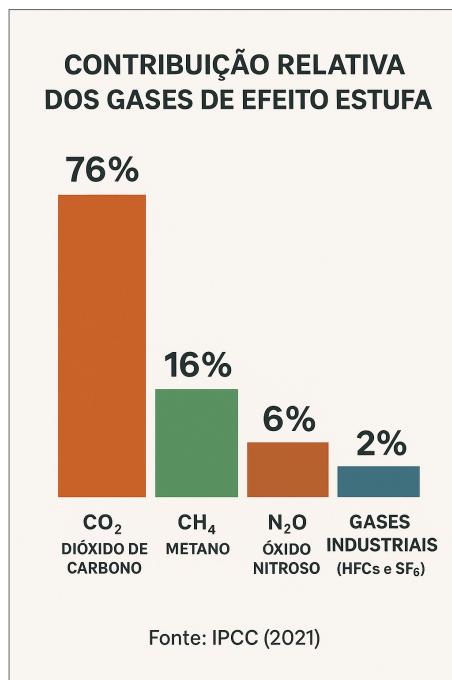


Figura 29. As barras mostram a contribuição relativa dos principais gases de efeito estufa para o aquecimento global, conforme estimativas do IPCC (2021): o dióxido de carbono (CO₂), oriundo da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, representa aproximadamente 76% das emissões globais; o metano (CH₄), com forte ligação à agropecuária e à gestão de resíduos, responde por cerca de 16%, o óxido nitroso (N₂O), vinculado sobretudo ao uso de fertilizantes, contribui com 6%; gases industriais (como HFCs e SF₆), embora presentes em concentrações menores, são altamente potentes e somam 2% do total.

O ciclo do carbono e outros elementos fundamentais

A compreensão científica das mudanças climáticas globais exige uma abordagem integrada e aprofundada dos ciclos biogeoquímicos que regem a dinâmica de elementos-chave no sistema terrestre. Entre esses ciclos, o do carbono destaca-se como central, pois influencia diretamente o balanço energético do planeta e constitui a base dos principais gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Contudo, para uma avaliação mais abrangente das perturbações climáticas em curso, é imprescindível considerar também os ciclos do nitrogênio, enxofre e fósforo, cujos efeitos interagem com

o ciclo do carbono ao influenciar a produtividade primária, a composição da atmosfera, a acidez dos solos e dos oceanos e, consequentemente, a resiliência dos ecossistemas.

O ciclo global do carbono é um dos processos reguladores mais complexos e críticos do planeta. Ele envolve fluxos contínuos entre a atmosfera, a biosfera terrestre e marinha, os solos, os sedimentos e a litosfera. O CO₂ atmosférico é fixado por organismos fotossintetizantes – como as plantas terrestres e o fitoplâncton marinho – e retorna à atmosfera por meio da respiração, decomposição de matéria orgânica e atividades antrópicas. Parte significativa desse carbono é armazenada em reservatórios de longo prazo, como florestas tropicais, solos ricos em matéria orgânica, sedimentos oceânicos e formações geológicas carbonáticas (calcário), além de combustíveis fósseis (IPCC, 2021).

Os oceanos atuam como importantes sumidouros de carbono, absorvendo aproximadamente 25% das emissões antrópicas anuais de CO₂. Esse processo, embora essencial para a mitigação do aquecimento global, vem provocando a acidificação dos oceanos — uma das mais preocupantes consequências das emissões de carbono. Quando dissolvido, o CO₂ forma ácido carbônico (H₂CO₃), que se dissocia e libera íons hidrogênio, diminuindo o pH da água e reduzindo a disponibilidade de carbonato (CO₃⁻²), fundamental para a calcificação de organismos marinhos como corais, moluscos e plâncton calcário (Doney *et al.*, 2009). A acidificação afeta a biodiversidade, compromete cadeias tróficas e representa um risco à produtividade pesqueira e à estabilidade dos ciclos marinhos.

Além do carbono, o ciclo do nitrogênio desempenha papel central nas interações climáticas e ecológicas. O nitrogênio atmosférico (N₂), embora abundante (~78%), é biologicamente inerte e necessita ser convertido em formas reativas (como amônio, nitrato ou óxidos de nitrogênio) para ser assimilado por organismos. A intervenção humana, principalmente por meio da aplicação de fertilizantes nitrogenados, do crescimento da pecuária e da queima de combustíveis fósseis, mais que dobrou a quantidade de nitrogênio reativo (Nr)

disponível no ambiente terrestre e aquático. Esse excesso acarreta eutrofização, emissão de óxido nitroso (N_2O) — um GEE cerca de 300 vezes mais potente que o CO_2 — e acidificação do solo, prejudicando a capacidade dos ecossistemas de sequestrar carbono de maneira eficiente.

O ciclo do enxofre, por sua vez, revela interações climáticas multifacetadas. A queima de carvão e derivados de petróleo libera dióxido de enxofre (SO_2), que, ao ser oxidado na atmosfera, forma sulfatos (SO_4^{2-}), responsáveis pela geração de aerossóis com alto poder refletivo. Esses aerossóis aumentam o albedo atmosférico, promovendo resfriamento local ou regional e interferindo na formação de nuvens (efeito indireto). A erupção do Monte Pinatubo, em 1991, é um exemplo emblemático desse fenômeno, ao reduzir temporariamente a temperatura média global em cerca de 0,5°C. No entanto, com a adoção de políticas de controle da poluição atmosférica e a consequente redução das emissões de SO_2 , esse efeito compensatório tem diminuído, potencializando o aquecimento anteriormente “mascarado”.

Torna-se cada vez mais evidente que os ciclos biogeoquímicos não devem ser analisados de maneira isolada. As interações entre os diferentes elementos e suas retroalimentações constituem um sistema dinâmico e altamente sensível às pressões antrópicas. O aumento da temperatura média do planeta, por exemplo, tem acelerado a degradação do permafrost, liberando grandes quantidades de metano (CH_4) e CO_2 anteriormente armazenados. A acidificação dos solos e dos oceanos compromete não apenas a biodiversidade, como também a eficiência dos ecossistemas em sequestrar carbono. A intensificação do ciclo hidrológico, por sua vez, afeta o transporte e a transformação de nitrogênio e enxofre em bacias hidrográficas, com impactos diretos sobre a qualidade da água e o clima regional.

A dimensão sistêmica desses ciclos e sua vulnerabilidade diante das ações humanas torna a previsão climática e a formulação de políticas de mitigação

um desafio científico e político de elevada complexidade (figura 30). Os desequilíbrios provocados pela intensificação das atividades humanas — como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, o uso desregulado de fertilizantes e a industrialização crescente — estão na raiz de processos como o aquecimento global, a acidificação dos oceanos, a eutrofização de sistemas aquáticos e a perda de biodiversidade.

É nesse contexto que a análise integrada dos ciclos do carbono, nitrogênio, enxofre e fósforo torna-se indispensável para orientar políticas públicas eficazes e estratégias de adaptação que assegurem a manutenção dos serviços ecossistêmicos. A integridade funcional desses ciclos é essencial não apenas para garantir a estabilidade climática global, como também para sustentar a resiliência socioambiental frente aos impactos cumulativos das mudanças globais. Investimentos contínuos em pesquisa, monitoramento e em governança ambiental baseada em evidências científicas são, portanto, elementos centrais na construção de um futuro sustentável.

”

O consenso científico é inequívoco:
a ação humana é a principal responsável
pela intensificação do efeito estufa e
pelas perturbações climáticas
globais observadas.

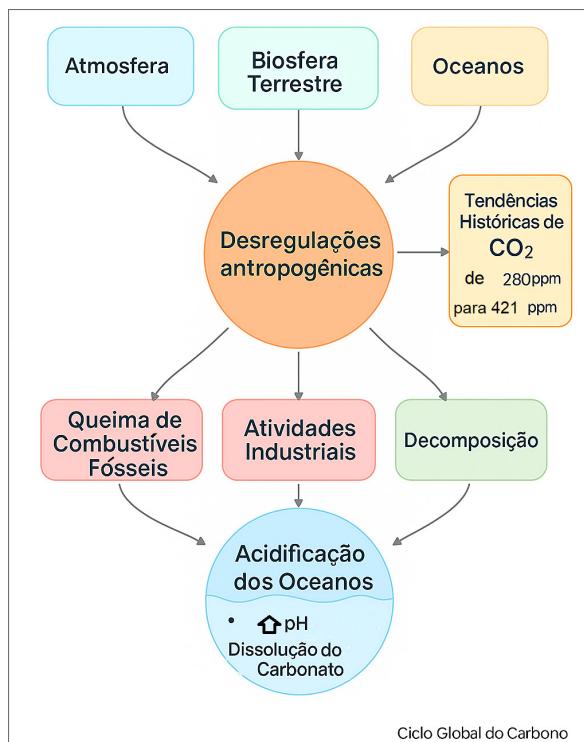


Figura 30. A imagem apresenta um esquema explicativo do ciclo global do carbono, destacando os principais reservatórios naturais (atmosfera, biosfera terrestre, oceanos e litosfera), as fontes de emissão (como queima de combustíveis fósseis, atividades industriais, respiração e decomposição) e as perturbações antrópicas, que alteram o equilíbrio desse ciclo. Também são abordadas as tendências históricas de concentração de CO₂ na atmosfera, com destaque para o aumento de aproximadamente 280 ppm no período pré-industrial para cerca de 421 ppm em 2023. A figura destaca ainda os efeitos da acidificação oceânica, como a dissolução do CO₂ e a consequente redução do pH e da disponibilidade de carbonato, o que compromete a calcificação de organismos marinhos.

Vetores antrópicos das mudanças climáticas

O papel da queima de combustíveis fósseis, do desmatamento e da agricultura intensiva

O agravamento das mudanças climáticas no Antropoceno decorre da intensificação de múltiplas atividades humanas que afetam diretamente o sistema cli-

mático. Entre os principais vetores antrópicos, destacam-se a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e a agricultura intensiva — pilares dos modelos produtivos contemporâneos. Esses processos não apenas aumentam a concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE), como também comprometem os mecanismos naturais de regulação do clima, ao alterarem a dinâmica dos ciclos biogeoquímicos e desestabilizarem os principais sumidouros de carbono.

Queima de combustíveis fósseis

Origens, expansão e impactos climáticos

Desde a Revolução Industrial, o carvão mineral, o petróleo e o gás natural tornaram-se os principais insumos energéticos do desenvolvimento socioeconômico global. Esses combustíveis fósseis passaram a sustentar o crescimento urbano, a industrialização e o transporte, respondendo, ainda hoje, por cerca de 80% da matriz energética mundial.

A combustão desses hidrocarbonetos libera grandes quantidades de CO₂, além de outros poluentes climáticos de vida curta, como óxidos de nitrogênio (NO_x), metano (CH₄) e carbono negro (fuligem). A tabela a seguir apresenta a emissão média de CO₂ por unidade de energia:

COMBUSTÍVEL	EMISSÃO MÉDIA DE CO ₂ (kg/GJ)
Carvão	~94
Petróleo	~73
Gás natural	~56

De acordo com o IPCC, a queima de combustíveis fósseis é responsável por aproximadamente 75% das emissões globais de GEE em equivalência de CO₂. Seus impactos diretos incluem:

- Elevação da temperatura média global;
- Acidificação dos oceanos devido ao excesso de CO₂ dissolvido;
- Degelo de massas polares e aumento do nível do mar;
- Perturbações na circulação atmosférica e oceânica.

Adicionalmente, os combustíveis fósseis são fonte de desigualdades socioambientais ao associarem-se à poluição do ar urbano, à degradação de ecossistemas e às disputas geopolíticas por recursos energéticos não renováveis.



Desmatamento e degradação florestal

Função ecológica das florestas e consequências da perda de cobertura vegetal

As florestas tropicais, temperadas e boreais desempenham papel crucial na regulação climática global, funcionando como sumidouros naturais de carbono. Por meio da fotossíntese, as árvores fixam o CO₂ atmosférico, armazenando-o na biomassa e nos solos. Estima-se que a vegetação terrestre contenha mais de 500 GtC (gigatoneladas de carbono).

A conversão de áreas florestais para outros usos — como agricultura, mineração, pecuária ou infraestrutura urbana — resulta na liberação de CO₂, tanto pela queima da vegetação quanto pela degradação do solo. As principais regiões afetadas incluem a Amazônia, o Sudeste Asiático e a bacia do Congo.



Os impactos climáticos e ecológicos do desmatamento incluem:

- Emissões líquidas de GEE, responsáveis por cerca de 10% das emissões globais;
- Redução da evapotranspiração e do albedo, o que agrava a aridez regional;
- Fragmentação de habitats, perda de biodiversidade e colapso de serviços ecossistêmicos;
- Disfunção dos ciclos hidrológicos e redução da resiliência climática de paisagens tropicais.

Além de afetar o sequestro de carbono, a perda de cobertura vegetal compromete a capacidade das florestas de atuar como reguladoras de temperatura e umidade em escalas local e continental.

Agricultura intensiva

Mudanças no uso do solo e emissões agropecuárias

A agricultura intensiva contemporânea é marcada por altos níveis de mecanização, aplicação de fertilizantes sintéticos, monoculturas e dependência de agrotóxicos. Essa lógica produtivista transformou vastas áreas naturais em sistemas agrícolas de baixa complexidade ecológica, mas elevada carga de emissões.

As principais fontes de GEE associadas à agricultura incluem:

- Emissão de CH_4 pela fermentação entérica de ruminantes;
- Liberação de N_2O pela aplicação de fertilizantes nitrogenados;

- Produção de CH₄ em arrozais irrigados, devido à decomposição anaeróbica;
- Queima de resíduos agrícolas, gerando CO₂, CH₄ e NO_x;
- Degradação de solos, com perda de matéria orgânica e emissão de CO₂.

Segundo o IPCC (2021), a agricultura é responsável por cerca de 20-25% das emissões globais de GEE, sem contar o desmatamento associado à expansão agropecuária.

Além das emissões diretas, os impactos ambientais colaterais da agricultura intensiva incluem:

- Eutrofização de corpos d'água, com emissões secundárias de GEE;
- Compactação, acidificação e salinização do solo, reduzindo sua fertilidade e capacidade de sequestro;
- Perda de biodiversidade funcional e dos serviços reguladores do clima.

Interações e retroalimentações climáticas

Os vetores antrópicos de mudança climática não operam de maneira isolada. Há interdependências complexas e mecanismos de retroalimentação positiva que ampliam os efeitos das emissões:

- O desmatamento reduz a umidade atmosférica, enfraquece a formação de nuvens e aumenta o risco de incêndios, que liberam grandes quantidades de GEE;
- O aquecimento global acelera a decomposição da matéria orgânica, tanto em solos agrícolas quanto em florestas degradadas, ampliando a liberação de CO₂ e N₂O;
- A mudança do uso da terra, ao modificar o albedo e a rugosidade da superfície, altera o balanço energético regional e intensifica as anomalias climáticas.

Essas interações tornam a mitigação climática um desafio sistêmico, exigindo soluções integradas que contemplem o uso racional da energia, a conservação da vegetação nativa e a transição para sistemas agroecológicos de produção.

A compreensão dos mecanismos antrópicos subjacentes às mudanças climáticas é crucial para fundamentar políticas públicas, orientar práticas sustentáveis e projetar cenários futuros. A queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e a agricultura intensiva representam os principais motores da crise climática contemporânea, tanto por suas emissões diretas quanto por seus efeitos indiretos sobre os sumidouros e os fluxos naturais de carbono.

A mitigação desses impactos exige transformações profundas nos modelos energéticos, nos sistemas agroalimentares e no ordenamento territorial. Isso implica abandonar progressivamente a matriz fóssil, promover a restauração florestal, reformar os subsídios agrícolas, fomentar a agroecologia e desenvolver tecnologias que reduzam as emissões nos setores produtivos.

A ciência climática já oferece o diagnóstico — o desafio agora é traduzir esse conhecimento em ação efetiva e justa.

A industrialização e a urbanização como vetores de impactos climáticos

O impacto da indústria e dos transportes nas mudanças climáticas

A crescente concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera é um fenômeno intimamente ligado às atividades humanas, sendo impulsionado de maneira significativa por setores econômicos que dependem de processos de alta emissão. Entre esses setores, destacam-se energia, transporte, agricultura e indústria, cada um contribuindo de maneira distinta para o agravamento das mudanças climáticas. Esses setores, com suas respectivas práticas e infraestrutura, desempenham papel fundamental na liberação de GEE e no aumento da temperatura global.

Setores de alta emissão

O setor de energia

O setor de energia é, sem dúvida, o maior responsável pelas emissões globais de gases de efeito estufa, principalmente devido à dependência de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural. A geração de eletricidade, o aquecimento e os sistemas de transporte são os principais subsetores que contribuem para essas emissões.

A queima de carvão para a geração de eletricidade é uma das fontes mais intensivas de CO₂, sendo um dos maiores contribuintes para o aquecimento global. Apesar da crescente implementação de fontes renováveis de energia, como solar e eólica, a transição energética ainda está longe de ser universal, e muitos países continuam dependentes dos combustíveis fósseis, especialmente em economias em desenvolvimento.



Setor de transportes

O setor de transportes, responsável por cerca de 15% das emissões globais de GEE, está intimamente ligado ao uso de combustíveis fósseis. A queima de petróleo para a movimentação de veículos, navios, aviões e trens emite CO₂, metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x), sendo uma das maiores fontes de poluição atmosférica nas áreas urbanas.

Em termos quantitativos, os veículos terrestres (automóveis, caminhões e ônibus) são responsáveis pela maior parte das emissões do setor de transportes. A aviação e a navegação marítima também desempenham um papel relevante, com a aviação internacional, por exemplo, contribuindo significativamente para o aumento de gases de efeito estufa devido à alta intensidade energética dos voos a grandes altitudes, onde o impacto climático é potencializado.

Setor agropecuário

Embora muitas vezes não seja imediatamente associado à indústria tradicional, o setor agropecuário é uma grande fonte de emissões de GEE, particularmente em países com sistemas agrícolas extensivos. O desmatamento para a expansão das áreas agrícolas e das áreas de pastagens para a pecuária contribui substancialmente para a liberação de CO₂. No entanto, é a produção de metano (CH₄), proveniente da digestão entérica de ruminantes e da fermentação anaeróbica em pântanos e arrozais, que representa a maior parte das emissões do setor agropecuário.

Além disso, o uso de fertilizantes nitrogenados para o aumento da produtividade agrícola resulta na emissão de óxido nitroso (N₂O), outro GEE com poder de aquecimento global significativamente maior que o do CO₂.

Indústria pesada

A indústria pesada, que inclui siderurgia, produção de cimento, indústria química e petroquímica, também é um importante setor de alta emissão. A

produção de cimento é um dos maiores emissores de CO₂, devido à decomposição de carbonato de cálcio (CaCO₃) durante a produção de clínquer, que libera grandes quantidades de CO₂ na atmosfera (figura 31). Esse processo, combinado com o uso de combustíveis fósseis no fornecimento de calor para a reação química, resulta em uma emissão significativa de gases.

Outros setores industriais, como a produção de aço e alumínio, também têm um impacto considerável devido à alta demanda energética e ao uso de processos baseados na queima de combustíveis fósseis. Além disso, os processos industriais frequentemente envolvem o uso de solventes voláteis, que contribuem com gases orgânicos voláteis (GOVs), que também têm um efeito de aquecimento climático, embora em menor escala (figura 32).

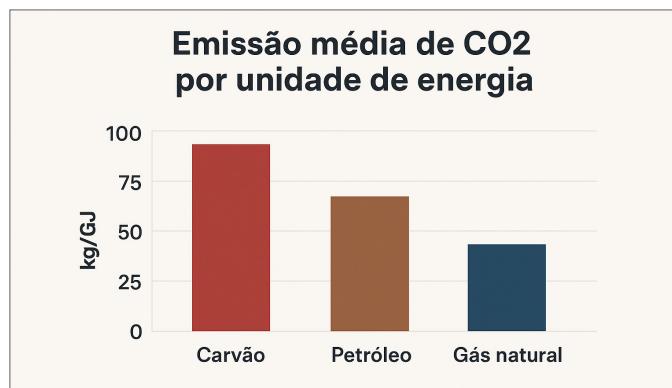


Figura 31. Ilustra a emissão média de CO₂ por unidade de energia (kg/GJ) para os principais combustíveis fósseis — carvão, petróleo e gás natural. Esse tipo de representação gráfica facilita a comparação da intensidade de carbono entre as fontes energéticas e destaca o impacto desproporcional do carvão no aquecimento global.

”

A queima de carvão para a geração de eletricidade
é uma das fontes mais intensivas de CO₂.

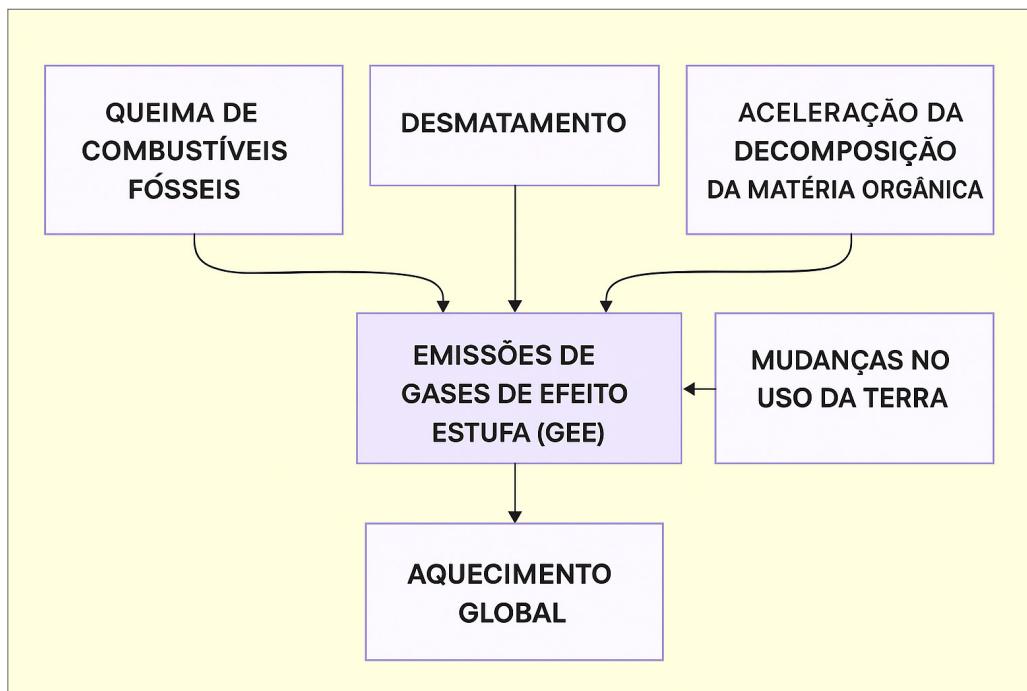


Figura 32. Vetores antrópicos das mudanças climáticas: o diagrama ilustra os principais vetores antrópicos que impulsionam as mudanças climáticas, destacando três atividades humanas centrais: queima de combustíveis fósseis, desmatamento e agricultura intensiva. Essas ações contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), que, por sua vez, levam ao aquecimento global. Como efeitos secundários desse aquecimento, observam-se a aceleração da decomposição da matéria orgânica, a redução da umidade atmosférica e mudanças no uso da terra — todos fatores que retroalimentam o sistema, intensificando ainda mais as emissões de GEE. A figura evidencia o caráter cíclico e interdependente das pressões antrópicas sobre o sistema climático terrestre.

Como esses setores contribuem para o aumento de GEE

Emissões diretas e indiretas

A contribuição desses setores para o aumento de GEE pode ser dividida em duas principais categorias:

- **Emissões diretas:** são originadas da queima de combustíveis fósseis diretamente nas atividades de geração de energia, transporte, produção industrial ou na agricultura. Exemplos incluem: a emissão de CO₂ proveniente da queima de carvão e petróleo; ou o metano liberado no processo de decomposição de resíduos agrícolas.
- **Emissões indiretas:** resultam de atividades que, embora não envolvam a queima direta de combustíveis fósseis, levam à utilização de energia elétrica ou ao uso de processos industriais que, por sua vez, geram emissões de GEE. Um exemplo é a produção de produtos de consumo que demandam grandes quantidades de energia para sua fabricação, como alimentos processados ou bens manufaturados, cujas emissões podem ser atribuídas ao uso de energia proveniente de fontes fósseis.

O papel dos combustíveis fósseis

O carbono fóssil representa a principal fonte de CO₂ liberado na atmosfera. Quando carvão, petróleo e gás natural são queimados, o carbono contido nesses combustíveis reage com o oxigênio, formando CO₂, que é então liberado para a atmosfera. Esse processo é amplificado pela intensa demanda energética das atividades industriais e de transporte, com a queima de combustíveis fósseis predominando como a maior fonte de emissão de GEE.

O impacto das emissões não se limita ao CO₂. O metano (CH₄), um GEE com poder de aquecimento global muito superior ao do CO₂, é liberado especialmente no setor de petróleo e gás, na extração e processamento de gás natural e no transporte de combustíveis.

O efeito indireto do uso de produtos derivados de fósseis

Além das emissões diretas, o uso de produtos derivados de combustíveis fósseis contribui para o aumento de GEE. A produção de plásticos, a fabricação

de fertilizantes sintéticos e a indústria petroquímica são grandes consumidores de petróleo e gás natural, levando a emissões indiretas por meio do consumo de eletricidade e combustíveis para suas operações.

O impacto das atividades industriais e de transporte no aumento das concentrações de gases de efeito estufa é um dos principais fatores que aceleram as mudanças climáticas globais. O setor de energia, em particular, é o maior responsável pela liberação de CO₂, enquanto o setor agropecuário contribui de forma significativa por meio da liberação de metano e óxido nitroso. A indústria, por sua vez, emite grandes volumes de CO₂ e de outros poluentes devido à intensa demanda energética e aos processos químicos.

A mitigação desse impacto exige uma transformação significativa na matriz energética global, com a adoção de fontes renováveis, a implementação de tecnologias mais limpas e a promoção de políticas de eficiência energética e uso sustentável de recursos. Além disso, é imperativo que as práticas agrícolas e industriais sejam reformuladas para reduzir as emissões e aumentar a resiliência climática, de forma a permitir um desenvolvimento sustentável.

O reconhecimento das fontes e dos mecanismos de emissão é o primeiro passo para o desenvolvimento de soluções eficazes. O desafio é transformar esse conhecimento em ação, incentivando políticas globais coordenadas e locais e promovendo a inovação tecnológica para a mitigação das emissões de GEE.

O papel dos oceanos no clima global

Os oceanos, cobrindo aproximadamente 71% da superfície terrestre, exercem papel central na regulação do clima planetário. Constituídos como um gigante-
co reservatório térmico, químico e biogeoquímico, eles absorvem vastas quantidades de calor e gases de efeito estufa (GEE), modulando o balanço radiativo da Terra. Esse papel amortecedor tem sido crucial para atenuar os impactos das mudanças climáticas, sobretudo desde a intensificação das emissões antrópicas

de CO₂ durante a Revolução Industrial. Os principais mecanismos envolvidos na regulação climática pelos oceanos, envolvem mecanismos como a absorção de calor, a captura de GEE e as consequências da acidificação marinha.

Absorção de calor e regulação térmica

Com sua elevada capacidade calorífica, os oceanos têm absorvido mais de 90% do excesso de energia térmica gerada pelo efeito estufa ampliado (IPCC, 2021). Essa absorção concentra-se predominantemente nas camadas superiores (até 700 m de profundidade), mas também ocorre em profundidades maiores por meio de processos advectivos e difusivos. A redistribuição global desse calor depende de mecanismos como a circulação termohalina, os ventos alísios, as correntes oceânicas superficiais (por exemplo: Corrente do Golfo) e fenômenos como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO).

A transferência de calor entre oceano e atmosfera ocorre por meio de fluxos de calor sensível, latente (por evaporação) e radiação infravermelha, contribuindo diretamente para a formação de sistemas meteorológicos e influenciando padrões regionais e globais de precipitação e temperatura. Assim, os oceanos não apenas absorvem calor, como também o redistribuem espacial e temporalmente, atuando como um verdadeiro regulador térmico planetário.

Captação de gases de efeito estufa

Os oceanos funcionam também como importantes sumidouros de carbono, absorvendo entre 25% e 30% do CO₂ emitido pelas atividades humanas (Friedlingstein *et al.*, 2022). Esse processo é regulado por gradientes de pressão parcial e depende de fatores como temperatura, salinidade e circulação oceânica.

Destacam-se três mecanismos principais:

1. Bomba física de carbono: relacionada à solubilidade do CO₂ em água fria, predominante em altas latitudes;

2. Bomba biológica: mediada por organismos como o fitoplâncton, que fixam CO₂ via fotossíntese, com parte do carbono sendo exportado para camadas profundas após a morte dos organismos;
3. Bomba de ecossistemas: operante em ambientes costeiros (manguezais, pradarias marinhas e marismas), onde o carbono é armazenado na biomassa e nos sedimentos.

No entanto, o acúmulo crescente de CO₂ nos oceanos leva à acidificação marinha, um processo químico no qual o CO₂ reage com a água formando ácido carbônico (H₂CO₃), que se dissocia em íons bicarbonato (HCO₃⁻) e hidrogênio (H⁺), diminuindo o pH.

Consequências da acidificação oceânica: impactos multifacetados sobre a estrutura e funcionamento dos ecossistemas marinhos

A acidificação dos oceanos é um dos fenômenos mais alarmantes associados ao aumento contínuo das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), resultantes da queima de combustíveis fósseis e de mudanças no uso do solo. Desde a Revolução Industrial, estima-se que os oceanos tenham absorvido cerca de 30% do CO₂ antropogênico lançado na atmosfera (IPCC, 2021). Esse processo leva à formação de ácido carbônico (H₂CO₃), o qual se dissocia em íons hidrogênio (H⁺) e bicarbonato (HCO₃⁻), reduzindo o pH da água do mar e, sobretudo, diminuindo a concentração dos íons carbonato (CO₃²⁻), essenciais para a calcificação de organismos marinhos.

Organismos calcificantes — incluindo corais escleractíneos, moluscos bivalves, equinodermos, crustáceos e microrganismos, como foraminíferos e colíforos — são diretamente afetados pela menor saturação de carbonato de cálcio (CaCO₃), tanto na forma de calcita quanto de aragonita. O enfraquecimento das estruturas calcárias compromete o crescimento, a reprodução e a

resistência mecânica desses organismos, tornando-os mais vulneráveis à predação e à erosão (Doney *et al.*, 2009; Kroeker *et al.*, 2013).

Esses impactos reverberam ao longo da cadeia trófica marinha. A redução da biomassa de organismos calcificantes pode afetar a alimentação de espécies superiores, como peixes demersais e pelágicos, influenciando diretamente a biodiversidade, a produtividade pesqueira e os modos de subsistência de comunidades humanas costeiras (Branch *et al.*, 2013). Em recifes de coral, por exemplo, a acidificação atua de forma sinérgica com o aquecimento oceânico, promovendo branqueamento, redução da calcificação e colapso estrutural dos habitats recifais (Hughes *et al.*, 2017).

Além dos efeitos nos organismos calcificantes, a acidificação influencia processos fisiológicos e bioquímicos de organismos não calcificantes. A alteração do equilíbrio ácido-base pode afetar a regulação osmótica, a função neurológica e o metabolismo energético de peixes e invertebrados, com consequências sobre taxas de crescimento, fecundidade e comportamento alimentar (Pörtner; Farrell, 2008; Heuer; Grosell, 2014).

Do ponto de vista biogeoquímico, há implicações relevantes sobre o ciclo de nutrientes e de metais-traço. A solubilidade e a especiação química de elementos como ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu) e manganês (Mn) podem ser alteradas sob pH reduzido, com impactos sobre a biodisponibilidade desses elementos essenciais para o fitoplâncton (Shi *et al.*, 2017). Esse grupo funcional é responsável por aproximadamente metade da produção primária global e constitui a base das redes tróficas marinhas. A acidificação também pode influenciar negativamente a capacidade de algumas espécies fitoplanctônicas de fixar carbono e produzir dimetilsulfeto (DMS), um composto volátil com efeitos relevantes sobre a formação de nuvens e o albedo planetário (Six *et al.*, 2013).

Outro aspecto preocupante refere-se à potencial intensificação da toxicidade de poluentes sob condições mais ácidas. Estudos experimentais demonstram

que a acidificação pode aumentar a biodisponibilidade e toxicidade de metais pesados (como cádmio, chumbo e mercúrio) e de compostos nitrogenados, como a amônia não ionizada (NH_4), com consequências ecotoxicológicas significativas para invertebrados bentônicos, larvas de peixes e zooplâncton (Noyes *et al.*, 2009; Boyd *et al.*, 2015).

Em sistemas costeiros, como estuários e manguezais, a acidificação interage com múltiplos estressores locais — eutrofização, escoamento de nutrientes, alterações salinas e aquecimento —, promovendo efeitos sinérgicos que comprometem a resiliência ecológica desses ambientes. Os juvenis de várias espécies comerciais, como ostras (*Crassostrea gigas*), vieiras e mexilhões, já têm demonstrado alta sensibilidade ao pH reduzido durante estágios larvais, com implicações para a aquicultura e a segurança alimentar (Waldbusser *et al.*, 2015).

Por fim, é importante destacar que a acidificação dos oceanos também compromete a função reguladora dos oceanos como sumidouros de carbono. A diminuição da calcificação de organismos planctônicos pode reduzir a exportação de carbono biogênico para as profundezas, enfraquecendo a bomba biológica e potencialmente retroalimentando o aquecimento global (Bopp *et al.*, 2013).

Correntes oceânicas e circulação global

As correntes oceânicas desempenham papel crítico na redistribuição de calor e no controle do clima. As correntes superficiais são impulsionadas pelos ventos predominantes e pela força de Coriolis, enquanto as correntes profundas dependem de diferenças de densidade provocadas por variações de temperatura e salinidade (circulação termohalina).

Esse sistema, conhecido como “cinta transportadora oceânica” (*global conveyor belt*), conecta os oceanos do planeta e regula o clima em escalas temporais que vão de décadas a milênios. Um de seus componentes críticos, a Circulação Meridional do Atlântico (AMOC), é particularmente sensível ao derretimento de

geleiras e ao aporte de água doce no Atlântico Norte, o que pode comprometer o afundamento das águas frias e salinas.

Modelagens climáticas indicam que o enfraquecimento da AMOC pode gerar efeitos drásticos, como resfriamento abrupto da Europa Ocidental, alterações nos padrões de monção na África Ocidental e instabilidades no clima da América do Sul e Caribe.

A contribuição dos oceanos para o clima global vai além da absorção de calor e gases: ela manifesta-se em sua capacidade de conectar processos climáticos locais e globais, atenuar extremos meteorológicos e sustentar a biodiversidade marinha. No entanto, essa função amortecedora tem limites e implicações ecológicas relevantes. É imperativo fortalecer a governança dos oceanos, promover a descarbonização das economias e ampliar o monitoramento integrado dos processos oceânicos para garantir a estabilidade do sistema climático terrestre nas próximas décadas.

Impactos das mudanças climáticas na Circulação Meridional do Atlântico (AMOC)

A Circulação Meridional de Revolvimento do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation – AMOC*) é um componente essencial do sistema climático global. Trata-se de um vasto sistema de correntes oceânicas que transporta calor, salinidade e nutrientes entre o Hemisfério Sul e o Hemisfério Norte, desempenhando papel crucial na regulação térmica do Atlântico Norte, da Europa Ocidental e de amplas regiões tropicais e subtropicais. A AMOC é frequentemente descrita como a “correia transportadora” do oceano, sendo responsável pela ascensão de águas profundas no Atlântico Sul e pelo afundamento de águas superficiais densas no Atlântico Norte, especialmente nas regiões subpolares.

No contexto das mudanças climáticas antropogênicas, há crescente evidência científica de que a AMOC está sofrendo um enfraquecimento progressivo,

com implicações profundas para o clima regional e global. Esse enfraquecimento decorre de múltiplos mecanismos, sendo o principal deles o aumento do aporte de água doce proveniente do degelo da Groenlândia, do aumento das chuvas e da exportação fluvial do Ártico. A redução da salinidade superficial no Atlântico Norte diminui a densidade da água, prejudicando o processo de afundamento que sustenta a célula de revolvimento termohalino.

Modelos climáticos globais projetam que, sob cenários de altas emissões de gases de efeito estufa, a AMOC poderá enfraquecer entre 24% e 45% até o fim do século XXI (IPCC, 2021). Estimativas paleoceanográficas indicam que a circulação já está em seu ponto mais fraco dos últimos mil anos (Caesar *et al.*, 2018), o que levanta preocupações sobre a possibilidade de transições abruptas, como uma desaceleração súbita ou até mesmo um colapso parcial.

As consequências desse enfraquecimento são amplas e multifacetadas:

- No Hemisfério Norte, espera-se um aumento das temperaturas no sul dos Estados Unidos e uma intensificação do resfriamento na Europa Ocidental e no norte do Atlântico, devido à redução do transporte de calor pela Corrente do Golfo.
- No cinturão tropical, a redistribuição de calor afeta a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), impactando os regimes de monções na América do Sul e na África Ocidental. Isso pode agravar secas no Sahel e aumentar a variabilidade pluviométrica na Amazônia.
- Na América do Sul, a desaceleração da AMOC está associada à intensificação de padrões de chuvas extremas no Sudeste brasileiro, bem como à diminuição da precipitação no norte da região amazônica.
- Na criossfera e no nível do mar, a desaceleração da AMOC contribui para o aumento do nível do mar na costa leste da América do Norte, por meio da redistribuição das massas oceânicas e da alteração da gravidade oceânica local.

Além disso, a perturbação da AMOC interfere nas dinâmicas de sequestro de carbono marinho, uma vez que a circulação profunda está diretamente relacionada ao transporte de matéria orgânica para as camadas abissais do oceano. Assim, o enfraquecimento da AMOC compromete não apenas o balanço térmico, como também os processos biogeoquímicos associados à mitigação natural do aquecimento global.

Em síntese, a AMOC é uma engrenagem crítica do sistema climático terrestre, e seu enfraquecimento representa um dos pontos de inflexão (*tipping points*) mais sensíveis e potencialmente disruptivos da atual era geológica. A estabilidade dessa circulação depende da contenção das emissões de gases de efeito estufa, da proteção das calotas polares e da preservação do equilíbrio hidrológico do Atlântico Norte. Ignorar esses sinais de alerta compromete os sistemas oceânicos, bem como a segurança climática das sociedades humanas nas próximas décadas (figura 33).

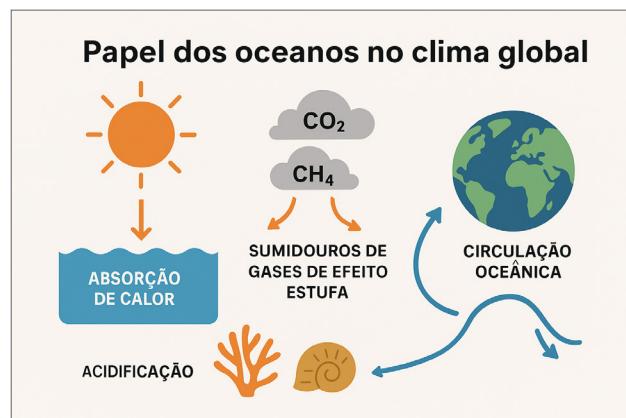


Figura 33. O papel dos oceanos no clima global: a figura resume as funções cruciais desempenhadas pelos oceanos na regulação do clima terrestre. Os oceanos absorvem grande parte do calor excedente da atmosfera, contribuindo para a regulação térmica global. Também atuam como importantes sumidouros de gases de efeito estufa, como CO₂ e CH₄, por meio de mecanismos físico-químicos, biológicos e ecosistêmicos. A circulação oceânica, representada pela “cinta transportadora oceânica”, redistribui calor e nutrientes em escala planetária, influenciando padrões climáticos e meteorológicos. No entanto, a absorção de CO₂ também leva à acidificação dos oceanos, o que afeta a química da água e prejudica organismos calcários, como corais e moluscos, comprometendo cadeias tróficas e a biodiversidade marinha.

Correntes marítimas e seus efeitos no clima global

As correntes oceânicas desempenham um papel essencial na regulação do clima da Terra, funcionando como verdadeiros “rios” de água que redistribuem calor, nutrientes e gases dissolvidos por todos os oceanos do planeta. Entre os sistemas mais influentes nesse processo destacam-se a circulação termohalina, os fenômenos interanuais El Niño e La Niña e os complexos mecanismos de retroalimentação entre o oceano e a atmosfera. As mudanças climáticas atuais, marcadas por um aquecimento global sem precedentes, estão interferindo diretamente nessas dinâmicas, com potenciais consequências amplas para os padrões climáticos regionais e globais, bem como para os ecossistemas marinhos e as populações humanas que deles dependem.

O sistema de circulação termohalina: a correia transportadora global

A circulação termohalina, muitas vezes chamada de *Global Conveyor Belt* (Correia Transportadora Global), é um sistema global de correntes oceânicas profundas impulsionado por variações na temperatura (termo) e salinidade (halina) da água. Essas variações afetam diretamente a densidade da água, promovendo sua movimentação vertical (afundamento e ressurgência) e horizontal (circulação global).

O processo inicia-se nas regiões polares, especialmente no Atlântico Norte, onde águas superficiais frias e salinas tornam-se densas o suficiente para afundar, iniciando uma corrente profunda que se propaga por todo o oceano mundial. Esse sistema transporta grandes quantidades de calor dos trópicos para as altas latitudes, desempenhando um papel fundamental na moderação climática, especialmente na Europa Ocidental, onde mantém invernos relativamente amenos.

Estudos indicam que interrupções ou lentificações nesse sistema, como tem sido observado nas últimas décadas, estão associadas a alterações signifi-

ficativas nos padrões de precipitação, como secas severas na região do Sahel e no norte da África, além de aumento das chuvas na Europa setentrional. Esses efeitos têm implicações diretas para a segurança hídrica e alimentar de milhões de pessoas.

Interrupções na circulação e seus efeitos climáticos

Um dos principais riscos relacionados às mudanças climáticas é a desestabilização da circulação termohalina, especialmente devido ao derretimento acelerado das calotas polares. O aumento do aporte de água doce no Oceano Atlântico Norte, decorrente do degelo do Ártico e da Groenlândia, reduz a salinidade e, portanto, a densidade das águas superficiais, comprometendo sua capacidade de afundamento e, por consequência, a continuidade da circulação profunda.

Modelos climáticos preveem que uma desaceleração acentuada, ou mesmo uma eventual interrupção da Circulação Meridional do Atlântico (AMOC) — principal componente da cinta transportadora —, pode provocar um resfriamento abrupto no Hemisfério Norte, especialmente na Europa, enquanto o Hemisfério Sul poderia sofrer aquecimento adicional. Além disso, tais alterações impactariam os sistemas de monções, a migração de zonas climáticas tropicais e os regimes de precipitação em várias partes do mundo.

El Niño e La Niña: oscilações no Pacífico com efeitos globais

Os fenômenos El Niño e La Niña representam fases opostas de uma oscilação natural do sistema oceano-atmosfera no Oceano Pacífico tropical, conhecida como *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO). Tais eventos exercem forte influência sobre o clima global, alterando regimes de chuva, padrões de ventos e a frequência de desastres naturais.

Durante o El Niño, observa-se o enfraquecimento dos ventos alísios e o aquecimento anômalo das águas superficiais do Pacífico central e oriental. Isso

leva à seca na Austrália e no sudeste da Ásia, aumento de chuvas intensas na costa oeste das Américas e a um efeito de aquecimento global temporário da temperatura média planetária. Também há correlação entre o El Niño e uma maior frequência de incêndios florestais, como observado na Amazônia, no sudeste asiático e na Austrália.

Por outro lado, La Niña caracteriza-se por ventos alísios intensificados e resfriamento das águas do Pacífico tropical. Isso pode intensificar furacões no Atlântico, provocar cheias na Austrália e Indonésia e agravar secas na América do Sul meridional.

Ambos os eventos têm impactos socioeconômicos significativos, afetando a agricultura, os recursos hídricos e a saúde pública.

Impacto das mudanças climáticas nas correntes oceânicas

Alterações na circulação oceânica

As mudanças climáticas antropogênicas estão afetando significativamente as correntes oceânicas de superfície e profundas, em especial por meio do aquecimento global e do derretimento acelerado das geleiras e da calota polar. Esse derretimento adiciona grandes volumes de água doce aos oceanos, diluindo a salinidade superficial, especialmente nas regiões polares.

A combinação de temperaturas mais altas e salinidade reduzida altera os gradientes de densidade que impulsionam a circulação termohalina. Como resultado, tem-se observado uma lentificação da AMOC nas últimas décadas — uma tendência confirmada por dados observacionais e reconstruções paleoclimáticas (Caesar *et al.*, 2018). Se esse enfraquecimento persistir ou se intensificar, as implicações poderão ser severas, incluindo instabilidade climática

prolongada, mudanças nos padrões de migração de peixes, colapso de ecossistemas bentônicos e perturbações na produtividade primária marinha.

Consequências para o clima e os ecossistemas

A alteração das correntes oceânicas afeta não apenas o clima, como também os processos biogeoquímicos marinhos. Mudanças na temperatura e salinidade modificam os padrões de ressurgência, afetando a disponibilidade de nutrientes e a produtividade do fitoplâncton — base das cadeias tróficas marinhas.

Essas alterações impactam diretamente as populações de organismos pelágicos e demersais, influenciando a distribuição geográfica dos estoques pesqueiros, a reprodução e o crescimento das espécies e a viabilidade econômica da pesca artesanal e industrial. Além disso, o aumento na frequência de eventos climáticos extremos compromete as estruturas sociais e econômicas costeiras, que já enfrentam vulnerabilidades acentuadas por desigualdade e falta de infraestrutura adaptativa.

As águas oceânicas e os recifes de corais

Aquecimento oceânico e acidificação

O contínuo aquecimento das águas superficiais tem efeitos devastadores sobre ecossistemas altamente sensíveis, como os recifes de corais. O branqueamento de corais, causado pela expulsão das zooxantelas simbióticas sob estresse térmico, tem sido amplamente registrado em episódios massivos nos oceanos Índico, Pacífico e Atlântico. A elevação da temperatura por apenas 1°C a 2°C acima da média já é suficiente para desencadear tais eventos.

Simultaneamente, a acidificação oceânica, resultante da absorção de CO₂

atmosférico, reduz a disponibilidade de íons carbonato (CO_3^{2-}), fundamentais para a formação dos esqueletos calcários de corais, moluscos e crustáceos. Isso compromete a resiliência ecológica e estrutural dos recifes, afetando sua capacidade de recuperação após eventos de branqueamento e tornando-os mais vulneráveis à erosão e predação.

Desafios para a conservação marinha

A conservação dos ecossistemas marinhos diante das mudanças climáticas exige estratégias integradas, que combinem mitigação das emissões de gases de efeito estufa, restauração ecológica e adaptação baseada em ecossistemas. Ferramentas como áreas marinhas protegidas (AMPs), manejo adaptativo da pesca e técnicas de restauração ativa de corais (por exemplo: transplantes e seleção de genótipos termorresistentes) têm sido propostas e implementadas com variados níveis de sucesso.

Contudo, a eficácia dessas estratégias depende da estabilidade das condições oceânicas, o que reforça a necessidade de combater as causas sistêmicas das mudanças climáticas. Além disso, políticas públicas robustas e investimentos em ciência oceânica e tecnologias de monitoramento são fundamentais para antecipar impactos, mitigar danos e promover uma convivência sustentável com os mares (figura 34).

As correntes oceânicas são pilares estruturantes do sistema climático terrestre. Seu funcionamento e estabilidade são essenciais para a regular a temperatura, os padrões de precipitação, a circulação atmosférica e o equilíbrio dos ecossistemas marinhos. A crescente influência antrópica sobre o clima tem colocado em risco esses sistemas, exigindo respostas urgentes e baseadas em evidências científicas.

Proteger os oceanos, mitigar os fatores de estresse climático e fortalecer as

capacidades adaptativas dos ecossistemas costeiros e das populações humanas são imperativos éticos e científicos para enfrentar o século XXI com resiliência e justiça climática.

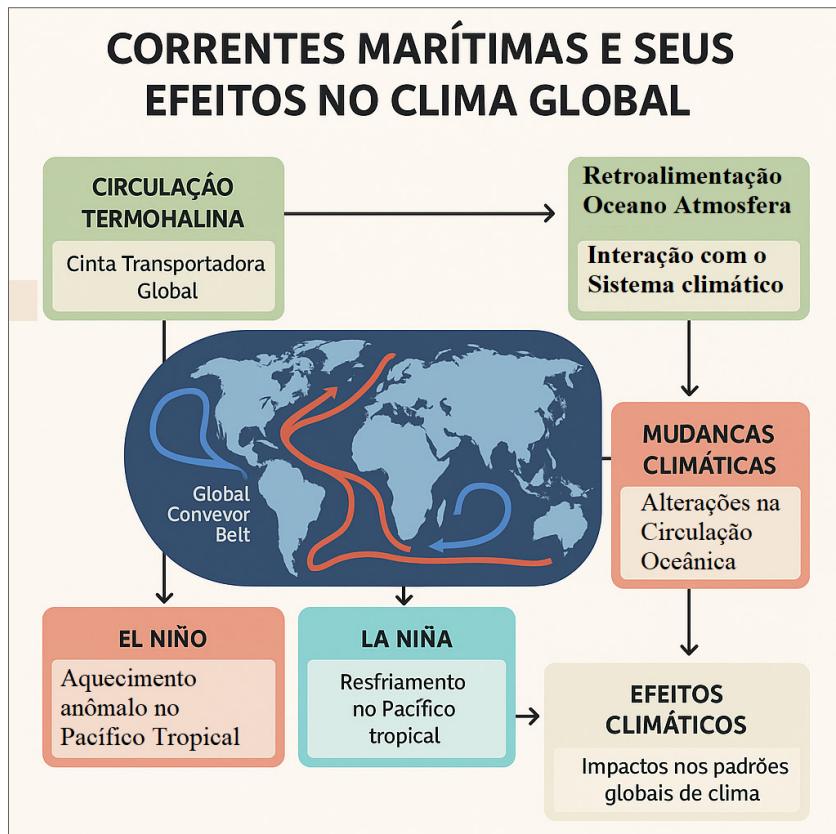


Figura 34. Correntes marítimas e seus efeitos no clima global: a figura ilustra a dinâmica da circulação termohalina, também conhecida como “cinta transportadora global”, e sua influência no sistema climático planetário. Essa circulação oceânica profunda é impulsionada por diferenças de temperatura e salinidade da água, redistribuindo calor entre os hemisférios e regulando o clima global. A interação entre oceanos e atmosfera gera processos de retroalimentação que afetam o sistema climático, contribuindo para fenômenos como o El Niño (aquecimento anômalo no Pacífico tropical) e La Niña (resfriamento nessa mesma região). Tais eventos impactam diretamente os padrões climáticos globais, alterando regimes de chuvas, secas, ciclones e temperaturas em diversas regiões do planeta. Além disso, mudanças climáticas intensificadas por ações antrópicas afetam a circulação oceânica, demonstrando a complexa interdependência entre oceanos e clima.

O ciclo do carbono marinho: mecanismos de regulação climática e seus limites

O ciclo do carbono marinho constitui um dos pilares do sistema climático global, integrando processos físicos, químicos e biológicos que regulam o fluxo e o armazenamento de carbono entre a atmosfera, os oceanos e a biosfera. O papel central do oceano nesse ciclo decorre de sua enorme capacidade de armazenar carbono, tanto na forma inorgânica dissolvida quanto em biomassa orgânica associada à produtividade biológica. Esse sistema é mediado por mecanismos complexos, notadamente as chamadas bombas de carbono – biológica e física –, que operam em sinergia para sequestrar dióxido de carbono atmosférico e transferi-lo para o interior do oceano, onde pode permanecer por décadas a milênios.

Bomba biológica de carbono

A bomba biológica de carbono é um processo fundamental do ciclo biogeoquímico oceânico, responsável pela captura do CO₂ atmosférico por meio da fotossíntese realizada pelo fitoplâncton. Esses organismos microscópicos, presentes na camada eupótica do oceano, utilizam o dióxido de carbono dissolvido e a energia solar para sintetizar matéria orgânica, transformando o carbono inorgânico em carbono orgânico particulado (COP).

Esse carbono orgânico tem dois destinos principais:

- Transferência trófica: parte do carbono assimilado pelo fitoplâncton é transferida aos níveis tróficos superiores, como zooplâncton, peixes e outros organismos marinhos, por meio das cadeias alimentares.
- Exportação para o oceano profundo: outra parcela significativa é exportada da superfície para as camadas mais profundas do oceano. Esse fluxo vertical ocorre por meio da sedimentação da matéria orgânica morta,

das fezes do zooplâncton e da agregação de partículas, que transportam carbono para zonas onde ele pode ser remineralizado ou enterrado nos sedimentos marinhos.

- De acordo com o modelo proposto por Volk e Hoffert (1985), esse mecanismo é essencial para manter níveis estáveis de CO₂ atmosférico, operando como uma via natural de sequestro de carbono em escalas de tempo geológicas.

Bomba física de carbono

A bomba física de carbono, por sua vez, baseia-se na solubilidade do CO₂ em água do mar e nos movimentos de massa das correntes oceânicas, em especial os processos de afundamento de águas densas em regiões de alta latitude, como o Atlântico Norte e o Mar de Weddell, na Antártica.

Em regiões frias, a solubilidade do CO₂ é maior, e as águas superficiais, ao tornarem-se mais densas por resfriamento e aumento da salinidade (por congelamento ou evaporação), afundam e transportam consigo o carbono dissolvido para o interior do oceano. Esse CO₂ pode permanecer isolado da atmosfera por períodos que variam de décadas a séculos, dependendo da profundidade e da trajetória das massas de água no interior do oceano.

Esse processo é um componente central da Circulação Meridional de Revolvimento (CMR), também conhecida como “esteira oceânica global”, e atua como um mecanismo eficiente de armazenamento a longo prazo do carbono.

Interações e limitações sob o aquecimento global

Apesar de sua eficácia no sequestro de carbono, tanto a bomba biológica quanto a física estão sujeitas a alterações frente ao aquecimento global. Um dos principais efeitos observados é a redução da solubilidade do CO₂ com o aumento da temperatura da superfície do mar, o que limita a eficiência da bomba física.

Simultaneamente, o aquecimento promove uma estratificação mais intensa da coluna d'água, dificultando a mistura vertical e a reposição de nutrientes essenciais, como nitrato e fosfato, na zona eufótica – condição que compromete a produtividade primária e, portanto, a bomba biológica (Bopp *et al.*, 2013).

Além disso, há indícios crescentes de que a acidificação oceânica, causada pelo aumento da concentração de CO₂ dissolvido, pode afetar negativamente a eficiência da exportação de carbono ao alterar a composição e a densidade da matéria orgânica particulada, bem como interferir na calcificação de organismos que contribuem para o lastreamento das partículas (por exemplo: foraminíferos e cocolítóforos).

Outro aspecto preocupante é a possibilidade de feedbacks positivos, nos quais a diminuição da eficiência das bombas de carbono amplifique ainda mais o acúmulo de CO₂ na atmosfera, retroalimentando o processo de aquecimento global.

O ciclo do carbono marinho representa um componente indispensável da regulação climática planetária, com as bombas biológica e física operando de forma integrada para sequestrar CO₂ atmosférico e armazená-lo no interior dos oceanos. No entanto, o funcionamento desses mecanismos está sendo comprometido pelas mudanças induzidas pelas atividades humanas, em especial pelo aquecimento da superfície marinha e pela acidificação dos oceanos.

A continuidade da eficácia dos oceanos como sumidouros de carbono dependerá de ações de mitigação global, incluindo a redução das emissões de gases de efeito estufa, bem como do refinamento dos modelos climáticos e biogeoquímicos capazes de prever o comportamento futuro do ciclo do carbono oceânico em diferentes cenários de mudança climática.

O investimento em redes de observação oceânica, em programas de monitoramento e em pesquisa interdisciplinar é essencial para compreender as vulnerabilidades do ciclo do carbono marinho e para informar políticas públicas eficazes em um contexto de rápida transformação ambiental.

Impacto do aquecimento dos oceanos

O aquecimento global tem promovido mudanças profundas na estrutura térmica dos oceanos. De acordo com o IPCC (2021), a temperatura média das camadas superiores do oceano (0-700 metros) aumentou significativamente nas últimas décadas, sendo esse aquecimento mais pronunciado nas latitudes altas e nos trópicos. Trata-se de um processo que desencadeia uma série de efeitos sistêmicos:

- **Alterações em ecossistemas marinhos:** ambientes como recifes de corais são altamente sensíveis ao aumento da temperatura, o que resulta em episódios recorrentes de branqueamento e mortalidade em massa. Ecosistemas bentônicos também são impactados pela redução do aporte de oxigênio e nutrientes, causada pela estratificação térmica.
- **Redistribuição de espécies marinhas:** as alterações térmicas têm provocado o deslocamento de populações marinhas em direção aos polos ou a maiores profundidades, modificando cadeias alimentares e a produtividade pesqueira. Espécies comerciais importantes estão tornando-se escassas em regiões tradicionalmente exploradas, com impactos diretos sobre comunidades pesqueiras.
- **Intensificação de eventos climáticos extremos:** o calor acumulado nas águas oceânicas serve como combustível para ciclones tropicais, que se tornam mais frequentes, intensos e duradouros. Há também maior incidência de ondas de calor marinhas, que causam mortalidade em massa de organismos e comprometem habitats inteiros.
- **Elevação do nível do mar:** o aquecimento provoca a expansão térmica da água e contribui para o derretimento das calotas polares e geleiras, elevando o nível médio dos oceanos. Tal processo representa uma ameaça direta às zonas costeiras e estuarinas, com riscos de inundação, erosão e salinização de aquíferos.

O papel dos oceanos como reguladores climáticos é indissociável da dinâmica global do clima. Sua capacidade de absorver calor e gases de efeito estufa, de intermediar o ciclo do carbono e de influenciar eventos climáticos extremos o coloca no centro das estratégias de enfrentamento das mudanças climáticas. No entanto, os limites desses serviços ecossistêmicos estão sendo testados por pressões antropogênicas crescentes, que incluem não apenas as emissões de GEE, como também a poluição marinha, a sobrepesca e a destruição de habitats.

Proteger os oceanos e suas correntes, além de ser uma questão de conservação ambiental, é uma necessidade urgente de segurança climática global. A valorização da ciência marinha, o monitoramento contínuo dos parâmetros oceanográficos e a integração das dinâmicas oceânicas nas políticas climáticas são passos fundamentais para garantir a resiliência do sistema Terra.



Interconexões entre os oceanos, correntes marítimas e a mudança climática global

Efeitos interligados entre atmosfera e mar

A Terra é um sistema integrado, no qual a atmosfera, a hidrosfera, a litosfera e a biosfera estão interligadas por uma complexa rede de processos físico-químicos e biológicos. Entre essas conexões, destaca-se a relação entre os oceanos e a atmosfera, cuja interação é fundamental para o funcionamento do clima planetário. Os oceanos atuam como reservatórios térmicos e reguladores climáticos, absorvendo aproximadamente 93% do calor adicional gerado pelo acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) desde o início da Revolução Industrial.

Essa troca constante de energia e massa entre os oceanos e a atmosfera ocorre por meio de processos como evaporação, precipitação, liberação e ab-



sorção de CO₂ e transporte de calor pelas correntes oceânicas. Por exemplo, correntes quentes, como a Corrente do Golfo, aquecem regiões da Europa Ocidental, enquanto correntes frias, como a Corrente de Humboldt, regulam os climas áridos da costa oeste da América do Sul. Alterações nesses fluxos podem provocar eventos climáticos extremos e mudanças de longo prazo nos padrões de temperatura e precipitação em escala global e regional.

Além disso, os oceanos modulam o ciclo hidrológico, influenciando a umidade atmosférica, a formação de nuvens e os regimes de chuva. Interrupções nesse equilíbrio, como observadas em fenômenos como El Niño e La Niña, podem desencadear secas severas, inundações catastróficas, incêndios florestais e colapsos agrícolas, evidenciando o grau de interdependência entre os sistemas terrestre e marinho.

Cenários futuramente possíveis: projeções e modelagem climática

Modelagens climáticas de última geração, como aquelas utilizadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), preveem que a continuidade das atuais tendências de emissão de GEE poderá provocar transformações sistêmicas nas correntes oceânicas, incluindo a possível desaceleração da Circulação Meridional do Atlântico (AMOC). Esse cenário está associado a um resfriamento anômalo no Atlântico Norte, acompanhado por intensificação das secas na Amazônia e no Sahel africano, elevação do nível do mar na costa leste dos Estados Unidos e alterações na intensidade e trajetória dos furacões.

As elevações do nível médio do mar, por sua vez, ameaçam diretamente cidades litorâneas e ecossistemas costeiros em todo o mundo, como manguezais, estuários e recifes de corais. Em termos agrícolas, mudanças nos padrões de precipitação e temperatura poderão deslocar zonas de cultivo, reduzir rendimentos e aumentar a insegurança alimentar, especialmente em países tropicais e subtropicais. Esses cenários futuros destacam a urgência de integrar as dimensões oceânicas nas políticas climáticas, tanto em nível local quanto internacional.

”

Proteger os oceanos
e as suas correntes,
além de ser uma questão
de conservação ambiental,
é uma necessidade
urgente de segurança
ambiental global.



CAPÍTULO 5

Impactos das mudanças climáticas





Efeitos ambientais

Aumento da temperatura global e mudanças regionais

A temperatura média global da superfície terrestre aumentou aproximadamente 1,1°C desde o fim do século XIX, e os cenários projetados indicam aumentos que podem ultrapassar 3°C até o fim do século XXI, a depender do volume de emissões. Esse aquecimento tem implicado em transformações significativas nos padrões climáticos regionais, alterando estações chuvosas, padrões de vento e distribuição de massas de ar. Tais mudanças afetam desde os regimes monçônicos asiáticos até as correntes de jato polares, com consequências sobre a produção agrícola, os sistemas hídricos e os ecossistemas terrestres.

Derretimento das calotas polares e aumento do nível do mar

O derretimento acelerado das geleiras montanhosas, da calota da Groenlândia e da Antártida Ocidental está elevando o nível médio do mar a uma taxa de aproximadamente 3,7 mm por ano, de acordo com o IPCC (2021). Esse processo ameaça infraestruturas costeiras, aquíferos subterrâneos, áreas agrícolas e populações vulneráveis que habitam zonas litorâneas baixas, como Bangladesh, ilhas do Pacífico e deltas na Ásia e na África.

Fenômenos climáticos extremos

A intensificação de eventos climáticos extremos é uma das expressões mais tangíveis das mudanças climáticas. A frequência e a severidade de furacões, secas prolongadas, ondas de calor e inundações aumentaram substancialmente nas últimas décadas. Essas ocorrências resultam em perdas humanas, econômicas e ecológicas, com destaque para incêndios florestais recordes na Austrália, América do Norte e sul da Europa, e eventos de calor extremo em regiões historicamente temperadas, como o Canadá e o norte da Sibéria.

Impactos na biodiversidade

A elevação das temperaturas, a acidificação dos oceanos e as alterações nos regimes de precipitação afetam a distribuição geográfica, o comportamento e o ciclo de vida de espécies vegetais e animais. Muitas espécies estão migrando para latitudes mais altas ou para altitudes superiores, o que pode resultar em extinções locais e colapsos ecológicos. Ecossistemas como recifes de corais, tundras árticas e florestas tropicais estão entre os mais vulneráveis, colocando em risco serviços ecossistêmicos essenciais, como polinização, sequestro de carbono e regulação hídrica.

Efeitos sociais e econômicos

Agricultura, segurança alimentar e recursos hídricos

A produtividade agrícola está sendo afetada negativamente em muitas regiões devido a eventos climáticos extremos, mudanças nos períodos de cultivo e escassez de recursos hídricos. Cultivos básicos como trigo, arroz e milho já mostram sinais de estresse climático em zonas tropicais. O risco de inseguran-

ça alimentar intensifica-se em países em desenvolvimento, onde a agricultura é altamente dependente de padrões climáticos estáveis e tecnologias adaptativas são escassas.

Os recursos hídricos, por sua vez, estão sujeitos à redução da disponibilidade, contaminação e competição crescente entre setores (agricultura, indústria e consumo humano), em função de alterações no ciclo hidrológico e da redução de geleiras e fontes de água perenes.

Consequências para a saúde humana

As mudanças climáticas afetam a saúde de diversas formas: por meio do aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares associadas a ondas de calor e poluição atmosférica, da intensificação de doenças infecciosas e zoonóticas, em virtude de alterações na distribuição de vetores, e do impacto sobre a saúde mental em comunidades expostas a desastres recorrentes. A Organização Mundial da Saúde estima que, entre 2030 e 2050, mais de 250 mil mortes adicionais por ano poderão ocorrer devido a causas relacionadas ao clima, especialmente em populações vulneráveis.

Refugiados climáticos

O deslocamento de populações causado por eventos extremos ou pela degradação ambiental gradual (como salinização de solos, desertificação e elevação do nível do mar) está se tornando uma realidade em diversas partes do mundo. Termos como “refugiados climáticos” ou “deslocados ambientais” têm sido utilizados para descrever esses grupos, que enfrentam insegurança habitacional, perda de meios de subsistência e exclusão social. A falta de ar-
cabouço jurídico internacional específico agrava o problema, deixando milhões em situação de vulnerabilidade.



Custos econômicos e desigualdades exacerbadas

As perdas econômicas associadas às mudanças climáticas são significativas e tendem a aumentar exponencialmente. Estimativas do Banco Mundial e da ONU indicam que, até 2050, os custos diretos e indiretos poderão superar trilhões de dólares anuais, afetando especialmente os países de baixa renda. A desigualdade é agravada, pois as populações menos responsáveis pelas emissões históricas são as mais afetadas pelos impactos climáticos. O conceito de justiça climática torna-se, assim, central para o debate internacional sobre mitigação e adaptação.

Os oceanos e as correntes marítimas estão no cerne do sistema climático da Terra, e sua integridade funcional é condição *sine qua non* para a estabilidade ambiental e a sobrevivência humana em escala planetária (figura 35). A mudança climática global, impulsionada majoritariamente por atividades antrópicas, está afetando de maneira profunda e interconectada a dinâmica do oceano-atmosfera, os padrões climáticos regionais, a biodiversidade e os meios de subsistência de bilhões de pessoas.

Enfrentar tais desafios requer uma abordagem multiescalar, interdisciplinar e baseada em evidências científicas, com forte articulação entre ciência, políticas públicas e justiça social. A próxima década será decisiva para definir os rumos do planeta frente à emergência climática.

”

A próxima década será decisiva para definir os rumos do planeta frente à emergência climática.

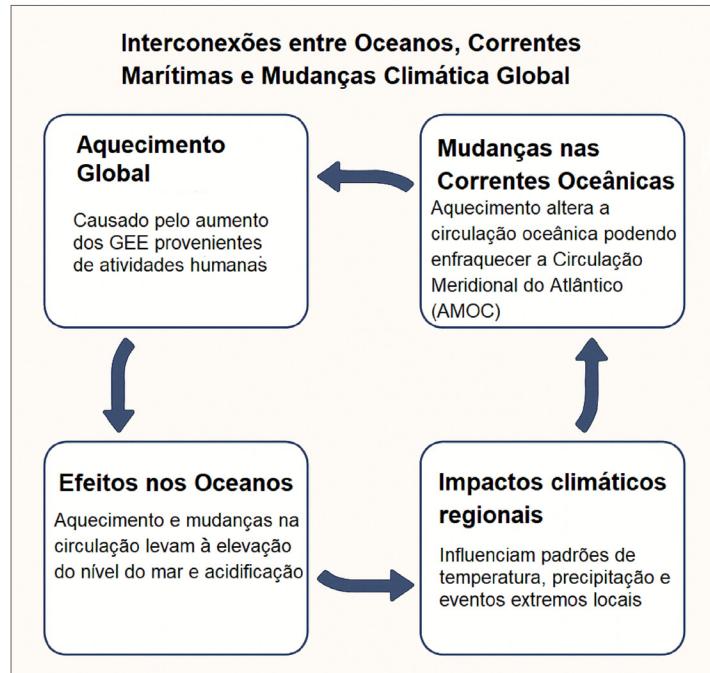


Figura 35. Mostra o ciclo causal, as inter-relações dinâmicas e retroalimentadas entre o aquecimento global, os oceanos e os impactos climáticos regionais, destacando o papel crucial das correntes oceânicas no sistema climático planetário.



Quadro 7. Cadeia de interações representada na figura 35.

AQUECIMENTO GLOBAL	Causa: o aumento das concentrações de gases de efeito estufa, oriundos principalmente de atividades humanas (queima de combustíveis fósseis, desmatamento, agropecuária intensiva), aquece a atmosfera terrestre. Efeito inicial: este aquecimento é o ponto de partida do ciclo descrito.
EFEITOS NOS OCEANOS	O aquecimento atmosférico afeta diretamente os oceanos, levando à: <ul style="list-style-type: none"> ■ Elevação do nível do mar, devido à fusão de geleiras e expansão térmica da água; ■ Acidificação dos oceanos pela absorção de CO₂ atmosférico.
IMPACTOS CLIMÁTICOS REGIONAIS	Essas mudanças oceânicas impactam: <ul style="list-style-type: none"> ■ Padrões de temperatura e precipitação em diversas regiões; ■ Ocorrência de eventos extremos, como secas severas, enchentes, ondas de calor e ciclones mais intensos.
MUDANÇAS NAS CORRENTES OCEÂNICAS	O aquecimento dos oceanos interfere na circulação termohalina (baseada em temperatura e salinidade), podendo enfraquecer sistemas críticos, como a Circulação Meridional do Atlântico (AMOC). Um enfraquecimento da AMOC pode reduzir o transporte de calor para o Hemisfério Norte, alterando drasticamente os climas regionais.
RETROALIMENTAÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL	As alterações nas correntes oceânicas modificam a redistribuição de energia no planeta, podendo amplificar o aquecimento global, realimentando o ciclo.

Implicações científicas e políticas

- Esta figura mostra que a mudança climática é um fenômeno sistêmico, com interdependência entre atmosfera, oceanos e regiões continentais.
- Intervenções em apenas um elo (por exemplo, cortar emissões de CO₂) precisam ser acompanhadas de monitoramento oceanográfico e modelagem integrada.
- O enfraquecimento da AMOC, por exemplo, é um “ponto de inflexão” (*tipping point*) estudado com grande preocupação por climatologistas, dado seu potencial disruptivo.



Figura 36. A figura apresenta, de forma encadeada e didática, os principais fatores relacionados à mudança climática global, evidenciando suas causas, processos e consequências. O fluxo começa com as interações entre os oceanos e a atmosfera, destacando que os oceanos desempenham papel central na regulação do clima ao absorver calor e controlar o ciclo hidrológico. Esse desequilíbrio térmico, associado à emissão de gases de efeito estufa por atividades humanas, leva ao aquecimento global, que, por sua vez, desencadeia uma série de impactos ambientais, como o derretimento de calotas polares, a elevação do nível do mar e o aumento da frequência de eventos climáticos extremos. Esses impactos culminam em efeitos sociais e econômicos profundos, incluindo a insegurança alimentar e hídrica, bem como a perda da biodiversidade. A figura ressalta, portanto, a interdependência entre os sistemas naturais e humanos diante da crise climática e a urgência de ações integradas para sua mitigação e adaptação.





CAPÍTULO 6

Mudanças climáticas e seus efeitos na saúde pública



Impactos diretos das mudanças climáticas na saúde humana

Ondas de calor e doenças relacionadas ao calor

Uma das consequências mais preocupantes desse fenômeno é o aumento da frequência, duração e intensidade das ondas de calor, eventos extremos caracterizados por períodos prolongados de temperatura acima da média histórica. Essas ondas têm impactos diretos sobre a saúde humana, especialmente em regiões urbanas densamente povoadas, onde o fenômeno das “ilhas de calor” potencializa os efeitos adversos do clima extremo (Loughnan *et al.*, 2015).

Doenças relacionadas ao calor são um dos principais problemas de saúde pública emergentes nesse contexto. Entre elas, destacam-se a insolação (ou hipertermia), a exaustão pelo calor, a desidratação e a exacerbção de doenças cardiovasculares e respiratórias pré-existentes (Basu; Samet, 2002; Hajat *et al.*, 2010). A mortalidade por causas cardiovasculares tende a aumentar significativamente durante ondas de calor, especialmente entre indivíduos com pressão arterial elevada, insuficiência cardíaca congestiva e outras comorbidades.

A suscetibilidade aos efeitos do calor é amplificada em grupos vulneráveis

da população, como idosos, crianças, pessoas com doenças crônicas e trabalhadores expostos ao ambiente externo, como agricultores, operários da construção civil e catadores de materiais recicláveis (Kovats; Hajat, 2008). Tais populações, muitas vezes residentes em áreas urbanas periféricas com baixa arborização e infraestrutura precária, sofrem com a falta de acesso a sistemas de ventilação, hidratação adequada e cuidados médicos oportunos, o que agrava a carga de morbimortalidade associada a eventos de calor extremo.

Do ponto de vista da gestão da saúde pública, a mitigação dos efeitos das ondas de calor requer um conjunto de estratégias adaptativas. Uma das mais eficazes é a implementação de sistemas de alerta precoce, que combinam previsões meteorológicas com indicadores de saúde pública para antecipar surtos de doenças e direcionar ações preventivas (McGregor *et al.*, 2015). Cidades como Paris e Toronto já estabeleceram protocolos que incluem campanhas de conscientização, monitoramento de idosos solitários, ampliação do funcionamento de centros de atendimento e disponibilização de locais públicos climatizados durante ondas de calor.

Além disso, políticas de adaptação urbana são fundamentais para reduzir a exposição ao calor extremo. Medidas como o aumento de áreas verdes, uso de materiais de construção com alta refletividade solar, promoção de telhados verdes e redução da densidade populacional em áreas críticas têm mostrado resultados positivos na mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbanas (Oke, 1982; Stone *et al.*, 2010).

Por fim, é crucial reconhecer que os impactos das mudanças climáticas na saúde humana não são uniformemente distribuídos e refletem desigualdades socioeconômicas e ambientais preexistentes. Portanto, qualquer estratégia de adaptação deve considerar a justiça climática como princípio orientador, garantindo que os grupos mais vulneráveis recebam apoio prioritário e participem dos processos decisórios.

Eventos climáticos extremos e seus efeitos agudos na saúde

As mudanças climáticas têm provocado uma intensificação de eventos climáticos extremos, como enchentes, secas severas, furacões, deslizamentos de terra e incêndios florestais. Esses eventos, além de causarem destruição física e perdas econômicas substanciais, geram impactos diretos e imediatos sobre a saúde das populações expostas. Tais impactos incluem desde traumas físicos até o agravamento de doenças infecciosas e distúrbios de saúde mental, configurando um desafio multifacetado para os sistemas de saúde pública (Watts *et al.*, 2023).

Inundações são eventos cada vez mais frequentes, especialmente em áreas tropicais e subtropicais sujeitas ao aumento do nível do mar e à intensificação das chuvas. Seus efeitos na saúde humana são múltiplos: afogamentos, traumas, surtos de doenças transmitidas pela água contaminada (como leptospirose, cólera e hepatite A), além do comprometimento da infraestrutura sanitária e hospitalar (Few *et al.*, 2004; Alderman *et al.*, 2012). A contaminação de fontes de água potável com esgoto, metais pesados e pesticidas durante enchentes também agrava o risco de doenças gastrointestinais e intoxicações agudas.

Secas prolongadas, por sua vez, têm impactos sanitários menos imediatos, porém cumulativos e significativos. A escassez de água afeta a higiene pessoal e coletiva, favorecendo a propagação de doenças infecciosas. A redução da produção agrícola, além de afetar a segurança alimentar, compromete o estado nutricional das populações mais pobres, especialmente em crianças e gestantes, aumentando a prevalência de desnutrição e doenças associadas, como anemia e déficit de crescimento (Stanke *et al.*, 2013). Em regiões semiáridas, como o semiárido brasileiro e partes do Sahel africano, há correlações diretas entre eventos de seca e surtos de doenças respiratórias, dermatológicas e diarreicas.

Incêndios florestais, agravados por secas, má gestão ambiental e aumento da temperatura, são fontes significativas de poluentes atmosféricos, como

material particulado (MP) (Few *et al.*, 2004, Stanke *et al.*, 2013), monóxido de carbono (CO), ozônio troposférico (O_3) e compostos orgânicos voláteis. A exposição prolongada à fumaça desses incêndios está associada ao aumento de internações hospitalares por doenças respiratórias (asma, bronquite, DPOC) e cardiovasculares, especialmente entre idosos, gestantes e crianças (Reid *et al.*, 2016). Além disso, os incêndios afetam os serviços de saúde locais, tanto pela sobrecarga da demanda quanto pela interrupção de serviços básicos.

Furacões e ciclones tropicais, mais intensos devido ao aquecimento dos oceanos, trazem consigo uma combinação de riscos: ventos destrutivos, alagamentos, escassez de água potável, desabrigamento, proliferação de vetores e interrupção de cadeias de fornecimento médico. Além dos danos físicos, eventos como o furacão Katrina (2005) evidenciaram os impactos psicológicos duradouros sobre as populações expostas, incluindo transtorno de estresse pós-traumático (TEPT), ansiedade e depressão (Lowe *et al.*, 2013).

Os efeitos de **deslizamentos de terra**, geralmente induzidos por chuvas intensas em regiões montanhosas, são particularmente graves em contextos de ocupação irregular e ausência de planejamento urbano. Essas ocorrências são frequentemente fatais e dificultam o acesso a serviços de emergência, além de resultarem em deslocamentos populacionais e agravos à saúde mental.

A vulnerabilidade da população frente a esses eventos está profundamente ligada a fatores sociais, como pobreza, habitação precária, baixa escolaridade e exclusão territorial. Assim, os efeitos diretos das mudanças climáticas sobre a saúde são, também, uma questão de equidade e justiça socioambiental.

Medidas de prevenção e resposta devem, portanto, integrar sistemas de monitoramento climático, planejamento urbano resiliente, educação comunitária, infraestrutura de saúde adaptativa e protocolos de emergência interestoriais. O fortalecimento da atenção primária à saúde com enfoque territorial e o desenvolvimento de planos de contingência baseados em dados locais são

componentes essenciais de uma abordagem adaptativa frente ao aumento da frequência de eventos extremos (WHO, 2021).

Doenças transmitidas por vetores e a expansão de zonas endêmicas

Doenças transmitidas por vetores, como a dengue, a malária, o zika vírus, a febre chikungunya e a leishmaniose, estão entre os agravos mais sensíveis às variações climáticas. Isso deve-se ao fato de que os vetores – principalmente mosquitos, carrapatos e flebotomíneos – têm sua sobrevivência, reprodução e comportamento de picada diretamente influenciados por fatores ambientais, como temperatura, umidade e padrões de precipitação (Patz *et al.*, 2005; IPCC, 2022).

O aquecimento global tem expandido a distribuição geográfica de vetores importantes, como o *Aedes aegypti* e o *Anopheles spp.*, para altitudes e latitudes onde antes sua presença era rara ou inexistente. Um exemplo notório é a disseminação da dengue para regiões subtropicais e mesmo temperadas, como partes do sul dos Estados Unidos, sul da Europa e regiões mais elevadas da América do Sul e da África (Messina *et al.*, 2019). Isso decorre do encurtamento do ciclo de vida do mosquito e do aumento na taxa de replicação viral em temperaturas mais elevadas, o que acelera a transmissão da doença.

A **malária**, tradicionalmente endêmica em zonas tropicais, tem apresentando potencial de reemergência em áreas onde havia sido eliminada. Mudanças nos padrões de precipitação e aumento da temperatura podem criar habitats temporários para criadouros do *Anopheles spp.*, especialmente em regiões de fronteira ecológica. A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2023) alerta que mesmo pequenas alterações na sazonalidade climática podem aumentar substancialmente o risco de surtos em populações não imunizadas.

Além disso, há um risco crescente associado a **doenças emergentes**, como o vírus do Nilo Ocidental e o vírus da febre do Vale do Rift, cujos vetores e reservatórios estão sendo afetados por alterações na temperatura e nos ciclos hi-

drológicos. Tais doenças, antes restritas a determinadas regiões da África e do Oriente Médio, vêm sendo detectadas em áreas cada vez mais amplas da Europa e das Américas (Mordecai *et al.*, 2017).

No Brasil, o impacto das mudanças climáticas na epidemiologia da **dengue**, **zika** e **chikungunya** tem sido objeto de diversas análises. Estudos recentes demonstram que a elevação de temperaturas médias, aliada à intensificação de períodos chuvosos seguidos por estiagens, cria um ambiente ideal para a proliferação do *Aedes aegypti*. Essa dinâmica é agravada por fatores urbanos, como acúmulo de resíduos, falta de saneamento básico e crescimento desordenado das cidades (Tauil, 2001; Confalonieri *et al.*, 2009).

Outro ponto de preocupação é a **leishmaniose**, cuja transmissão tem se deslocado de áreas rurais para zonas urbanas e periurbanas, impulsionada tanto por mudanças ambientais como por modificações no uso do solo, desmatamento e aumento das temperaturas médias. A destruição de ecossistemas naturais favorece o contato entre vetores, hospedeiros silvestres e humanos, criando novas interfaces zoonóticas (Valero; Uriarte, 2020).

As estratégias de enfrentamento das doenças vetoriais no contexto das mudanças climáticas exigem uma abordagem integrada e intersetorial. Entre as principais ações recomendadas, destacam-se:

- **Monitoramento climático e epidemiológico integrado**, com uso de ferramentas de modelagem e sensoriamento remoto para prever surtos com base em condições ambientais;
- **Educação e mobilização comunitária**, voltadas para o controle de criadouros e a conscientização sobre os efeitos do clima na saúde;
- **Fortalecimento da vigilância em saúde e dos serviços de atenção primária**, com capacitação contínua de agentes comunitários e equipes multi-profissionais;

- **Investimentos em pesquisa aplicada**, especialmente em vacinas, novos inseticidas e tecnologias de controle biológico;
- **Planejamento urbano sustentável**, com foco na infraestrutura sanitária, controle de resíduos e acesso à água potável.

A perspectiva futura indica que, na ausência de ações coordenadas, haverá um aumento do número de pessoas expostas a vetores perigosos, especialmente nos países em desenvolvimento. Portanto, é imperativo que políticas de adaptação climática incluam a saúde pública como eixo central, considerando os determinantes sociais e ambientais das doenças vetoriais em suas múltiplas dimensões.

Poluição atmosférica, mudanças climáticas e seus efeitos na saúde respiratória e cardiovascular

Doenças respiratórias e cardiovasculares associadas à poluição do ar

A interseção entre mudanças climáticas e poluição atmosférica representa uma das mais significativas ameaças à saúde humana no século XXI. Os mesmos processos que impulsionam o aquecimento global — em especial a queima de combustíveis fósseis — são também os principais responsáveis pela emissão de poluentes atmosféricos prejudiciais à saúde, como o material particulado fino (MP), o dióxido de nitrogênio (NO_2), o dióxido de enxofre (SO_2), o ozônio troposférico (O_3) e compostos orgânicos voláteis (COVs) (Lelieveld *et al.*, 2019).

As mudanças climáticas influenciam diretamente a qualidade do ar por meio da intensificação de fenômenos como secas, queimadas naturais e antropogênicas, além da elevação da temperatura média global. Tais fatores promovem a

emissão e a concentração de poluentes atmosféricos como o ozônio troposférico (O_3), material particulado fino (MPF), dióxido de nitrogênio (NO_2) e compostos orgânicos voláteis. O ozônio, em especial, é formado por reações fotoquímicas entre precursores (NO_x e VOCs) sob condições de forte radiação solar, tornando-se mais prevalente em climas quentes e secos, comuns em contextos de aquecimento global (Jacob; Winner, 2009). O MPF, por sua vez, resulta da queima de biomassa de combustíveis fósseis e representa um dos poluentes mais nocivos à saúde humana devido à sua capacidade de penetrar profundamente nos alvéolos pulmonares e atingir a corrente sanguínea (Pope *et al.*, 2009). Os incêndios florestais, cuja frequência tem aumentado em função de períodos de seca prolongados, liberam grandes volumes desses contaminantes e têm sido responsáveis por episódios de emergência em saúde ambiental em várias partes do mundo, como Austrália, Califórnia e Amazônia brasileira. Tais alterações na qualidade do ar devem ser compreendidas como um elo crítico entre mudanças climáticas e os agravos à saúde pública.

A exposição contínua ou aguda a poluentes atmosféricos está fortemente associada a doenças respiratórias e cardiovasculares, representando uma das mais relevantes consequências indiretas das mudanças climáticas. O material particulado fino, por exemplo, induz processos inflamatórios e oxidativos no epitélio pulmonar, favorecendo o desenvolvimento e agravamento de doenças como asma, bronquite crônica e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), além de aumentar a incidência de infecções respiratórias (Cohen *et al.*, 2017). Paralelamente, a exposição a poluentes como NO_2 e ozônio tem sido correlacionada a eventos cardiovasculares agudos, incluindo infarto do miocárdio, arritmias e acidentes vasculares cerebrais, por meio de mecanismos como disfunção endotelial, hipertensão e aumento da viscosidade sanguínea (Brook *et al.*, 2010). Estimativas da Organização Mundial da Saúde indicam que a poluição do ar está associada a mais de 7 milhões de mortes prematuras por ano,

sendo responsável por mais de 20% das mortes cardiovasculares globais (WHO, 2021). Com o agravamento das mudanças climáticas, espera-se um aumento considerável desses agravos, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas e em países em desenvolvimento, onde políticas de controle ambiental são frequentemente frágeis ou inexistentes.

A poluição do ar atua de maneira sinérgica com as mudanças climáticas. O aumento das temperaturas médias intensifica a formação do ozônio ao nível do solo — um potente irritante pulmonar — e prolonga os episódios de estagnação atmosférica, que impedem a dispersão de poluentes, particularmente em grandes centros urbanos. Além disso, eventos extremos como incêndios florestais, cada vez mais frequentes e intensos, liberam enormes quantidades de fumaça e fuligem na atmosfera, elevando drasticamente os níveis de PM em escala regional e até continentais (Xu *et al.*, 2020).

Do ponto de vista fisiopatológico, a exposição crônica a poluentes atmosféricos tem sido associada a uma série de efeitos adversos sobre o sistema respiratório, incluindo o aumento da incidência e da gravidade de doenças como asma, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), bronquite e infecções respiratórias agudas, sobretudo em crianças e idosos (Giles *et al.*, 2011). A literatura também evidencia um elo robusto entre poluição do ar e doenças cardiovasculares, como infarto agudo do miocárdio, arritmias, acidente vascular cerebral (AVC) e hipertensão arterial (Brook *et al.*, 2010).

Estudos epidemiológicos têm demonstrado que não há um limiar seguro para exposição a partículas finas — ou seja, mesmo concentrações abaixo dos limites estabelecidos por muitas legislações ambientais podem provocar agravos à saúde (Pope *et al.*, 2009). A exposição aguda a PM, por exemplo, está associada a aumentos quase imediatos em internações hospitalares e óbitos por causas cardiovasculares e respiratórias, enquanto a exposição crônica contribui significativamente para o aumento da mortalidade por todas as causas, espe-

cialmente em populações vulneráveis (Stanaway *et al.*, 2018).

Os efeitos adversos da poluição atmosférica, intensificada pelas mudanças climáticas, não ocorrem de forma homogênea na população. Crianças, idosos, pessoas com doenças crônicas preexistentes (como doenças respiratórias e cardiovasculares) e populações expostas a condições precárias de moradia representam os grupos mais vulneráveis aos efeitos nocivos da má qualidade do ar (Trasande *et al.*, 2006). Crianças, por exemplo, possuem sistema respiratório ainda em desenvolvimento, respiração mais rápida e maior tempo de exposição ao ar livre, o que as torna mais suscetíveis à asma e a infecções respiratórias. Já os idosos tendem a apresentar múltiplas comorbidades e menor capacidade fisiológica de adaptação ao estresse ambiental, elevando o risco de complicações cardiovasculares. A vulnerabilidade é ainda acentuada em regiões urbanas periféricas, onde a densidade populacional é alta e o acesso a serviços de saúde e saneamento básico é limitado. Nesses contextos, as mudanças climáticas funcionam como um “multiplicador de ameaças”, agravando desigualdades socioambientais já existentes e ampliando os riscos sanitários (Watts *et al.*, 2021). Políticas públicas que promovam justiça ambiental, transição energética e monitoramento ambiental contínuo são essenciais para mitigar tais impactos.

No Brasil, estudos têm evidenciado a correlação entre os picos de poluição do ar em metrópoles, como São Paulo, Belo Horizonte e Porto Alegre, com o aumento das internações por doenças respiratórias, especialmente durante os períodos mais quentes e secos do ano. Esse cenário é agravado pelas desigualdades sociais, que tornam moradores de regiões periféricas — frequentemente mais expostos e com menor acesso aos serviços de saúde — especialmente vulneráveis aos efeitos da poluição (Silva *et al.*, 2013).

Adicionalmente, deve-se considerar os impactos respiratórios e cardiovasculares dos poluentes emitidos por queimadas rurais na Amazônia, no Cerrado e no Pantanal. Durante os meses de seca é comum observar o aumento de casos

de doenças respiratórias, inclusive entre populações indígenas e ribeirinhas. A poluição gerada nessas áreas pode ser transportada por centenas ou milhares de quilômetros, afetando centros urbanos distantes e criando um problema de saúde pública de dimensão nacional (Brook *et al.*, 2011).

Diante desse quadro, algumas estratégias de mitigação e adaptação são indispensáveis (figura 37):

- **Substituição progressiva dos combustíveis fósseis por fontes de energia renovável, como solar e eólica;**
- **Melhoria do transporte público e incentivo à mobilidade ativa** (como caminhar e pedalar) para reduzir as emissões veiculares;
- **Regulação rigorosa de emissões industriais e agrícolas**, com fortalecimento das agências ambientais e dos sistemas de monitoramento da qualidade do ar;
- **Integração das informações ambientais com os sistemas de saúde**, permitindo ações antecipadas durante episódios críticos;
- **Promoção de zonas urbanas verdes e corredores ecológicos**, que reduzem ilhas de calor e promovem a dispersão de poluentes;
- **Educação ambiental e campanhas de saúde pública** voltadas para populações em risco e profissionais de saúde.

Como afirmado pela Organização Mundial da Saúde, os benefícios à saúde de políticas climáticas ambiciosas são imediatos, mensuráveis e significativos, particularmente no que diz respeito à qualidade do ar. Portanto, a proteção da saúde respiratória e cardiovascular deve ser um dos principais argumentos a favor de uma transição energética justa e acelerada (WHO, 2021).

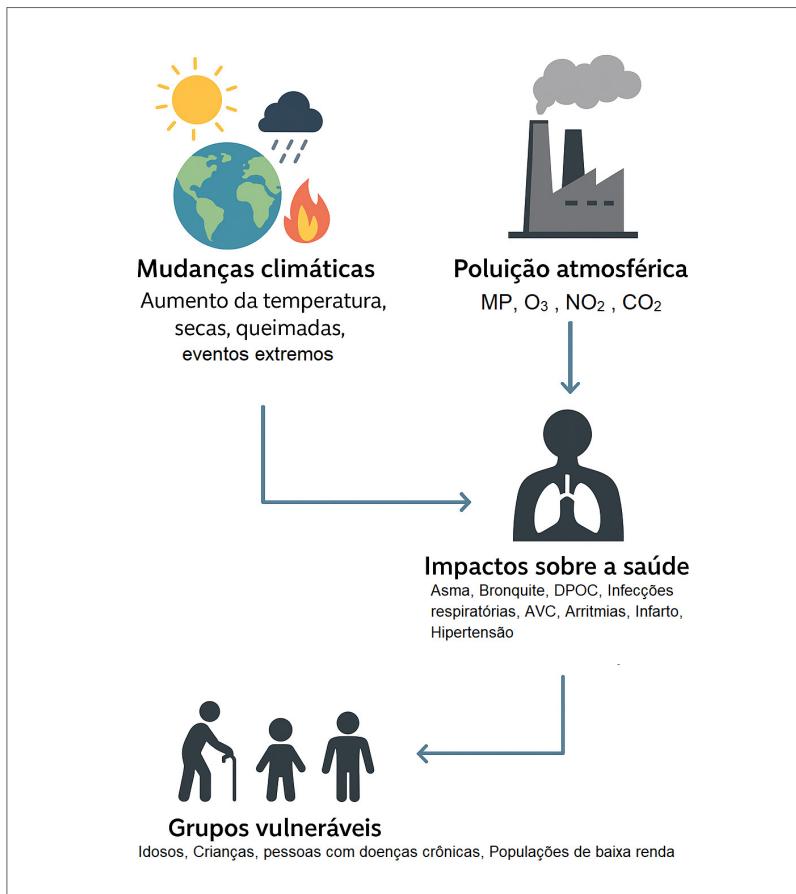


Figura 37. A figura apresenta uma relação sistêmica entre as mudanças climáticas, a poluição atmosférica e os impactos sobre a saúde humana, destacando os efeitos mais graves para grupos sociais vulneráveis. O diagrama inicia com as mudanças climáticas, provocadas principalmente pelo aumento da temperatura global, ocorrência de secas, queimadas e a queima de combustíveis fósseis. Esses fatores intensificam a liberação de poluentes atmosféricos, como material particulado fino (PM), ozônio troposférico (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2) e compostos orgânicos voláteis — todos altamente tóxicos e prejudiciais ao sistema respiratório e cardiovascular. Esses poluentes, por sua vez, contribuem para o aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares, como asma, bronquite, DPOC (doença pulmonar obstrutiva crônica), infecções respiratórias, acidente vascular cerebral (AVC), arritmias, infarto e hipertensão. A exposição contínua a esses fatores compromete severamente a saúde pública. Por fim, o impacto dessas doenças e da exposição à poluição é mais acentuado em grupos vulneráveis, como idosos, crianças, pessoas com doenças crônicas e populações de baixa renda — que geralmente vivem em áreas mais poluídas e têm menor acesso a serviços de saúde. A figura evidencia, portanto, como o aquecimento global e a degradação ambiental intensificam desigualdades sociais e sanitárias, sendo necessária uma abordagem integrada de políticas públicas de saúde, meio ambiente e justiça social.

Mudanças climáticas, saúde mental e bem-estar psicológico: ecoansiedade, trauma climático e ecoluto

A relação entre mudanças climáticas e saúde mental tem sido tradicionalmente negligenciada nas análises epidemiológicas, que tendem a priorizar os efeitos físicos mais imediatos. No entanto, há um número crescente de evidências científicas que demonstram que o aquecimento global e seus eventos associados — como desastres ambientais, degradação dos ecossistemas, segurança alimentar, deslocamentos forçados e perda de modos de vida — constituem fatores de risco significativos para o bem-estar psicológico de indivíduos e comunidades (Berry *et al.*, 2010; Clayton *et al.*, 2017).

As consequências psicológicas das mudanças climáticas podem ser tanto diretas quanto indiretas. Entre os impactos diretos, destacam-se os transtornos de estresse pós-traumático (TEPT), ansiedade aguda, depressão e distúrbios do sono observados após eventos extremos, como enchentes, secas prolongadas, ciclones e incêndios florestais. Em populações vulneráveis — como crianças, idosos, povos indígenas e comunidades que dependem diretamente de recursos naturais —, tais eventos podem levar à desorganização social e emocional profunda, resultando em traumas psicológicos duradouros (Doherty; Clayton, 2011).

Um exemplo emblemático são os incêndios florestais de larga escala ocorridos na Austrália, Califórnia e Amazônia, que não apenas destruíram lares e ecossistemas, como também desencadearam níveis elevados de estresse e ansiedade populacional. As perdas materiais, o deslocamento forçado e o luto ecológico pela destruição da natureza têm impactos psíquicos de longo prazo, muitas vezes invisíveis às estatísticas tradicionais de saúde (Cunsolo; Ellis, 2018).

Entre os efeitos indiretos, destaca-se a ecoansiedade, definida como a sensação crônica de preocupação, impotência e desespero frente à degradação ambiental global. Embora não seja, até o momento, classificada como um transtorno mental clínico, a ecoansiedade é amplamente reconhecida por psicólogos

como um fenômeno real e crescente, especialmente entre os jovens e os cientistas ambientais (Clayton, 2020). Essa ansiedade pode manifestar-se por meio de sintomas como insônia, irritabilidade, ruminação constante sobre o futuro climático e até paralisia decisional.

Outro conceito emergente é o ecoluto (*ecological grief*), que descreve o sentimento de tristeza, desolação e perda associado à extinção de espécies, à destruição de paisagens significativas e ao colapso de modos de vida enraizados em ecossistemas específicos. Esse tipo de sofrimento é particularmente relevante para comunidades indígenas, pescadores artesanais, ribeirinhos e agricultores familiares, cujas identidades estão profundamente ligadas ao ambiente natural (Albrecht, 2011; Cunsolo; Landman, 2017).

A intensificação de eventos climáticos extremos, somada à incerteza quanto ao futuro ambiental do planeta, também tem estimulado um aumento dos transtornos de adaptação e de sentimentos de desesperança existencial, especialmente em populações urbanas expostas a informações constantes sobre catástrofes climáticas. O excesso de dados negativos, sem estratégias coletivas de enfrentamento, pode levar à apatia ou à negação como mecanismos psíquicos de defesa.

Diante desse cenário, é necessário incorporar a saúde mental como um eixo transversal nas políticas de adaptação às mudanças climáticas. Algumas estratégias recomendadas pela literatura incluem:

- Promoção de resiliência comunitária, por meio da construção de redes de apoio social, solidariedade intergeracional e fortalecimento do senso de pertencimento;
- Capacitação de profissionais da saúde mental para que reconheçam os impactos psíquicos das mudanças ambientais e ofereçam suporte adequado em contextos de desastres;
- Criação de espaços de escuta e expressão emocional, especialmente em escolas, universidades e centros comunitários;

- Integração da saúde mental em planos de emergência climática, garantindo suporte psicossocial em momentos de crise ambiental;
- Valorização dos saberes tradicionais e das práticas de cuidado locais, como forma de reconstrução de vínculos com o território e promoção do bem viver.

Por fim, é essencial compreender que os impactos emocionais das mudanças climáticas não são distribuídos de maneira equitativa. Populações já vulnerabilizadas por determinantes sociais da saúde — como pobreza, racismo ambiental e desigualdade territorial — estão mais propensas a vivenciar traumas psicológicos intensos e persistentes. Assim, qualquer resposta efetiva à crise climática deve considerar o cuidado psíquico como parte integrante da justiça climática (figura 38).



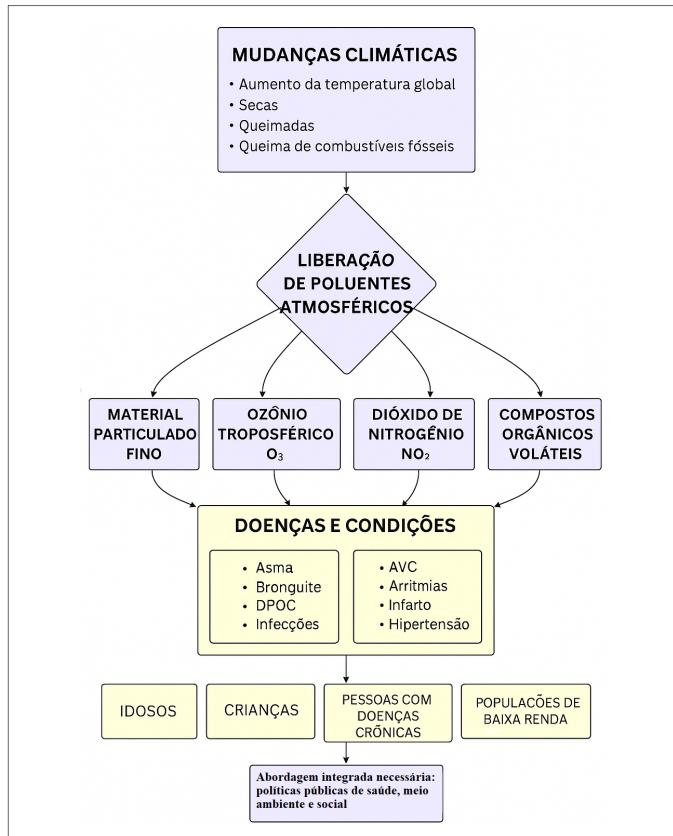


Figura 38. Apresenta um modelo conceitual sobre os efeitos psicossociais das mudanças climáticas globais, evidenciando como os eventos ambientais extremos impactam diretamente a saúde mental, especialmente entre populações vulneráveis. A estrutura inicia-se com os fenômenos associados à crise climática — como aquecimento global, degradação ambiental e elevação do nível do mar —, que atuam como gatilhos de estressores psicossociais, tais como desastres ambientais, deslocamentos forçados, perda de ecossistemas e insegurança alimentar. Esses estressores geram impactos psicológicos diretos, incluindo transtorno de estresse pós-traumático (TEPT), ansiedade, depressão e distúrbios do sono, além de impactos psicológicos indiretos, como a ecoansiedade, o ecoluto (luto ecológico pela perda ambiental) e uma sensação de desesperança existencial diante das crises ambientais. A figura também destaca os fatores de vulnerabilidade que agravam esses efeitos, como pobreza, racismo ambiental, ausência de apoio institucional e a maior suscetibilidade de crianças, idosos e povos tradicionais — populações que historicamente enfrentam barreiras estruturais. Diante desse cenário, o diagrama propõe respostas necessárias, como a inserção da saúde mental nas políticas climáticas, o fortalecimento da resiliência comunitária e a promoção de ações baseadas em justiça climática e acolhimento psicossocial. Em síntese, a figura ressalta a urgência de abordagens integradas entre meio ambiente, saúde pública e justiça social, ampliando o reconhecimento dos efeitos psicológicos da emergência climática como uma prioridade em contextos nacionais e internacionais.

Deslocamento forçado e saúde mental no contexto das mudanças climáticas

As mudanças climáticas intensificam processos já complexos de mobilidade humana ao redor do mundo, produzindo um fenômeno emergente: os chamados migrantes climáticos. Diferentemente de migrantes econômicos ou refugiados políticos, essas populações são forçadas a abandonar seus territórios devido a eventos climáticos extremos (como enchentes, ciclones e secas prolongadas), elevação do nível do mar e degradação ambiental progressiva, comprometendo a habitabilidade de regiões inteiras. Segundo o Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC, 2023), cerca de 32,6 milhões de pessoas foram deslocadas por desastres em 2022 — número que tende a crescer nas próximas décadas com o avanço do aquecimento global.

Embora o deslocamento em si represente um desafio logístico e humanitário, os impactos mais duradouros recaem sobre a saúde mental das populações afetadas. O trauma associado à perda de lares, meios de subsistência e redes sociais está fortemente correlacionado ao desenvolvimento de transtornos mentais, como ansiedade generalizada, depressão, transtorno de estresse pós-traumático (TEPT) e sintomas psicossomáticos.

Migração forçada e perda de territorialidade

O deslocamento climático, ainda que muitas vezes interno aos países, implica a ruptura de vínculos sociais, culturais e simbólicos profundamente enraizados no território. Populações indígenas, ribeirinhas, agricultores familiares e pescadores artesanais frequentemente perdem não apenas suas casas, como também formas de vida associadas ao ambiente natural, à ancestralidade e à identidade coletiva. Essa perda de territorialidade configura uma experiência de luto ecológico (Cunsolo; Ellis, 2018), descrita como o sofrimento psíquico diante da destruição de ecossistemas e paisagens com significado afetivo e espiritual.

Além disso, a precariedade dos abrigos temporários, a incerteza jurídica

sobre reassentamentos e a ausência de apoio psicossocial estruturado aprofundam a vulnerabilidade dos indivíduos deslocados. Crianças e adolescentes são particularmente suscetíveis aos efeitos adversos do deslocamento, que podem comprometer seu desenvolvimento emocional e desempenho escolar. O deslocamento também acarreta discriminação e xenofobia nos contextos de destino, intensificando sentimentos de exclusão, desesperança e humilhação.

Transtornos mentais associados ao estresse climático

Estudos empíricos em zonas afetadas por desastres naturais e eventos climáticos extremos demonstram uma associação significativa entre deslocamento forçado e incidência de transtornos mentais. Em contextos de eventos súbitos, como enchentes ou deslizamentos de terra, os sintomas de TEPT são frequentes, especialmente quando há perdas humanas ou ferimentos. Em situações de degradação ambiental lenta — como desertificação, salinização do solo ou aumento progressivo do nível do mar —, os efeitos sobre a saúde mental tendem a ser crônicos e insidiosos, gerando quadros de ansiedade existencial, depressão e desesperança (Berry *et al.*, 2010).

Populações expostas repetidamente a eventos climáticos extremos sofrem com a chamada carga cumulativa de estresse, exacerbando fatores de risco preexistentes. Mulheres, idosos, pessoas com deficiência e indivíduos com histórico de trauma apresentam maior suscetibilidade à deterioração da saúde mental no contexto de deslocamentos induzidos pelo clima. A ausência de políticas públicas de acolhimento psicológico e de mecanismos de proteção social aprofunda a precariedade das respostas institucionais.

Mudanças climáticas, empobrecimento e vulnerabilidade emocional

Mesmo em comunidades que não sofrem deslocamento físico imediato, a

ameaça constante das mudanças climáticas — como a possibilidade de perder suas terras, casas ou modos de vida — pode induzir uma forma de ecoansiedade, definida como o sofrimento psíquico frente à percepção de colapso ambiental global (Clayton *et al.*, 2017). Esse tipo de ansiedade manifesta-se em sentimentos de impotência, insônia, desmotivação e sofrimento moral, com impactos relevantes na saúde mental coletiva.

Nos países em desenvolvimento, onde a proteção social é limitada e os recursos para a saúde mental são escassos, os efeitos psicológicos das mudanças climáticas podem ser especialmente devastadores. A falta de suporte institucional, aliada à intensificação da pobreza, insegurança alimentar e destruição ambiental, configura um cenário de vulnerabilidade emocional crescente e de potencial agravamento de transtornos mentais em escala populacional.

A emergência climática não é apenas uma crise ambiental e econômica, mas também uma crise de saúde mental global. O deslocamento forçado por eventos climáticos compromete, além da integridade física das populações, sua estabilidade emocional e bem-estar psicológico. Os transtornos mentais relacionados à perda de territórios, casas, recursos e identidade demandam respostas intersetoriais, que integrem saúde pública, justiça ambiental e políticas de migração e reassentamento com base em direitos humanos.

”

[...] o deslocamento forçado induzido por fatores climáticos compromete o bem-estar psicológico das populações [...]

É fundamental que os governos implementem estratégias de saúde mental comunitária, com enfoque preventivo, culturalmente sensível e territorializado, e que reconheçam os impactos psíquicos das mudanças climáticas como uma dimensão central na formulação de políticas climáticas. A justiça climática só será alcançada quando a dignidade e o bem-estar psicológico das populações afetadas forem colocados no centro das respostas institucionais ao colapso ambiental em curso.

Mudanças climáticas e doenças transmitidas por vetores



Figura 39. Resume, de forma clara e estruturada, a complexa relação entre mudanças climáticas globais e o aumento das doenças infecciosas emergentes transmitidas por vetores, especialmente em regiões vulneráveis. No topo do diagrama, destacam-se os fatores climáticos — como o aquecimento global, alterações na precipitação e umidade —, que afetam diretamente o comportamento e a ecologia de

vetores, como mosquitos transmissores de arboviroses. Esses fatores provocam alterações nos vetores, como expansão geográfica (com penetração em áreas antes não endêmicas), aumento da longevidade, maior frequência de picadas e maior competência vetorial, isto é, maior capacidade de transmissão de patógenos.

A figura 39 evidencia a necessidade de uma abordagem transdisciplinar e preventiva, reforçando a importância de integrar conhecimento científico, políticas públicas e justiça social na gestão das doenças vetoriais em tempos de mudanças climáticas aceleradas.



Segurança alimentar e nutrição

Mudanças climáticas, segurança alimentar e nutrição

A interseção entre clima, agricultura e saúde

As mudanças climáticas exercem efeitos complexos e multifatoriais sobre a produção de alimentos, influenciando diretamente a segurança alimentar, os padrões nutricionais e, por consequência, a saúde pública. O aumento da temperatura média global, as alterações nos regimes de precipitação, a elevação da frequência de eventos climáticos extremos (como secas e inundações) e o aumento da salinização de solos costeiros estão comprometendo significativamente a produtividade agrícola em diferentes regiões do planeta (IPCC, 2022). Culturas alimentares básicas, como arroz, milho e trigo — que sustentam a dieta de bilhões de pessoas —, têm mostrado declínio na produtividade em diversas regiões tropicais e subtropicais, particularmente em países de baixa renda, onde os sistemas agrícolas dependem fortemente de condições climáticas previsíveis (Myers *et al.*, 2017). Esses efeitos repercutem em níveis crescentes de insegurança alimentar, desnutrição e deficiências nutricionais, especialmente entre populações vulneráveis.

Impactos nutricionais: menor valor nutricional e aumento de deficiências

Além da redução da quantidade de alimentos produzidos, as mudanças climáticas afetam a qualidade nutricional dos alimentos. Estudos experimentais mostram que o aumento da concentração atmosférica de CO₂, embora possa estimular o crescimento de algumas plantas, tende a reduzir a concentração de nutrientes essenciais, como proteínas, ferro e zinco, em culturas como trigo, arroz e leguminosas (Ziska *et al.*, 2016). Esse fenômeno representa uma ameaça silenciosa, mas profunda, para a nutrição humana, especialmente em contextos nos quais grande parte da população depende de poucos alimentos básicos

como principal fonte de micronutrientes. A deficiência de ferro, por exemplo, pode levar à anemia ferropriva, comprometendo o desenvolvimento cognitivo infantil, a capacidade física de adultos e a saúde gestacional. Já a redução nos teores de zinco afeta diretamente o sistema imunológico, aumentando a suscetibilidade a infecções — uma relação preocupante em um cenário de maior incidência de doenças infecciosas induzidas pelo clima.

Vulnerabilidade de regiões e populações

As populações mais afetadas pelos efeitos das mudanças climáticas sobre a segurança alimentar e a nutrição tendem a ser aquelas que já enfrentam desigualdades socioeconômicas, acesso limitado a alimentos diversificados e infraestrutura agrícola precária. Regiões da África Subsaariana, do Sudeste Asiático e da América Latina têm sido identificadas como *hotspots* de insegurança alimentar climática (FAO *et al.*, 2023). Além disso, pequenos agricultores, comunidades indígenas e populações costeiras são particularmente vulneráveis, tanto por dependerem diretamente da agricultura de subsistência quanto por enfrentarem barreiras estruturais para adaptação. O deslocamento populacional, induzido por eventos climáticos extremos e pela degradação ambiental, também pode levar à interrupção de cadeias alimentares e agravar a insegurança nutricional em contextos urbanos.

Estratégias de mitigação e adaptação

Para enfrentar esses desafios é essencial adotar estratégias integradas de mitigação e adaptação que considerem tanto os sistemas agrícolas quanto os determinantes sociais da saúde. Entre as principais soluções estão o desenvolvimento de cultivares resistentes ao calor e à seca, o fortalecimento de sistemas alimentares locais e agroecológicos, o investimento em redes de irrigação

sustentáveis e a promoção de dietas resilientes e diversificadas. Além disso, programas de vigilância nutricional, políticas públicas de segurança alimentar e investimentos em infraestrutura rural devem ser articulados com as metas climáticas globais. A promoção de sistemas alimentares sustentáveis, conforme estabelecido nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 2 e 13), torna-se fundamental não apenas para proteger a saúde das populações humanas, como também para garantir a resiliência dos ecossistemas frente às crescentes pressões antrópicas e climáticas.

Mudanças climáticas, agricultura e segurança alimentar

As mudanças climáticas configuram-se como um dos maiores desafios contemporâneos à segurança alimentar global, especialmente em países em desenvolvimento, onde sistemas agrícolas são mais vulneráveis às variações climáticas. O aumento da temperatura média global, a intensificação de eventos climáticos extremos (como secas e inundações) e as alterações nos padrões sazonais de precipitação vêm comprometendo a produtividade agrícola, reduzindo a disponibilidade de alimentos e agravando os quadros de desnutrição e insegurança alimentar. Esses impactos se dão de forma multidimensional, afetando desde a estabilidade das cadeias produtivas até a qualidade nutricional dos alimentos, com consequências diretas e indiretas para a saúde humana.

Impactos climáticos na produção agrícola

As atividades agropecuárias são altamente dependentes de condições climáticas estáveis. Contudo, os cenários traçados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) indicam alterações significativas nos regimes pluviométricos, aumento na frequência de secas prolongadas e intensificação de chuvas torrenciais, que prejudicam diretamente os ciclos fe-

nológicos de diversas culturas alimentares essenciais. Por exemplo, o milho e o trigo apresentam sensível queda de produtividade quando expostos a estresses térmicos durante a floração e a frutificação. O arroz, amplamente cultivado em zonas alagadas, é vulnerável tanto ao excesso quanto à escassez de água. Em países tropicais, a combinação de altas temperaturas e estiagens severas tem causado perdas recorrentes, colocando em risco a subsistência de pequenos produtores e a oferta de alimentos à população.

Estudos demonstram que um aumento médio de 1°C pode reduzir a produtividade do trigo em até 6%, a do arroz em 3,2% e a do milho em 7,4%, dependendo do contexto geográfico e das práticas de manejo adotadas (Ray *et al.*, 2019). Adicionalmente, a elevação do nível do mar, a salinização de solos costeiros e a degradação de



recursos hídricos afetam de forma ainda mais acentuada os sistemas agrícolas em regiões vulneráveis, como o Sul Asiático, o Sahel africano e o Nordeste brasileiro.

Insegurança alimentar, desnutrição e doenças relacionadas à dieta

A redução da produção agrícola e o aumento da instabilidade climática comprometem não apenas o abastecimento de alimentos, como também seu acesso físico e econômico pela população. A insegurança alimentar, definida pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) como a incerteza em obter alimentos adequados para uma vida ativa e saudável, afeta atualmente mais de 735 milhões de pessoas no mundo (FAO *et al.*, 2023). Em muitos casos, essa condição agrava quadros de desnutrição calórica e proteica,



sobretudo em crianças menores de cinco anos, com consequências irreversíveis para o desenvolvimento físico e cognitivo.

Além da desnutrição infantil, a escassez de alimentos diversificados eleva o risco de deficiências nutricionais específicas, como carência de vitamina A, de ferro e de zinco, que afetam a imunidade, a capacidade de aprendizado e a resistência a infecções. A crescente dependência de alimentos ultraprocessados e com baixo valor nutricional, em contextos de insegurança alimentar, também contribui para o paradoxo da coexistência entre desnutrição e obesidade, caracterizando a “dupla carga” de má nutrição (Popkin *et al.*, 2020). Esse panorama é especialmente preocupante em áreas urbanas periféricas e regiões rurais de baixa renda, nas quais o acesso a alimentos frescos é limitado.

”

A redução da população agrícola
e o aumento da instabilidade climática
comprometem não apenas o abastecimento de alimentos,
com também seu acesso físico e
econômico pela população.

Estratégias de adaptação agrícola e políticas públicas

Frente a esse cenário, torna-se imperativo o desenvolvimento e a implementação de estratégias adaptativas que garantam a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas. A adoção de práticas agroecológicas, o melhoramento genético de cultivares resistentes à seca e ao calor, o uso eficiente da água por meio de tecnologias de irrigação de precisão e a diversificação de sistemas produtivos são medidas centrais nesse processo (Altieri; Nicholls, 2020). Além disso, o fortalecimento da agricultura familiar, com assistência técnica e acesso a crédito, é essencial para assegurar a produção local e o abastecimento regional.

No âmbito das políticas públicas, destacam-se iniciativas como os Programas de Aquisição de Alimentos (PAA) e de Alimentação Escolar (PNAE), no Brasil, que aliam segurança alimentar à valorização da produção local. Políticas de subsídio a alimentos básicos, seguros agrícolas contra perdas climáticas, criação de estoques estratégicos e investimentos em infraestrutura de armazenamento e transporte são igualmente fundamentais. A integração entre as agendas de segurança alimentar, saúde pública e ação climática — conforme delineado nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 2 e 13) — é essencial para enfrentar os efeitos sinérgicos das mudanças climáticas sobre a nutrição humana e a estabilidade dos sistemas alimentares.

A inter-relação entre mudanças climáticas, produção agrícola e segurança alimentar exige uma abordagem intersetorial e baseada em ciência, capaz de antecipar riscos, promover a resiliência dos sistemas de produção e proteger as populações mais vulneráveis. A inércia frente a esse desafio compromete não apenas a erradicação da fome e da pobreza, como também os avanços obtidos em saúde global nas últimas décadas (figura 40). A adaptação agrícola, combinada com políticas públicas robustas e justiça climática, será determinante para garantir um futuro alimentar sustentável e equitativo no século XXI.

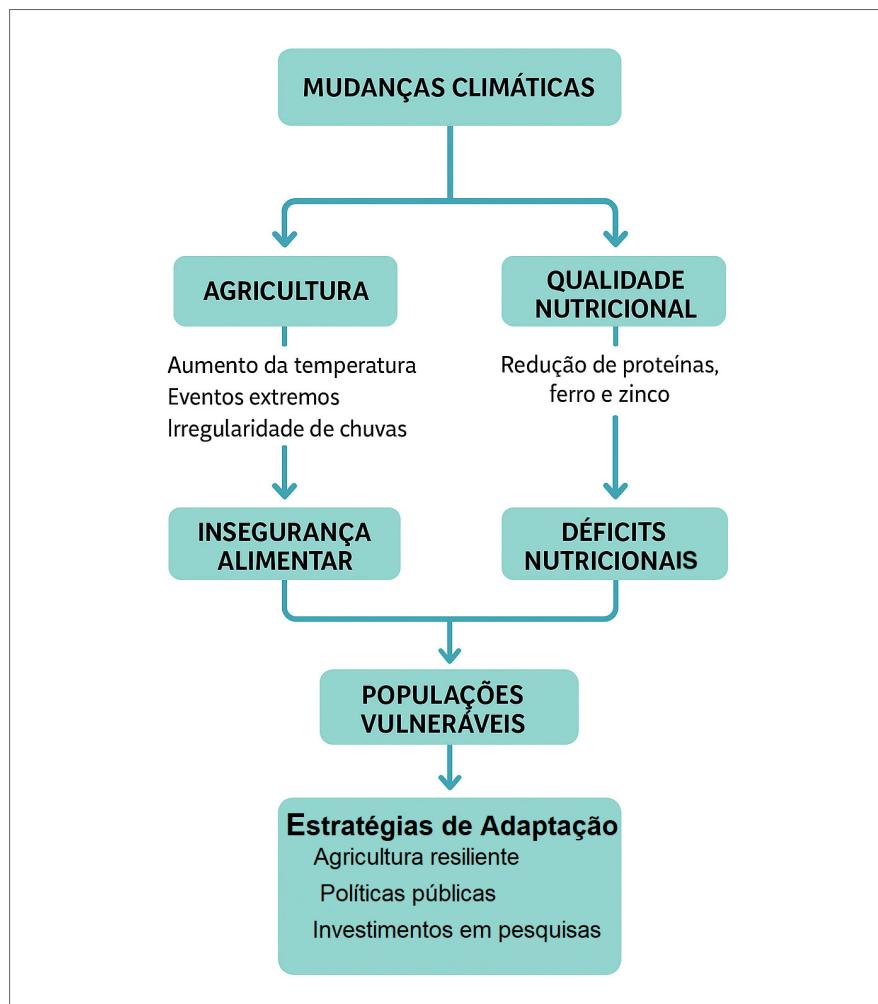


Figura 40. Forma esquemática demonstrando as inter-relações entre as mudanças climáticas e seus impactos na segurança alimentar e nutricional, com ênfase nas consequências para populações vulneráveis e nas estratégias de adaptação necessárias. No topo do fluxograma, as mudanças climáticas são apontadas como o fator desencadeante de duas principais frentes de impacto: sobre a agricultura e sobre a qualidade nutricional dos alimentos. No primeiro caso, o aumento da temperatura, eventos extremos e a irregularidade de chuvas provocam redução da produtividade agrícola e perda de safras, o que culmina em insegurança alimentar. Paralelamente, as alterações climáticas reduzem o teor de proteínas, ferro e zinco nos alimentos, o que compromete a qualidade nutricional e pode levar a deficiências nutricionais, especialmente em comunidades com menor acesso a alimentos variados e saudáveis. Ambas as vias — insegurança alimentar e déficits nutricionais — afetam diretamente as populações vulneráveis, como crianças, idosos e comunidades de baixa renda, que têm menor capacidade de adaptação a essas

transformações. Para enfrentar esses desafios, a figura aponta a necessidade de estratégias de adaptação, que incluem:

- Agricultura resiliente, com práticas mais sustentáveis e resistentes a extremos climáticos;
- Políticas públicas que garantam acesso a alimentos e proteção social;
- Dietas diversificadas que aumentem a segurança nutricional mesmo diante de limitações na oferta de determinados alimentos.

Em síntese, a figura destaca a urgência de uma abordagem sistêmica e multisectorial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas na produção e qualidade dos alimentos, priorizando a equidade social e a saúde pública.

Vulnerabilidades sociais e desigualdades em saúde frente às mudanças climáticas

As mudanças climáticas não impactam todas as populações de maneira igual. Ainda que o aquecimento global seja um fenômeno planetário, seus efeitos são modulados por condições socioeconômicas, políticas e culturais que determinam a capacidade de adaptação das diferentes populações. A literatura científica sobre os impactos das mudanças climáticas em saúde pública tem enfatizado, cada vez mais, o conceito de justiça climática, que reconhece a desigual distribuição dos riscos ambientais entre diferentes grupos sociais e geográficos (Schlosberg; Collins, 2014). As populações mais pobres, marginalizadas e periféricas — tanto em países em desenvolvimento quanto em zonas urbanas de nações desenvolvidas — são desproporcionalmente afetadas por eventos climáticos extremos e pela degradação ambiental, enquanto possuem menor acesso a recursos para mitigação e recuperação.

Desigualdade social e exposição a riscos climáticos

As populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica estão mais expostas aos riscos climáticos devido à combinação de localização geográfica de risco, precariedade habitacional, informalidade econômica e limitação de acesso a serviços públicos essenciais. Comunidades que vivem em encostas, margens de rios, favelas ou áreas de ocupação irregular são desproporcionalmente

afetadas por enchentes, deslizamentos e ondas de calor, com impactos diretos sobre a saúde, a moradia e os meios de subsistência. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021), mais de 90% das mortes relacionadas a eventos climáticos extremos ocorrem em países de baixa e média renda, revelando o peso das desigualdades globais nesse contexto.

Além disso, comunidades rurais dependentes da agricultura de subsistência estão entre as mais afetadas por secas prolongadas e alterações nos regimes pluviométricos, o que compromete não apenas a produção de alimentos, como também a renda familiar e o acesso à nutrição adequada. Em zonas urbanas, a urbanização desordenada, aliada à ausência de infraestrutura verde e de saneamento básico, amplia os efeitos do estresse térmico, da poluição do ar e da proliferação de doenças transmitidas por vetores.

Infraestrutura, saúde e capacidade de resposta

A desigualdade no acesso a serviços de saúde e infraestrutura urbana agrava ainda mais os efeitos das mudanças climáticas sobre as populações vulneráveis. Sistemas de saúde frágeis, com baixa cobertura, subfinanciamento e escassez de profissionais, dificultam a detecção precoce e o manejo eficaz de doenças sensíveis ao clima, como as doenças respiratórias e infecciosas (Ebi *et al.*, 2018). Em contextos de desastres naturais, como inundações ou ciclones, é comum que postos de saúde sejam danificados ou fiquem inacessíveis, deixando comunidades sem atendimento médico em momentos críticos.

A ausência de redes de drenagem urbana, transporte público eficiente, moradias ventiladas e programas de vigilância ambiental limita a capacidade adaptativa dos territórios frente a eventos climáticos extremos. A população que reside em periferias urbanas sofre com o efeito de ilhas de calor, enquanto a falta de arborização e de áreas sombreadas contribui para o aumento da

morbimortalidade por estresse térmico. Adicionalmente, a insegurança hídrica e alimentar é intensificada pela ausência de políticas públicas que considerem as especificidades territoriais e socioculturais dessas comunidades.

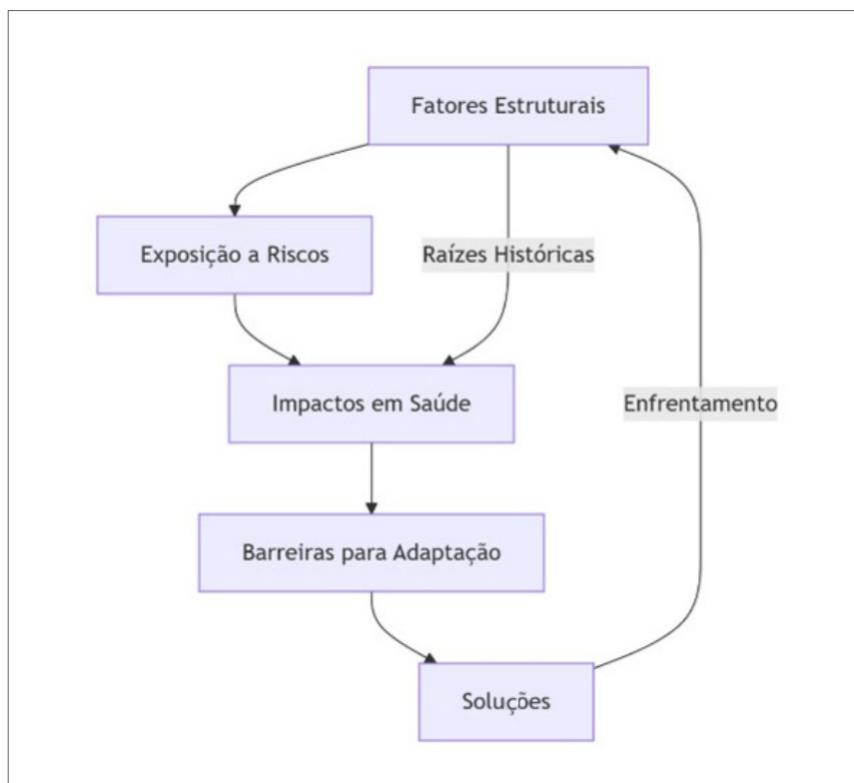


Figura 41. A figura esquemática representa uma cadeia de relações entre fatores estruturais, impactos em saúde e os desafios da adaptação e enfrentamento diante das mudanças climáticas e outras crises ambientais e sociais. O diagrama destaca como as desigualdades históricas e estruturais, que têm raízes profundas (como colonialismo, racismo ambiental, desigualdade socioeconômica e políticas públicas excludentes), contribuem para a exposição desigual a riscos ambientais e climáticos. Essa exposição gera impactos diretos e indiretos sobre a saúde, particularmente em populações vulneráveis. O diagrama também evidencia que esses impactos em saúde não ocorrem de maneira isolada, mas estão ligados a barreiras para a adaptação, como falta de infraestrutura, de acesso a serviços de saúde, ausência de políticas inclusivas e de suporte comunitário. Essas barreiras dificultam a implementação de estratégias efetivas de enfrentamento. A figura propõe que a superação dessas barreiras passa necessariamente pela formulação e implementação de soluções estruturais, que devem incluir não apenas medidas técnicas, como também abordagens que enfrentem as raízes históricas das desigualdades. O retorno para os fa-

tores estruturais, no fim do ciclo, indica a necessidade de transformação sistêmica para que as soluções sejam duradouras e justas. Assim, este esquema reforça a importância de integrar saúde, justiça social e climática na formulação de políticas públicas, reconhecendo que os problemas enfrentados hoje têm causas profundas e complexas, e que soluções verdadeiramente eficazes exigem ações intersetoriais, participativas e transformadoras.

Interseccionalidade: raça, classe e território

Diversos estudos indicam que a vulnerabilidade aos riscos climáticos está profundamente entrelaçada a marcadores sociais como raça, classe, gênero e etnia (Martinez *et al.*, 2021). No Brasil, por exemplo, comunidades negras e indígenas, historicamente e frequentemente marginalizadas, estão mais expostas à degradação ambiental, à contaminação de recursos naturais e à ausência de serviços básicos. Essa exposição é reflexo de um processo de exclusão socioespacial, em que os grupos racializados ocupam os territórios mais precarizados e ambientalmente degradados, seja por força de políticas públicas excludentes, seja pelo legado histórico de desigualdades estruturais.

Em países como os Estados Unidos, populações afro-americanas e latino-americanas enfrentam maior incidência de doenças respiratórias associadas à poluição do ar e à proximidade de instalações industriais, o que eleva sua vulnerabilidade frente a eventos climáticos e compromete sua capacidade de recuperação pós-desastres (Bullard; Wright, 2012). Assim, torna-se imprescindível que as estratégias de mitigação e adaptação climática considerem a interseccionalidade como princípio orientador de políticas públicas voltadas à equidade em saúde e justiça ambiental.

A crise climática, ao se sobrepor a estruturas históricas de desigualdade social, econômica e racial, aprofunda as iniquidades em saúde e compromete os direitos fundamentais das populações mais vulneráveis. A promoção da justiça climática deve ser central em qualquer resposta política ou técnica aos

desafios das mudanças climáticas. Isso implica não apenas ampliar o acesso a serviços básicos e fortalecer os sistemas de saúde em territórios marginalizados, como também em garantir a participação ativa dessas populações na formulação e implementação de políticas públicas. Somente com uma abordagem inclusiva, intersetorial e baseada em evidências será possível proteger a saúde das comunidades mais afetadas e construir resiliência social frente à emergência climática.

Mudanças climáticas e sistemas de saúde: desafios e estratégias de adaptação

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios contemporâneos à saúde pública global, não apenas por seus efeitos diretos sobre a morbimortalidade populacional, mas também pela pressão crescente que exercem sobre os sistemas de saúde, particularmente nos países de baixa e média renda. O aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, a expansão de doenças infecciosas e a deterioração das condições ambientais comprometem a capacidade dos sistemas de saúde de prevenir, responder e adaptar-se às novas ameaças.

Aumento da demanda por serviços de saúde

A elevação da temperatura média global, aliada à intensificação de eventos extremos, como ondas de calor, inundações e incêndios florestais, contribui significativamente para o aumento da incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e infecciosas (Watts *et al.*, 2021). A Organização

Mundial da Saúde (OMS) estima que, entre 2030 e 2050, as mudanças climáticas poderão causar aproximadamente 250.000 mortes adicionais por ano devido à desnutrição, malária, diarreia e estresse térmico (WHO, 2018). As ondas de calor, por exemplo, aumentam a incidência de infartos e AVCs, sobretudo entre idosos, trabalhadores expostos ao calor e populações com comorbidades preexistentes.

Adicionalmente, o aumento da temperatura e a alteração nos regimes pluviométricos têm ampliado o habitat de vetores como *Aedes aegypti* e *Anopheles spp.*, facilitando a expansão de doenças como dengue, zika, chikungunya e malária para áreas antes não endêmicas. Os sistemas de saúde, consequentemente, enfrentam uma sobrecarga crescente, que se manifesta em prontos-socorros lotados, esgotamento de recursos e profissionais e comprometimento da qualidade da atenção prestada.

Fragilidade das infraestruturas de saúde

As pressões climáticas incidem de maneira mais intensa sobre sistemas de saúde já fragilizados, particularmente em regiões com déficits históricos de infraestrutura sanitária, baixo investimento público e desigualdade social. Hospitais e unidades de saúde localizadas em áreas sujeitas a enchentes, deslizamentos ou secas prolongadas frequentemente sofrem com danos físicos, interrupção de energia elétrica, falta de água potável e colapso logístico, prejudicando não apenas o atendimento direto, como também o armazenamento de medicamentos, vacinas e suprimentos essenciais.

A pandemia de covid-19 evidenciou dramaticamente a incapacidade de muitos sistemas de saúde de responder a crises complexas e multifatoriais. No contexto climático, essas limitações são exacerbadas por fatores como o deslocamento populacional, o aumento da demanda por atendimento a doenças

emergentes e a escassez de insumos críticos. A ausência de um planejamento resiliente, com protocolos de emergência integrados à política climática, compromete a continuidade dos cuidados e agrava desigualdades já existentes entre regiões e populações.

Adaptação e resiliência dos sistemas de saúde

Diante da crescente interconexão entre mudanças climáticas e saúde humana, torna-se urgente a reformulação dos sistemas de saúde sob a ótica da resiliência climática. Isso inclui investimentos em infraestruturas sustentáveis e seguras, com abastecimento energético independente (como sistemas solares), proteção contra enchentes, ventilação adequada e sistemas de refrigeração eficientes. A capacitação de profissionais de saúde para identificar e responder precocemente a eventos climáticos e seus efeitos sobre a saúde deve integrar os currículos de formação médica e programas de educação continuada.

Além disso, políticas públicas de saúde devem incorporar ferramentas de avaliação de risco climático, sistemas de vigilância epidemiológica ambiental e estratégias de comunicação de risco adaptadas aos diferentes contextos socio-culturais. A elaboração de planos de contingência e emergência climática, com articulação intersetorial entre saúde, meio ambiente, defesa civil e urbanismo, é essencial para reduzir impactos e salvar vidas. O fortalecimento da atenção primária, aliada ao uso de tecnologias de monitoramento e inteligência artificial, pode ampliar a capacidade de resposta e prevenção.

A crise climática impõe uma inflexão necessária nas políticas de saúde, exigindo sistemas mais integrados, equitativos e resilientes. O enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas sobre a saúde exige, além da ampliação da infraestrutura, uma mudança paradigmática no planejamento sanitário, que reconheça as interseções entre ambiente, clima e saúde como determinantes

centrais da morbidade e da equidade em saúde. A construção de sistemas de saúde adaptativos será determinante para a proteção da vida humana em um planeta em rápida transformação.

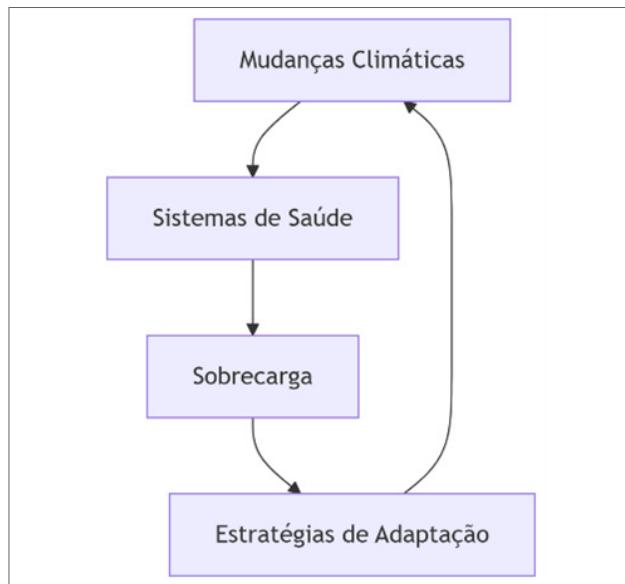


Figura 42. Mostra um fluxo das inter-relações entre fatores estruturais, exposição a riscos, impactos em saúde e barreiras para a adaptação em contextos de crise climática. A figura evidencia como os fatores estruturais, enraizados em desigualdades históricas, determinam a exposição diferenciada a riscos ambientais e climáticos, culminando em impactos diretos e indiretos sobre a saúde das populações. As barreiras socioeconómicas e institucionais limitam as possibilidades de adaptação, exigindo a formulação de soluções que considerem não apenas medidas técnicas, como também ações estruturais orientadas pela justiça social e climática.

”

A pandemia de covid-19 evidenciou dramaticamente
a incapacidade de muitos sistemas de saúde
de responder a crises complexas e multifatoriais.

O ponto de partida do diagrama são os fatores estruturais, como pobreza, desigualdade social, exclusão territorial, racismo ambiental e ausência de infraestrutura adequada. Esses fatores determinam a exposição desigual a riscos ambientais e climáticos, fazendo com que certos grupos populacionais — como comunidades periféricas, povos tradicionais e populações racializadas — estejam mais suscetíveis aos impactos adversos. A figura 42 também reconhece as raízes históricas desses fatores, ou seja, que a vulnerabilidade atual é resultado de processos históricos de marginalização, exploração e negligência institucional.

Essa exposição leva diretamente a impactos em saúde, incluindo doenças respiratórias, cardiovasculares, transtornos mentais, insegurança alimentar e sofrimento psíquico — efeitos que se intensificam em contextos de crise climática e ambiental. Contudo, a presença desses impactos não leva automaticamente a uma resposta eficiente: surgem barreiras para a adaptação, como falta de acesso à informação, ausência de políticas públicas eficazes, restrições financeiras e exclusão de grupos vulneráveis dos processos decisórios.

Por fim, a figura aponta para a necessidade de identificar e implementar soluções estruturais que envolvam, além de respostas técnicas ou emergenciais, o enfrentamento das causas profundas da vulnerabilidade. Isso inclui revisar políticas públicas, garantir justiça climática, promover inclusão social e fortalecer capacidades locais. Ao fim, essas soluções devem retroalimentar o sistema, promovendo transformações nos próprios fatores estruturais que sustentam as desigualdades — fechando, assim, um ciclo de enfrentamento com justiça social.

Desafios para a saúde pública e políticas de resposta frente às mudanças climáticas

As mudanças climáticas impõem desafios crescentes à saúde pública mun-

dial, exigindo respostas coordenadas e multisectoriais que integrem ciência, governança e equidade. O impacto climático sobre a saúde humana não se limita à incidência de doenças infecciosas ou a eventos extremos isolados: trata-se de um processo de transformação ambiental com efeitos amplos e interdependentes sobre os determinantes sociais da saúde. Diante desse cenário, torna-se imperativo reconfigurar os sistemas de saúde pública para que sejam proativos, resilientes e centrados em justiça climática e social.

A integração das mudanças climáticas nas políticas de saúde pública

Historicamente, a saúde pública foi desenvolvida com base em determinantes sociais, epidemiologia clássica e vigilância sanitária, mas o advento das mudanças climáticas exige uma incorporação urgente da dimensão ambien-



tal-climática nas políticas e planos de ação. A Organização Mundial da Saúde (OMS) tem promovido diretrizes para que os países integrem o risco climático aos seus planos nacionais de saúde, por meio de ferramentas como o *Operational Framework for Building Climate Resilient Health Systems* (WHO, 2015), que orienta ações em governança, gestão de riscos, vigilância, prestação de serviços e financiamento.

Essa integração passa pela criação de sistemas de vigilância epidemiológica sensíveis ao clima, capazes de identificar alterações sazonais e geográficas na incidência de doenças, além de antecipar surtos com base em dados meteorológicos e ambientais. A incorporação das mudanças climáticas no planejamento urbano e no ordenamento territorial é igualmente vital, pois áreas com alta vulnerabilidade socioambiental são frequentemente negligenciadas pelas políticas convencionais de saúde. A transversalidade das políticas públicas – articulando saúde, meio ambiente, defesa civil, saneamento e educação – é essencial para respostas eficazes e sustentáveis.

Educação, comunicação de risco e conscientização pública

A educação em saúde e a comunicação de riscos são pilares fundamentais para aumentar a resiliência das comunidades frente às ameaças climáticas. A falta de compreensão sobre os impactos das mudanças climáticas na saúde humana limita a capacidade de adaptação e a mobilização social em defesa de políticas preventivas. Campanhas públicas de educação ambiental e climática devem ser contínuas, inclusivas e culturalmente sensíveis, promovendo conhecimento sobre os riscos de doenças associadas ao calor, à poluição do ar, às doenças transmitidas por vetores e aos desastres naturais.

A capacitação de profissionais da saúde para atuar em contextos de crise climática é igualmente crítica. Isso inclui o desenvolvimento de currículos em

medicina, enfermagem, epidemiologia e saúde coletiva que abordem os vínculos entre clima e saúde, bem como o treinamento contínuo para responder a surtos, desastres e deslocamentos populacionais induzidos por fatores ambientais. A comunicação eficaz do risco, baseada em evidências e adequada ao nível de letramento da população, é crucial para a adoção de comportamentos protetores e para a redução da morbimortalidade associada aos eventos climáticos extremos.

Infraestrutura de saúde resiliente e equitativa

O fortalecimento da infraestrutura física e funcional dos sistemas de saúde é um componente estratégico da adaptação climática. As unidades de saúde devem ser projetadas e adaptadas para resistirem a desastres naturais, com ênfase em abastecimento energético autônomo (por exemplo, energia solar), segurança hídrica, ventilação natural, controle térmico passivo e localização segura em relação a zonas de risco hidrológico e geológico. Além disso, os sistemas de informação e resposta devem ser digitalizados, com protocolos de continuidade operacional em contextos de emergência.

A equidade deve ser uma diretriz central nos investimentos em infraestrutura. As populações mais afetadas pelas mudanças climáticas – comunidades ribeirinhas, moradores de áreas de risco, populações indígenas e periféricas – devem ser priorizadas na criação de redes de atenção médica descentralizadas e acessíveis. Isso inclui a expansão da atenção primária à saúde, o fortalecimento do Sistema Único de Saúde (SUS) no contexto brasileiro e o desenvolvimento de serviços móveis e telemedicina para áreas remotas.

Além da estrutura física, a infraestrutura organizacional e institucional deve ser reforçada. Planos de contingência para ondas de calor, enchentes, queimadas e escassez hídrica devem estar integrados aos protocolos de atenção

hospitalar e comunitária, com sistemas de alerta precoce, mobilização interseitorial e alocação de recursos emergenciais.

A crise climática é, inequivocamente, uma crise de saúde pública. Superá-la exige mais do que respostas pontuais: requer uma transformação estrutural nas políticas de saúde, orientada por justiça climática, equidade social e sustentabilidade. A integração das variáveis climáticas no planejamento sanitário, a promoção da educação ambiental e o investimento em infraestruturas resilientes são condições *sine qua non* para garantir a proteção da saúde das populações mais vulneráveis. A resposta das instituições de saúde às mudanças climáticas será um dos principais determinantes da saúde coletiva nas próximas décadas.

Importância da prevenção e da mitigação para a saúde pública

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais para a saúde pública do século XXI. Seus impactos já se manifestam sob a forma de eventos extremos, aumento de doenças respiratórias e infecciosas, insegurança alimentar e deslocamentos populacionais. Diante da magnitude e complexidade desses efeitos, ações reativas e exclusivamente curativas são insuficientes. Torna-se essencial adotar uma abordagem preventiva e baseada em mitigação dos riscos, com foco na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), promoção de estilos de vida saudáveis e implementação de políticas públicas integradas entre os setores de saúde, meio ambiente, transporte e planejamento urbano.

Medidas de prevenção e redução de riscos climáticos

A prevenção primária, no contexto das mudanças climáticas, está diretamente ligada à mitigação das causas subjacentes do aquecimento global. Re-

duzir as emissões de GEE — especialmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x) — é uma medida essencial para limitar os impactos na saúde humana. A queima de combustíveis fósseis, além de contribuir para o aquecimento global, é uma das principais fontes de poluição atmosférica, responsável por milhões de mortes prematuras por doenças respiratórias e cardiovasculares anualmente (Landrigan *et al.*, 2018). Portanto, estratégias de transição energética que priorizem fontes limpas e renováveis, como solar, eólica e biomassa sustentável, possuem duplo benefício: mitigam o clima e melhoram a qualidade do ar, com efeitos diretos na saúde da população.

Estilos de vida mais sustentáveis, como o uso do transporte ativo (caminhada e bicicleta), transporte público de baixa emissão e dietas alimentares baseadas em menor consumo de produtos ultraprocessados e de origem animal, também oferecem cobenefícios substanciais. Estudos apontam que dietas ricas em vegetais e com menor pegada de carbono não apenas reduzem as emissões, como também diminuem o risco de doenças crônicas não transmissíveis, como obesidade, diabetes tipo 2 e doenças cardiovasculares (Springmann *et al.*, 2018). O estímulo à prática de atividade física por meio de infraestrutura urbana adequada — calçadas seguras, ciclovias, áreas verdes — reforça essa lógica preventiva e sustentável.

Políticas públicas integradas em saúde e clima

A construção de políticas públicas que considerem simultaneamente os determinantes ambientais e sociais da saúde é um dos pilares para uma resposta eficaz às mudanças climáticas. Essa integração requer a atuação intersetorial de ministérios, governos locais, instituições de pesquisa e sociedade civil. A criação de planos nacionais e municipais de adaptação e mitigação deve incluir

indicadores de saúde, mapeamento de populações vulneráveis e mecanismos de financiamento sustentável.

Um exemplo bem-sucedido são os programas de mobilidade urbana sustentável, que não apenas reduzem emissões, como também ampliam o acesso ao transporte seguro e eficiente, beneficiando populações que vivem em periferias urbanas e que, frequentemente, estão expostas a condições ambientais adversas. Políticas habitacionais que promovem edificações com eficiência energética, ventilação natural e acesso à água potável e saneamento básico também contribuem para a resiliência climática e sanitária.

Além disso, estratégias de adaptação climática na saúde pública devem prever sistemas de alerta precoce para ondas de calor, vigilância integrada de doenças sensíveis ao clima, planos de contingência para desastres naturais e fortalecimento da atenção primária à saúde em áreas de risco. A implementação de sistemas de saúde resilientes requer investimentos em infraestrutura, capacitação de profissionais e desenvolvimento de tecnologias de monitoramento ambiental e epidemiológico.

Prevenir é mais eficaz e tem melhor custo-efetivo do que remediar. A prevenção e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre a saúde pública demandam uma transição paradigmática: da resposta clínica individual à gestão integrada e intersetorial dos riscos ambientais e sociais. Reduzir emissões, promover modos de vida sustentáveis e desenvolver políticas públicas convergentes entre saúde e clima, além de serem estratégias ambientais, são ações fundamentais de saúde pública (figura 43). A promoção da saúde, em um mundo em aquecimento, exige escolhas políticas, econômicas e culturais centradas na equidade, na sustentabilidade e na solidariedade intergeracional.



Figura 43. Representação esquemática dos principais desafios e políticas de resposta da saúde pública frente às mudanças climáticas. A figura destaca quatro eixos fundamentais: (1) a necessidade de integrar as mudanças climáticas nas políticas de saúde pública; (2) a importância da educação, comunicação de riscos e conscientização da população; (3) a adoção de medidas de prevenção e a redução de riscos climáticos, como o incentivo a fontes de energia limpa e estilos de vida sustentáveis; e (4) o fortalecimento da infraestrutura de saúde para que seja resiliente e equitativa, garantindo acesso e proteção aos grupos mais vulneráveis frente aos impactos climáticos.

Promoção da saúde e educação: estratégias para enfrentar os impactos das mudanças climáticas

As mudanças climáticas representam uma das maiores ameaças à saúde pública global no século XXI, com impactos que variam desde o aumento de doenças relacionadas ao calor e à poluição do ar até a intensificação de desastres

naturais, crises alimentares e a disseminação de doenças infecciosas. Frente a esses desafios, a promoção da saúde e a educação em saúde tornam-se pilares fundamentais para capacitar as populações a compreender os riscos climáticos e adotar comportamentos preventivos e adaptativos. Por esse motivo, devemos enfatizar o papel estratégico da educação em saúde na mitigação dos impactos das mudanças climáticas sobre a saúde, destacando abordagens eficazes e exemplos práticos de intervenções bem-sucedidas (figura 44).

Quadro 8. Mudanças climáticas e saúde: uma visão geral.

O impacto das mudanças climáticas sobre a saúde humana é multifacetado e interligado a fatores sociais, econômicos e ambientais. Entre os efeitos mais significativos estão:

- Doenças relacionadas ao calor: o aumento das temperaturas está associado ao crescimento de casos de hipertermia, desidratação e doenças cardiovasculares, particularmente em populações vulneráveis, como idosos e trabalhadores que ficam ao ar livre.
- Eventos climáticos extremos: furacões, enchentes e secas intensas não apenas causam mortes imediatas, como também resultam em desabrigamento, trauma psicológico e surtos de doenças infecciosas.
- Mudanças na distribuição de vetores de doenças: o aquecimento global e as alterações nos padrões de precipitação expandem os habitats de vetores como mosquitos, aumentando a incidência de doenças como dengue, malária e febre amarela.
- Poluição do ar: níveis mais elevados de dióxido de carbono (CO_2) e ozônio troposférico intensificam a ocorrência de doenças respiratórias e alergias.

A educação em saúde emerge como uma ferramenta crucial para informar as populações sobre esses riscos e capacitá-las a adotar medidas preventivas.

Educação em saúde: um pilar de resiliência

A educação em saúde é um processo sistemático que visa não apenas informar, mas também empoderar indivíduos e comunidades a tomar decisões que promovam o bem-estar e a qualidade de vida. No contexto das mudanças climáticas, ela desempenha papéis-chave:

Compreensão dos riscos

A compreensão das ligações entre mudanças climáticas e saúde é frequentemente limitada entre o público em geral. Programas educacionais podem abordar esse déficit por meio de:

- Campanhas de conscientização pública: disseminação de informações sobre os impactos climáticos na saúde por meio de mídia tradicional e digital.
- Educação formal: incorporação de conteúdos sobre saúde climática nos currículos escolares e universitários, abrangendo desde aspectos científicos até estratégias de mitigação.

Prevenção e ação

A educação pode ajudar as populações a adotar comportamentos que reduzam sua vulnerabilidade.

Exemplos incluem:

- Medidas preventivas contra o calor extremo: promoção de hidratação, uso de roupas adequadas e busca por abrigos em áreas sombreadas ou climatizadas.
- Gestão de desastres: treinamentos em primeiros socorros, evacuação segura e prevenção de doenças pós-desastre.
- Redução de vetores de doenças: incentivo ao uso de mosquiteiros, eliminação de criadouros e vacinação.

Estratégias inovadoras para educação em saúde

As abordagens convencionais para a educação em saúde precisam ser complementadas por estratégias inovadoras que respondam aos desafios do mundo contemporâneo. Algumas dessas estratégias incluem:

■ Uso de tecnologias digitais

As plataformas digitais oferecem uma maneira eficiente de alcançar grandes audiências com mensagens de saúde. Exemplos incluem:

- Aplicativos móveis: ferramentas que fornecem informações em tempo real sobre riscos climáticos e orientações de saúde.
- Redes sociais: campanhas de conscientização baseadas em vídeos curtos, infográficos e depoimentos de especialistas.

■ Engajamento comunitário

As comunidades têm papéis cruciais na promoção de práticas de saúde. Programas participativos, como oficinas locais e grupos de discussão, ajudam a adaptar as mensagens educativas às realidades culturais e sociais de cada região.

■ Educação de multiplicadores

Treinamentos específicos para professores, profissionais de saúde e líderes comunitários garantem a disseminação contínua e sustentável de informações críticas.

■ Exemplos práticos de intervenções

Programas de educação em saúde no contexto do calor extremo.

Em países como a Índia, programas como o Ahmedabad Heat Action Plan têm mostrado resultados significativos ao incluir campanhas educacionais sobre os riscos do calor extremo e medidas de proteção. Esse tipo de intervenção reduziu substancialmente as taxas de mortalidade associadas a ondas de calor.

■ Campanhas contra vetores de doenças

No Brasil, campanhas de combate à dengue, lideradas por agentes de saúde, são exemplos de sucesso no uso da educação como ferramenta de mobilização para o controle de criadouros de mosquitos.

O papel das políticas públicas na educação em saúde

- Governos e organizações internacionais desempenham papéis fundamentais na promoção de programas de educação em saúde, garantindo financiamento, capacitação e integração com outros setores, como educação e meio ambiente. Documentos como o Plano de Ação de Saúde e Mudança Climática da OMS (2019) enfatizam a necessidade de iniciativas integradas que alinhem educação, saúde e sustentabilidade.
 - A educação em saúde é mais do que uma ferramenta informativa; é um catalisador para a construção de resiliência frente aos impactos das mudanças climáticas. Por meio de campanhas direcionadas, uso de tecnologias digitais, engajamento comunitário e parcerias intersetoriais é possível equipar populações com o conhecimento necessário para enfrentar desafios crescentes à saúde pública. Com investimentos consistentes em educação e promoção da saúde, as sociedades podem não apenas mitigar os impactos das mudanças climáticas, como também transformar os desafios em oportunidades para construir um futuro mais saudável e sustentável.
- É fundamental o papel dos profissionais de saúde na sensibilização das comunidades sobre a prevenção de doenças relacionadas ao clima e nas políticas de adaptação.

Impactos das mudanças climáticas na saúde e resiliência



Figura 44. A imagem apresenta os principais impactos das mudanças climáticas sobre a saúde humana e destaca o papel central da educação em saúde como pilar de resiliência. Entre os efeitos diretos estão o aumento das doenças relacionadas ao calor, a intensificação de eventos climáticos extremos, que favorecem a disseminação de vetores de doenças, e a piora da qualidade do ar. Para mitigar esses efeitos são propostas estratégias educativas que envolvem a compreensão dos riscos, a promoção de ações preventivas, o uso de tecnologias digitais para comunicação em saúde e o engajamento comunitário. A figura também reforça o papel fundamental das políticas públicas na promoção de programas educacionais voltados à saúde frente às mudanças climáticas.

Adaptação dos sistemas de saúde às mudanças climáticas: estratégias para fortalecimento e resiliência

As mudanças climáticas impõem pressões crescentes sobre os sistemas de saúde em escala global, intensificando doenças infecciosas, agravos respiratórios, estresse térmico, problemas nutricionais e transtornos mentais. Além disso, desastres naturais mais frequentes e intensos — como enchentes, secas, ondas de calor e incêndios florestais — desestruturam redes de atendimento, provocam deslocamentos populacionais e elevam os riscos à saúde pública. Diante desse cenário, torna-se imperativo não apenas mitigar os fatores que contribuem para o aquecimento global, como também adaptar e fortalecer os sistemas de saúde para enfrentar com eficácia os desafios emergentes. Esta seção analisa, com base na literatura científica atual e em documentos de referência, como os relatórios do IPCC e da Organização Mundial da Saúde (OMS), as principais estratégias de adaptação dos sistemas de saúde às mudanças climáticas.

Vulnerabilidades do setor de saúde frente às mudanças climáticas

O setor saúde está entre os mais vulneráveis aos impactos diretos e indiretos das mudanças climáticas. As infraestruturas físicas podem ser danificadas por desastres naturais, os profissionais podem ser sobrecarregados durante crises sanitárias e climáticas e a distribuição de medicamentos e insumos pode ser interrompida por falhas logísticas ou eventos extremos.

Além disso, doenças sensíveis ao clima (como malária, dengue, cólera, leptospirose e infecções respiratórias) tendem a expandir-se, espacial e temporalmente, em contextos de aquecimento global e variabilidade climática. O aumento da temperatura e das chuvas intensas favorece a proliferação de vetores, enquanto o estresse hídrico e a insegurança alimentar afetam diretamente o estado nutricional da população, com implicações importantes para a saúde materno-infantil.

Dessa forma, os sistemas de saúde precisam desenvolver capacidade adaptativa para responder de forma eficaz a esses desafios, sobretudo em países de baixa e média renda, que enfrentam limitações estruturais e maior carga de doenças.

Estratégias de adaptação e fortalecimento dos sistemas de saúde

A adaptação dos sistemas de saúde requer planejamento intersetorial, investimento em infraestrutura, capacitação profissional, inovação tecnológica e fortalecimento da governança institucional. A seguir, são discutidas as principais estratégias recomendadas por organismos internacionais e evidenciadas em estudos científicos.

Fortalecimento da vigilância epidemiológica

A vigilância em saúde deve incorporar dados climáticos e ambientais para antecipar surtos de doenças sensíveis ao clima. As estratégias incluem:

Integração entre sistemas de saúde e meteorologia, permitindo prever surtos com base em condições climáticas, como o aumento de chuvas ou temperaturas extremas.

Modelagem preditiva, com uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina, para antecipar riscos sanitários em função de cenários climáticos.

Monitoramento participativo envolvendo comunidades locais, especialmente em áreas rurais e periféricas, onde os dados oficiais são escassos.

Preparação e resposta a desastres naturais

A resiliência diante de desastres requer planos de contingência abrangentes e testes regulares de resposta rápida. As ações incluem:

- Mapeamento de vulnerabilidades regionais e elaboração de planos de

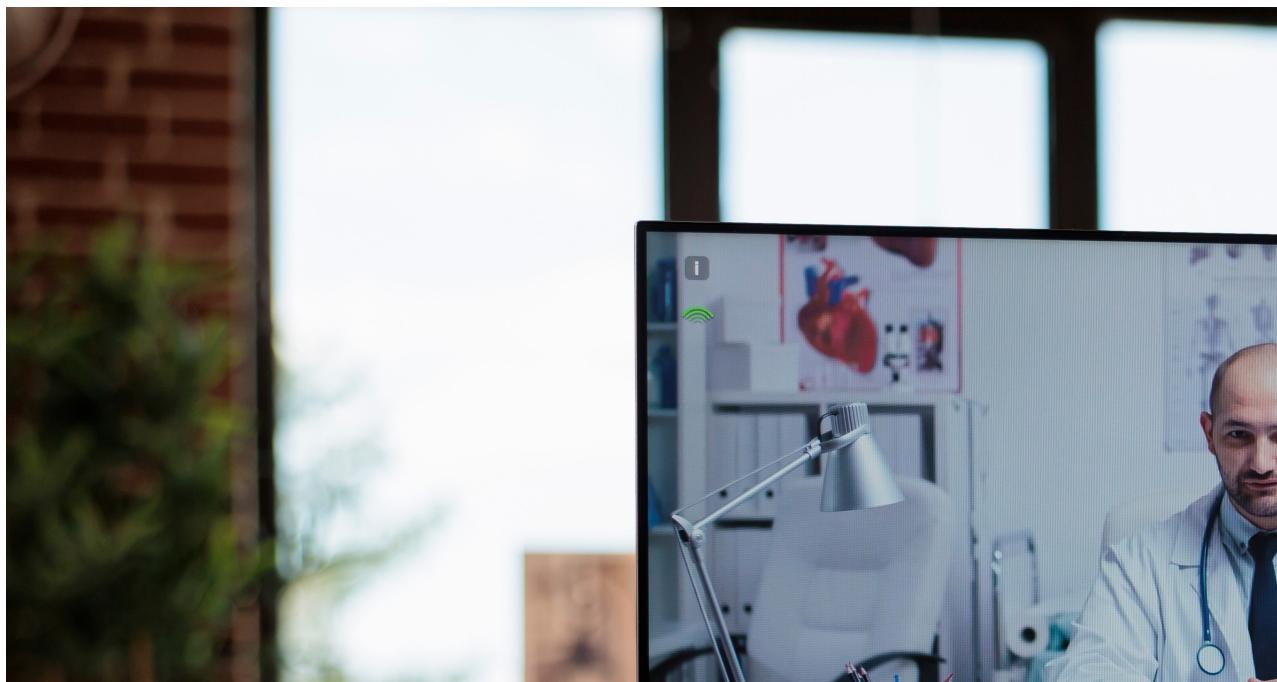
emergência climática com protocolos claros de evacuação, triagem, atendimento e reconstrução.

- Fortalecimento de estoques estratégicos de medicamentos, vacinas e insumos médicos em regiões suscetíveis a desastres.
- Treinamento contínuo de equipes de saúde em manejo de vítimas, triagem em massa, suporte psicológico e comunicação de risco.

Infraestrutura resiliente e sustentável

É essencial que unidades de saúde estejam preparadas para operar em contextos adversos, com foco em:

- Projetos arquitetônicos adaptativos, com estruturas resistentes a inundações, tempestades e ondas de calor.

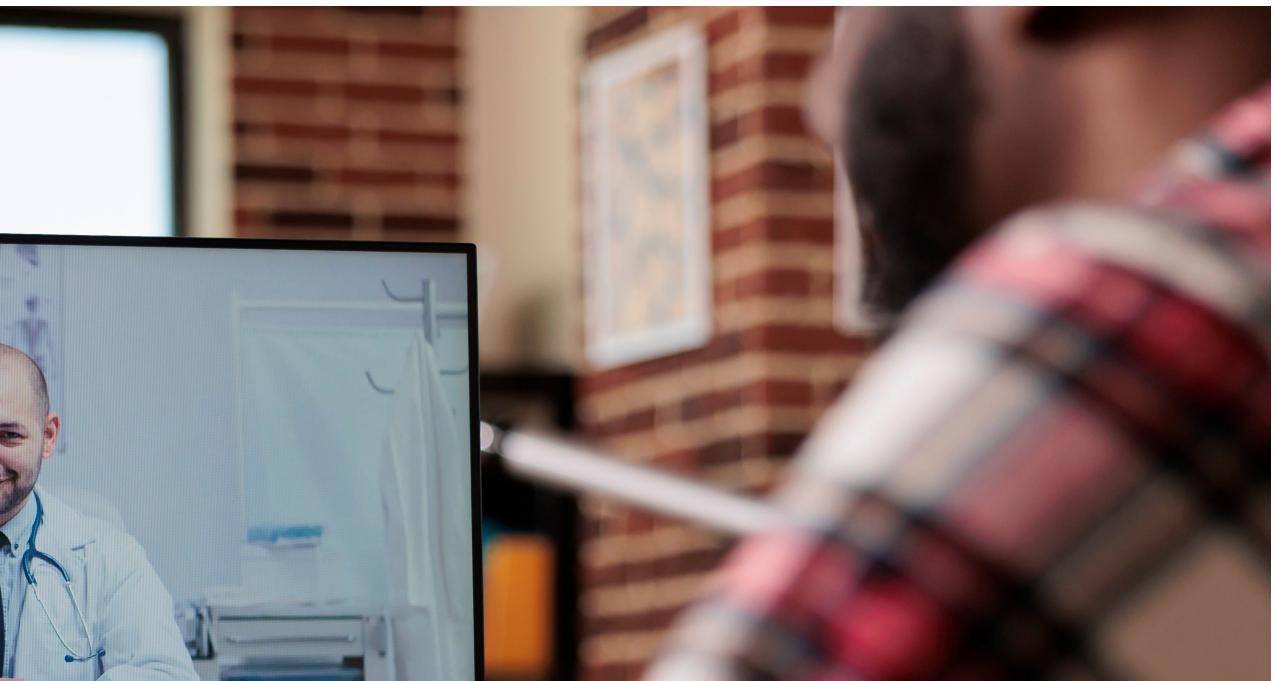


- Sistemas de energia renovável e autossuficiência hídrica, reduzindo a dependência de redes públicas vulneráveis.
- Redução da pegada de carbono do setor saúde, alinhando-se ao conceito de hospitais sustentáveis e contribuindo para a mitigação climática.

Tecnologias digitais em saúde

A saúde digital desempenha papel fundamental na adaptação, oferecendo soluções escaláveis e acessíveis. Entre as inovações, destacam-se:

- Telemedicina e atendimento remoto, essenciais em áreas isoladas ou afetadas por desastres.
- Plataformas de informação em tempo real, que integram dados climáticos, epidemiológicos e logísticos.
- Sistemas de alerta precoce baseados em sensores ambientais, que permitem resposta antecipada a eventos extremos e surtos.



Governança, políticas públicas e financiamento

A adaptação efetiva dos sistemas de saúde exige o fortalecimento da governança institucional e o alinhamento com políticas nacionais de enfrentamento às mudanças climáticas. Devem ser observadas as seguintes diretrizes:

- Inclusão da saúde nos planos nacionais de adaptação climática, promovendo a transversalidade do setor nas decisões ambientais.
- Financiamento sustentável com recursos nacionais e internacionais, incluindo fundos climáticos globais, como o *Green Climate Fund*.
- Participação comunitária na formulação e implementação de estratégias locais, garantindo equidade e justiça climática.

Exemplos de boas práticas

Diversos países têm desenvolvido estratégias eficazes que podem servir de referência:

- *Bangladesh*: integração de sistemas de alerta de ciclones com unidades móveis de saúde e campanhas preventivas para doenças pós-inundações.
- *Canadá*: sistemas robustos de vigilância climática-sanitária, com comunicação transparente e planejamento baseado em evidências.
- *Brasil*: desenvolvimento de sistemas integrados de vigilância de arboviroses sensíveis ao clima, como dengue e zika, com uso crescente de tecnologias digitais.

A adaptação dos sistemas de saúde às mudanças climáticas é uma tarefa urgente, complexa e contínua. Requer não apenas investimentos materiais, mas uma mudança de paradigma que valorize a prevenção, a equidade e a inovação. O fortalecimento da vigilância epidemiológica, a preparação para desas-

tres, o uso de tecnologias digitais e a construção de infraestruturas resilientes são caminhos fundamentais para garantir que os sistemas de saúde estejam à altura dos desafios impostos pelo novo cenário climático global.

- A saúde pública deve, portanto, ser considerada um indicador-chave da eficácia das políticas climáticas, e sua resiliência é condição indispensável para a sustentabilidade e o bem-estar das sociedades humanas nas próximas décadas.
- Também são fundamentais investimentos em pesquisa para entender melhor as interações entre mudanças climáticas e saúde e desenvolver novas abordagens para proteger as populações mais afetadas.



Figura 45. Traz estratégias fundamentais para a adaptação dos sistemas de saúde frente às mudanças climáticas, com foco na construção de resiliência. Os eixos abordam desde a identificação das vulnerabilidades do setor — como deficiências em infraestrutura física, distribuição de profissionais e riscos tecnológicos — até o fortalecimento da vigilância epidemiológica por meio da integração com dados meteorológicos. Também são enfatizadas ações de preparação e resposta a desastres naturais, desenvolvimento de infraestrutura resiliente e sustentável, uso de tecnologias digitais em saúde (como telemedicina e sistemas de precaução) e o papel essencial da governança, das políticas públicas e do financiamento sustentável para promover equidade e capacidade de resposta frente a emergências climáticas.



CAPÍTULO 7

Soluções para mitigação e adaptação



Mitigação: reduzindo as emissões de gases de efeito estufa por meio de fontes de energia renovável

A crescente concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE), resultante principalmente da queima de combustíveis fósseis, é a principal responsável pelo atual desequilíbrio climático global. Diante do consenso científico consolidado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), torna-se imperativo reduzir substancialmente essas emissões para evitar os cenários mais severos de aquecimento global. A mitigação, nesse contexto, refere-se ao conjunto de estratégias e políticas voltadas para reduzir ou evitar a emissão de GEE na atmosfera.



Entre as principais soluções tecnológicas e estruturais disponíveis, a substituição de fontes fósseis por fontes de energia renovável destaca-se como uma das medidas mais eficazes e amplamente defendidas pela comunidade científica. Este capítulo tem por objetivo discutir, com rigor técnico e científico, os fundamentos, potencialidades e limitações das principais fontes renováveis: solar, eólica, hídrica e geotérmica.

Energia solar

A energia solar é gerada pela conversão da radiação solar em eletricidade, geralmente por meio de painéis fotovoltaicos ou sistemas termossolares. Trata-se de uma fonte limpa, inesgotável em escala humana e com ampla disponibilidade geográfica, sobretudo em regiões tropicais e subtropicais.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), a energia solar é atualmente a fonte de eletricidade de crescimento mais rápido no mundo. Seus principais benefícios incluem:

- Baixa emissão de GEE durante a operação (zero em emissões diretas);
- Modularidade e descentralização, possibilitando a geração distribuída em residências, comércios e comunidades isoladas;
- Custos decrescentes, com preços do kWh fotovoltaico já competitivos com fontes fósseis em diversos países.

Entretanto, desafios técnicos ainda persistem, como a intermitência da geração (dependente da radiação solar) e a necessidade de sistemas de armazenamento ou redes inteligentes para garantir estabilidade e segurança energética.

Energia eólica

A energia eólica é obtida por meio da conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica, geralmente por aerogeradores em torres de grande porte instaladas em parques eólicos terrestres ou *offshore* (em alto-mar).

A energia eólica é, assim como a solar, uma fonte de emissão zero durante a operação, e possui uma das menores pegadas de carbono do ciclo de vida, mesmo considerando a fabricação e a instalação dos equipamentos (IPCC, 2022). Países como Dinamarca, Alemanha, China e Brasil vêm liderando a expansão da matriz eólica, especialmente por meio de políticas de incentivo e leilões de energia.

As principais vantagens incluem:

- Alta eficiência energética em locais com bom regime de ventos;
- Rapidez na instalação de parques eólicos;
- Menor consumo de água em comparação com fontes térmicas.

Por outro lado, limitações incluem:

- Intermitência e variabilidade da geração;
- Impactos sobre a fauna aviária e ruídos em áreas próximas a habitações;
- Desafios logísticos para instalações offshore e manutenção em ambientes marítimos.

Energia hidrelétrica

Historicamente a principal fonte renovável de eletricidade no mundo, a energia hidrelétrica é produzida a partir do aproveitamento do potencial hi-

dráulico de rios por meio de barragens e turbinas. Embora amplamente difundida, a energia hidrelétrica apresenta um paradoxo na agenda climática.

Do ponto de vista das emissões de carbono, as usinas hidrelétricas produzem energia com baixas emissões diretas. No entanto, em regiões tropicais, há evidências crescentes de que reservatórios hidrelétricos podem emitir quantidades significativas de metano (CH_4), um GEE com potencial de aquecimento 28 vezes maior que o do CO_2 devido à decomposição da matéria orgânica submersa (Barros *et al.*, 2011).

Entre os benefícios, destacam-se:

- Capacidade de armazenar energia (reservatórios), fornecendo estabilidade à rede elétrica;
- Flexibilidade operacional para compensar a variabilidade de outras fontes intermitentes (solar e eólica);
- Alta densidade energética em projetos bem localizados.

Contudo, os impactos socioambientais podem ser severos, especialmente em grandes empreendimentos na Amazônia e em outras regiões de alta biodiversidade, incluindo:

- Deslocamento de populações tradicionais;
- Alterações hidrológicas e perda de habitats aquáticos;
- Emissão de GEE nos primeiros anos de operação.

Energia geotérmica

A energia geotérmica é gerada pelo aproveitamento do calor interno da Terra, geralmente por meio da extração de vapor ou água quente de reservatórios subterrâneos para movimentar turbinas e gerar eletricidade.

É uma fonte altamente confiável e com fator de capacidade elevado (mais de 90%), ou seja, pode gerar energia de forma contínua, ao contrário de fontes intermitentes. A energia geotérmica é particularmente vantajosa em regiões com atividade vulcânica ou geotermal intensa, como Islândia, Indonésia, Filipinas e partes do oeste dos Estados Unidos.

Vantagens:

- Emissões extremamente baixas por unidade de energia gerada;
- Independência de condições meteorológicas;
- Aplicações também no aquecimento direto de edifícios, agricultura e processos industriais.

Desvantagens e desafios:

- Alta dependência de características geológicas locais;
- Custos iniciais elevados para perfuração e prospecção;
- Potencial liberação de gases como H₂S e traços de CO₂, embora em níveis baixos.

As fontes renováveis de energia oferecem um caminho viável, tecnicamente sólido e ambientalmente responsável para a mitigação das mudanças climáticas. A transição energética rumo a uma matriz baseada em energia limpa exige, no entanto, investimento maciço em infraestrutura, políticas públicas eficazes, inovação tecnológica e participação social.

Em termos estratégicos, a diversificação da matriz energética com base em solar, eólica, hídrica e geotérmica reduz a dependência de combustíveis fósseis, promove a segurança energética e contribui para o cumprimento das metas do Acordo de Paris, especialmente a limitação do aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais.

A conjugação dessas fontes, aliada ao desenvolvimento de tecnologias de armazenamento, redes inteligentes e eficiência energética, constitui um dos pilares fundamentais para um futuro climático estável e sustentável.

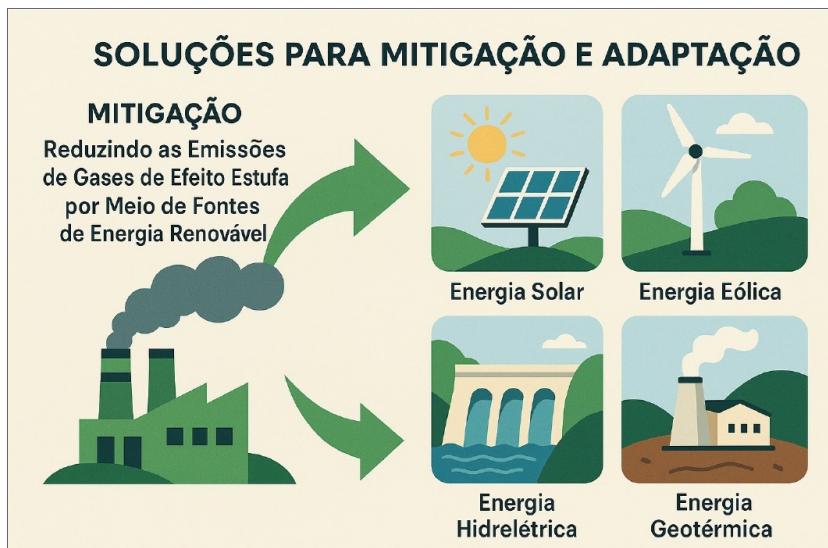


Figura 46. Apresenta estratégias de mitigação das mudanças climáticas por meio da substituição de fontes fósseis por energias renováveis. A mitigação é apresentada como um processo de redução das emissões de gases de efeito estufa, destacando quatro principais alternativas energéticas sustentáveis: energia solar, energia eólica, energia hidrelétrica e energia geotérmica. Essas fontes limpas contribuem para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e promovem um modelo energético de baixo carbono, essencial para o enfrentamento da crise climática global.

Eficiência energética e inovação tecnológica como vetores para a descarbonização

As transformações globais decorrentes das mudanças climáticas demandam uma reestruturação profunda dos sistemas de produção, consumo e geração de energia. Nesse cenário, a eficiência energética e a inovação tecnológica emergem como pilares estratégicos para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Diferentemente das fontes renováveis, que visam subs-

tituir os combustíveis fósseis, a eficiência energética propõe uma redução do consumo de energia sem comprometer o desempenho ou o conforto, enquanto a inovação tecnológica introduz novos paradigmas operacionais e industriais baseados em sustentabilidade, digitalização e baixo carbono.

Esta seção discute os fundamentos conceituais, as aplicações práticas e os desafios associados à eficiência energética e à inovação tecnológica, com base em evidências científicas e relatórios internacionais recentes, incluindo os do IPCC, da Agência Internacional de Energia (IEA) e da Comissão Europeia.

Eficiência energética: conceito e importância

A eficiência energética é definida como a relação entre a quantidade de energia utilizada em um processo e o serviço energético obtido. Em outras palavras, trata-se da capacidade de realizar uma determinada atividade com o menor gasto energético possível. Diferentemente do simples racionamento, a eficiência energética visa otimizar o uso da energia, promovendo economia e sustentabilidade simultaneamente.

De acordo com a IEA (2022), medidas de eficiência energética poderiam ser responsáveis por cerca de 40% da redução necessária nas emissões globais até 2050, conforme os cenários Net Zero. Isso se dá por meio de diversas frentes:

- Isolamento térmico de edificações e design passivo;
- Substituição de equipamentos obsoletos por tecnologias de baixo consumo (por exemplo: motores elétricos de alta eficiência, iluminação LED);
- Otimização de processos industriais com recuperação de calor, automação e cogeração;
- Gestão inteligente da demanda energética em setores urbanos e residenciais.

Além de reduzir as emissões, a eficiência energética proporciona benefícios

econômicos diretos, como a diminuição de custos operacionais e a redução da dependência de fontes fósseis importadas.

Inovação tecnológica como vetor de sustentabilidade

A inovação tecnológica aplicada à transição energética não se limita à substituição de equipamentos antigos por versões mais modernas. Trata-se de uma mudança paradigmática que envolve digitalização, eletrificação, descentralização e descarbonização dos sistemas energéticos. Entre as tecnologias emergentes mais relevantes, destacam-se:

■ Smart grids e digitalização da rede

As redes inteligentes (*smart grids*) integram sensores, algoritmos, armazenamento e comunicação em tempo real para gerenciar eficientemente a produção, distribuição e o consumo de energia. Com isso, é possível incorporar uma maior participação de fontes intermitentes, como solar e eólica, além de promover respostas automatizadas à demanda (*demand-side response*).

■ Armazenamento de energia

O avanço das tecnologias de baterias, especialmente de íons de lítio, está revolucionando a capacidade de armazenar energia renovável para uso posterior, atenuando os efeitos da intermitência e permitindo maior flexibilidade à rede elétrica. Além disso, tecnologias como hidrogênio verde e baterias de estado sólido estão em rápida evolução.

■ Eletrificação de setores difíceis de descarbonizar

O setor de transportes e partes da indústria pesada têm apresentado grande resistência à descarbonização. A inovação em veículos elétricos, hidrogênio para transporte pesado, eletrolisadores eficientes e aquecimento por bomba de calor está abrindo novas possibilidades de eletrificação nesses setores.

- **Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)**

A CCUS refere-se ao conjunto de tecnologias que capturam CO₂ das fontes de emissão ou diretamente da atmosfera e o armazenam em formações geológicas ou o reutilizam em processos industriais. Embora ainda incipiente, sua aplicação pode ser crucial em setores de emissões difíceis de evitar, como a produção de cimento e aço (IEA, 2023).

Sinergias entre eficiência e inovação

É fundamental compreender que a eficiência energética e a inovação tecnológica não são estratégias concorrentes, mas complementares. A adoção de tecnologias disruptivas deve vir acompanhada de uma cultura de uso racional da energia, incorporando padrões de consumo mais sustentáveis.

A interseção entre eficiência e inovação é evidente em setores como:

- Construção civil, com edifícios de energia quase zero (NZEBs);
- Indústria 4.0, na qual sensores e inteligência artificial otimizam o uso de recursos;
- Agricultura de precisão, que emprega dados climáticos e geoespaciais para reduzir insumos e emissões;
- Cidades inteligentes, que integram mobilidade elétrica, iluminação eficiente e planejamento urbano sustentável.

”

[...] trata-se da capacidade de realizar uma determinada atividade com o menor gasto energético possível.

Desafios e perspectivas futuras

Apesar do progresso observado, diversos desafios ainda limitam a plena adoção de soluções baseadas em eficiência e inovação:

- Custos iniciais elevados e barreiras ao financiamento em países em desenvolvimento;
- Falta de capacitação técnica para operar e manter tecnologias avançadas;
- Ausência de regulamentações e incentivos consistentes em muitos mercados;
- Questões geopolíticas associadas à cadeia de suprimentos de minerais críticos, como lítio, cobalto e terras raras.

Para que essas tecnologias cumpram seu papel na luta contra as mudanças climáticas, é essencial o estabelecimento de políticas públicas robustas, incentivos fiscais e marcos regulatórios adequados, além de investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D+I).

A eficiência energética e a inovação tecnológica constituem alicerces fundamentais na trajetória rumo a uma economia de baixo carbono. Reduzir as perdas energéticas, otimizar processos e incorporar tecnologias disruptivas são estratégias que se traduzem, simultaneamente, em benefícios climáticos, econômicos e sociais.

Como destaca o IPCC (2023), não há solução única para a crise climática, mas a combinação estratégica de medidas – com ênfase na eficiência e inovação – oferece um caminho viável para manter o aumento da temperatura global abaixo dos limiares críticos. A integração dessas abordagens nos setores produtivos, urbanos e residenciais é, portanto, condição *sine qua non* para a sustentabilidade planetária e o bem-estar das futuras gerações.

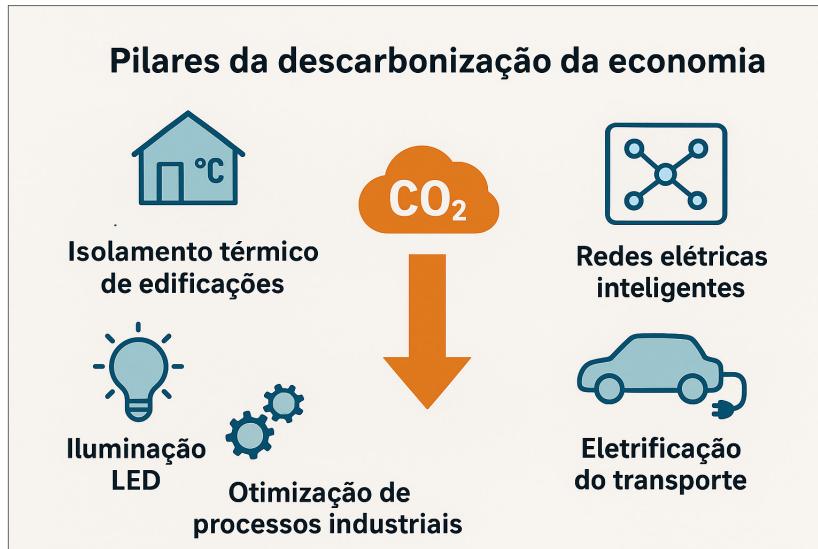


Figura 47. Mostra os dois pilares fundamentais para a descarbonização da economia: a eficiência energética e a inovação tecnológica. No campo da eficiência energética, destacam-se ações como o isolamento térmico de edificações, o uso de iluminação LED e de equipamentos eficientes, a otimização de processos industriais e a gestão inteligente da demanda elétrica. No eixo da inovação tecnológica, a figura ilustra o papel das redes elétricas inteligentes (*smart grids*) e da digitalização, bem como a eletrificação do transporte como alternativa aos veículos movidos a combustíveis fósseis. Esses vetores são essenciais para reduzir as emissões de CO₂ e mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

Políticas e regulamentações ambientais: o Acordo de Paris e a governança multiescalar da ação climática

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios transnacionais da atualidade, exigindo respostas coordenadas em múltiplas escalas de governança. Frente à complexidade inerente à mitigação e adaptação climáticas, os instrumentos de política ambiental – tanto os internacionais quanto os nacionais e subnacionais – tornaram-se essenciais para direcionar o comportamento de Estados, empresas e cidadãos. Esta seção analisa os marcos regulatórios que moldam a governança climática contemporânea, com ênfase no Acordo de Paris, complementando com as ações nacionais (como os Planos

Nacionais de Mitigação e Adaptação) e iniciativas locais que ampliam a resiliência territorial e reduzem as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

O Acordo de Paris: um marco diplomático global

Contexto histórico e assinatura

Adotado durante a 21^a Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o Acordo de Paris, firmado em dezembro de 2015, representou um avanço sem precedentes na governança ambiental internacional. Diferentemente do Protocolo de Kyoto (1997), que impunha metas apenas aos países desenvolvidos, o Acordo de Paris estabeleceu compromissos universalmente aplicáveis, ainda que diferenciados, em um modelo de contribuições nacionalmente determinadas (as chamadas *Nationally Determined Contributions* – NDCs).

O principal objetivo do acordo é conter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para limitá-lo a 1,5°C (IPCC, 2018). Para isso, os países signatários devem:

- Submeter NDCs com metas progressivamente mais ambiciosas a cada cinco anos;
- Promover resiliência climática e adaptação;
- Reforçar mecanismos de transparência e prestação de contas.

Principais instrumentos do acordo

Entre os elementos centrais do Acordo de Paris, destacam-se:

- O balanço global (*global stocktake*), que ocorre a cada cinco anos, avaliando o progresso coletivo em direção aos objetivos do acordo;
- O mecanismo de perdas e danos (*loss and damage*), voltado ao apoio de países vulneráveis diante de impactos climáticos irreversíveis;
- A mobilização financeira climática, com o compromisso de que países desenvolvidos forneçam US\$ 100 bilhões anuais para financiamento climático em países em desenvolvimento.

Embora juridicamente vinculante em sua adesão, o Acordo de Paris não impõe sanções automáticas para o não cumprimento das NDCs, operando em uma lógica de pressão política, transparência e engajamento progressivo (*ratcheting mechanism*).

Ações nacionais: planejamento climático e governança interna

NDCs e Políticas Nacionais Integradas

Cada país signatário é responsável por definir sua NDC, compatibilizando suas realidades econômicas, sociais e ambientais com as metas globais. Essas contribuições englobam tanto metas de mitigação (redução de emissões) quanto ações de adaptação (resiliência e redução de vulnerabilidades).

No Brasil, a NDC atualizada (2022) compromete-se a reduzir as emissões de GEE em 50% até 2030 e atingir a neutralidade climática até 2050. Os principais instrumentos que sustentam esse compromisso incluem:

- O Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituído pela Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009);
- O Sistema Nacional de Informações sobre Mudança do Clima (SINAMC);
- Setores estratégicos como o combate ao desmatamento, a promoção de bioenergia e o aumento da eficiência energética.

Contudo, lacunas persistem, sobretudo no que tange à implementação efetiva, à coordenação interministerial e à integração das políticas climáticas com o planejamento econômico de longo prazo.

Desafios para a governança nacional

Entre os obstáculos recorrentes enfrentados por diversos países, destacam-se:

- Incertezas políticas e mudanças de governo, que podem comprometer a continuidade das ações climáticas;
- Conflitos entre interesses ambientais e econômicos, como observado no caso da expansão da fronteira agropecuária em detrimento da conservação florestal;
- Falta de recursos financeiros e técnicos para o monitoramento e a fiscalização ambiental.

Ações locais e subnacionais: cidades e estados na linha de frente

Com mais da metade da população mundial vivendo em áreas urbanas, as cidades tornaram-se epicentros das emissões, mas também protagonistas na mitigação climática. Iniciativas municipais e estaduais têm se mostrado particularmente inovadoras, preenchendo lacunas deixadas pelas esferas superiores de governo.

Exemplos de liderança subnacional

Cidades C40: rede internacional que congrega cidades comprometidas com a neutralidade de carbono, como São Paulo, Paris e Tóquio, promovendo soluções integradas de transporte público, planejamento urbano e resíduos sólidos.

Pactos Climáticos estaduais: diversos estados norte-americanos, como Ca-

lifórnia e Nova Iorque, estabeleceram metas próprias de neutralidade de carbono, mesmo em períodos de recuo federal quanto à agenda climática.

Consórcios intermunicipais: o Brasil e a América Latina têm desenvolvido planos regionais de adaptação, gestão de risco climático e educação ambiental comunitária.

Instrumentos municipais de ação climática

Em nível local, destacam-se os seguintes instrumentos:

- Planos de Ação Climática (PACs);
- Inventários municipais de emissões de GEE;
- Regulamentações urbanísticas voltadas à resiliência climática (por exemplo: incentivo à arborização urbana, normas para edificações sustentáveis);
- Educação ambiental como política pública integrada ao currículo escolar.

A governança climática contemporânea é caracterizada por uma arquitetura multinível, na qual acordos internacionais, como o Acordo de Paris, fornecem o arcabouço global, mas a eficácia das ações depende da implementação nacional e do engajamento local. O sucesso na mitigação e adaptação climática requer coerência entre políticas públicas, financiamento adequado, inovação tecnológica e participação social.

Para além dos compromissos formais, é necessário um engajamento contínuo dos governos, da sociedade civil e do setor privado para a transformação estrutural dos sistemas produtivos e de consumo. O fortalecimento da governança ambiental, com mecanismos de monitoramento e transparência robustos, será determinante para que as promessas do Acordo de Paris sejam convertidas em realidade concreta – e para que o planeta permaneça habitável para as futuras gerações.



Figura 48. Mostra os principais elementos do Acordo de Paris, um marco diplomático global no enfrentamento das mudanças climáticas. O acordo visa limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C, fortalecer a resiliência climática e exigir a submissão periódica das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs). Os instrumentos do acordo incluem a elaboração de planos climáticos nacionais, políticas públicas integradas e ações voltadas a setores estratégicos, como o combate ao desmatamento. Também são destacados mecanismos de balanço global, gestão de perdas e danos e financiamento climático. Além disso, enfatiza-se o papel central das ações locais e subnacionais, com cidades e estados liderando iniciativas como planos de ação climática, inventários de gases de efeito estufa (GEE) e regulamentações urbanísticas.

O papel dos indivíduos na mitigação das mudanças climáticas: estilo de vida, consumo consciente e responsabilidade cidadã

As mudanças climáticas são frequentemente percebidas como desafios sistêmicos que exigem grandes intervenções governamentais e transformações estruturais nos setores produtivos. No entanto, há um consenso crescente na literatura científica de que o comportamento individual — especialmente em sociedades de consumo elevado — desempenha papel relevante na trajetória

das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2022). Esta seção discute como escolhas cotidianas de consumo, padrões de mobilidade, alimentação, uso de energia e engajamento cívico podem contribuir significativamente para a mitigação climática, sem perder de vista os limites e desigualdades que permeiam essas ações.

O consumo consciente como estratégia climática

O consumo consciente é definido como a prática deliberada de escolhas pautadas por critérios éticos, ecológicos e sociais. No contexto climático, isso implica priorizar produtos e serviços de baixo carbono, reduzir o desperdício, reutilizar materiais e apoiar cadeias produtivas sustentáveis (Lorek; Fuchs, 2013).

Estudos indicam que o consumo doméstico responde por mais de 60% das emissões globais de GEE, considerando a cadeia completa de bens e serviços (Ivanova *et al.*, 2016). Itens como carne bovina, viagens aéreas, combustíveis fósseis para veículos particulares e eletrônicos com baixa durabilidade figuram entre os mais intensivos em carbono.

Assim, práticas como as seguintes têm potencial considerável de mitigação, quando somadas a nível populacional:

- Redução do consumo de carne vermelha (adotar dietas baseadas em vegetais);
- Preferência por transporte público, bicicleta ou mobilidade ativa;
- Diminuição do uso de plásticos descartáveis e embalagens não recicláveis;
- Adoção de eletrodomésticos eficientes e energia renovável residencial.

Mudança no estilo de vida: descarbonização cotidiana

A mudança climática está profundamente enraizada em estilos de vida baseados em alta mobilidade, consumo ilimitado e crescente digitalização. A transição para uma cultura de baixo carbono exige alterações nos valores so-

ciais, nas normas de status e no que se entende como “qualidade de vida” (Stern, 2000; Jackson, 2011).

Entre as ações individuais com maior potencial de redução de emissões, destacam-se (Wynes; Nicholas, 2017):

- Ter menos filhos (medida de longo prazo, polêmica e contextual);
- Abster-se de voos de avião frequentes (principal fonte de emissão pessoal para elites econômicas);
- Viver sem carro ou usar veículos elétricos;
- Reduzir o consumo de bens materiais, priorizando experiências e produtos duráveis;
- Utilizar eletricidade proveniente de fontes renováveis.

Essas ações não apenas reduzem as emissões, como também geram benefícios colaterais à saúde, como menor exposição à poluição do ar, melhoria do bem-estar físico e mental e alimentação mais equilibrada.

Ações coletivas, engajamento cívico e pressão social

Ainda que as escolhas individuais sejam relevantes, seu impacto é amplificado quando ocorrem de forma coletiva e coordenada. O engajamento em movimentos sociais, organizações de base, campanhas por justiça climática e participação em processos decisórios locais são maneiras de exercer cidadania climática (Dobson, 2007).

Além disso, pressões organizadas de consumidores têm levado empresas e governos a revisar práticas ambientais. Exemplos disso são boicotes a marcas poluentes, apoio a cooperativas de energia limpa ou exigência de transparência climática em produtos e serviços.

A literatura demonstra que indivíduos informados, quando empoderados e

em rede, funcionam como catalisadores sociais de mudança institucional (Otto *et al.*, 2020). Esse fenômeno é especialmente relevante em democracias, nas quais a opinião pública molda decisões políticas.



Limites estruturais e considerações éticas

É importante, contudo, reconhecer os limites da abordagem centrada no indivíduo. Grande parte da população mundial vive em contextos de pobreza, desigualdade ou insegurança alimentar, em que o consumo é restrito e a capacidade de fazer escolhas “sustentáveis” é reduzida ou inexistente.

Além disso, cerca de 10% da população global é responsável por mais da metade das emissões, enquanto os 50% mais pobres respondem por menos de 10% (Chancel *et al.*, 2022). Essa disparidade impõe a necessidade de uma justiça climática distributiva, na qual os maiores emissores individuais (em geral, pertencentes a elites urbanas e industriais) assumam a responsabilidade proporcional por suas pegadas ecológicas.

Portanto, é crucial que ações individuais sejam compreendidas como parte de uma transição maior, orientada por políticas públicas, incentivos econômicos, infraestrutura verde e educação ambiental.

As mudanças climáticas exigem transformações em múltiplos níveis. Enquanto governos e corporações detêm poder estrutural, os indivíduos — especialmente nos países mais ricos e industrializados — podem desempenhar papel significativo ao modificar seus padrões de consumo e estilo de vida, pressionar por mudanças institucionais e construir uma cultura de responsabilidade ecológica.

”

[...] é crucial que ações individuais sejam compreendidas como parte de uma transição maior, orientada por políticas públicas, incentivos econômicos, infraestrutura verde e educação ambiental.

O consumo consciente, aliado ao engajamento coletivo, pode impulsionar a transição para uma sociedade mais justa, resiliente e sustentável. No entanto, essas mudanças devem ser acompanhadas de políticas públicas inclusivas, que permitam às populações mais vulneráveis também participar e se beneficiar da luta contra a crise climática.

Transformações comportamentais como estratégia para a redução da pegada de carbono

A superação dos desafios impostos pelas mudanças climáticas exige, além de soluções tecnológicas e políticas públicas eficazes, profundas transformações nos padrões de comportamento humano, tanto em nível individual quanto coletivo. A noção de “pegada de carbono” — indicador que quantifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas a atividades cotidianas — tornou-se uma métrica essencial para mensurar e orientar tais mudanças. Esta seção examina as principais estratégias de mudança comportamental voltadas à redução da pegada de carbono, discutindo os fundamentos científicos, as barreiras psicossociais e os mecanismos de engajamento individual e coletivo.

A pegada de carbono: conceito e aplicações

A pegada de carbono representa a soma das emissões de GEE, expressas em equivalentes de dióxido de carbono (CO₂), geradas direta ou indiretamente pelas atividades humanas, como transporte, consumo de energia, alimentação, vestuário e descarte de resíduos (Wiedmann; Minx, 2008). Tal indicador tornou-se uma ferramenta valiosa para:

- Avaliar o impacto ambiental de indivíduos, organizações e políticas públicas;
- Promover a consciência ecológica;
- Estimular decisões sustentáveis de consumo.

Em termos globais, setores como o transporte motorizado individual, o consumo de carne bovina e o uso de eletricidade oriunda de fontes fósseis estão entre os principais responsáveis por emissões atribuíveis a escolhas individuais.

Determinantes psicológicos e sociais do comportamento ambiental

Compreender o comportamento ambiental requer uma abordagem interdisciplinar que envolva a psicologia, a sociologia e as ciências ambientais. Entre os principais determinantes, destacam-se:

- Valores e normas sociais: pessoas que valorizam a biosfera, o bem-estar coletivo e a justiça intergeracional tendem a adotar comportamentos pró-ambientais com mais frequência (Stern, 2000).
- Percepção de eficácia: a crença de que ações individuais são eficazes na mitigação das mudanças climáticas é decisiva para o engajamento.
- Conhecimento ambiental e letramento climático: compreender os mecanismos científicos do efeito estufa, bem como as consequências do consumo, é fundamental para mudanças comportamentais duradouras.
- Influência social: normas descriptivas (o que os outros fazem) e injuntivas (o que os outros aprovam) moldam fortemente o comportamento coletivo.

Mudanças individuais para a redução da pegada de carbono

Pesquisas demonstram que mudanças específicas nos estilos de vida podem gerar reduções significativas nas emissões de CO₂. Entre as ações de maior impacto, destacam-se:

Alimentação

- Substituição de carnes vermelhas por proteínas vegetais ou carnes de menor impacto (aves, peixes);
- Redução do desperdício de alimentos;
- Valorização de produtos locais e sazonais, que evitam emissões do transporte de longa distância.

Mobilidade

- Substituição do automóvel por transporte público, bicicleta ou caminhadas;
- Compartilhamento de veículos e uso de modais elétricos;
- Redução de viagens aéreas, especialmente de curta distância.

Consumo de energia

- Instalação de painéis solares fotovoltaicos e uso de fontes renováveis;
- Substituição de eletrodomésticos antigos por modelos com alta eficiência energética (selo *Procel* ou *Energy Star*);
- Práticas de economia de energia: desligar luzes, ajustar termostatos, utilizar iluminação natural.

Estilo de vida e consumo

- Redução do consumo de produtos supérfluos ou altamente industrializados;
- Adoção de práticas de economia circular: reutilizar, reciclar, reparar;
- Escolhas conscientes de vestuário (moda sustentável) e moradia (edificações de baixo impacto).



Redução da pegada de carbono



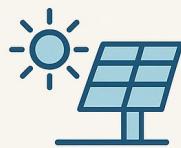
ALIMENTAÇÃO

Substituir carnes vermelhas por fontes vegetais de proteína



MOBILIDADE

Preferir meios de transporte sustentáveis



CONSUMO DE ENERGIA

Instalar painéis solares e gerar energia limpa



ESTILO DE VIDA E CONSUMO

Reducir o uso de recursos e consumir de forma mais sustentável



Figura 49. Apresenta estratégias práticas para a redução da pegada de carbono individual, destacando quatro eixos principais de ação: alimentação – incentiva a substituição de carnes vermelhas por fontes vegetais de proteína, visando reduzir as emissões associadas à pecuária; mobilidade – sugere a preferência por meios de transporte sustentáveis, como transporte público e bicicleta, para minimizar a emissão de gases de efeito estufa; consumo de energia – promove a instalação de painéis solares como forma de gerar energia limpa e reduzir a dependência de fontes fósseis; estilo de vida e consumo – estimula a adoção de um consumo mais consciente e sustentável, com redução no uso de recursos e incentivo à eficiência energética. A figura reforça a importância da mudança de hábitos individuais como parte das ações coletivas contra a crise climática.



Figura 50. Mostra estratégias para a redução da pegada de carbono individual, divididas em três eixos principais: alimentação – incentiva a substituição de carnes vermelhas por proteínas vegetais ou carnes de menor impacto ambiental (como aves e peixes), a redução do desperdício de alimentos e a valorização de produtos locais e sazonais; mobilidade – propõe a substituição do automóvel por transporte público, bicicleta ou caminhadas, além do compartilhamento de veículos e uso de modais elétricos, além de destacar a importância da redução de viagens aéreas como forma de mitigar emissões de carbono; estilo de vida e consumo – orienta para a diminuição do consumo de produtos supérfluos ou de alto impacto ambiental e para a adoção de práticas baseadas na economia circular, promovendo um modo de vida mais sustentável. Essa abordagem enfatiza como mudanças simples nos hábitos cotidianos podem contribuir de forma significativa para o enfrentamento da crise climática.

A dimensão coletiva: comunidades, movimentos sociais e governança participativa

Embora ações individuais sejam necessárias, mudanças estruturais em larga escala exigem mobilização coletiva. Ações coordenadas por comunidades, organizações não governamentais e movimentos sociais têm potencial de amplificar os efeitos positivos, além de influenciar políticas públicas. Exemplos incluem:

- Campanhas de descarbonização comunitária, como hortas urbanas, caronas solidárias e cooperativas de energia renovável;
- Movimentos juvenis pelo clima (por exemplo: *Fridays for Future*), que têm catalisado pressão sobre tomadores de decisão;
- Programas educacionais e de engajamento, que envolvem escolas, universidades e centros culturais.

Além disso, a adoção de instrumentos de governança participativa, como orçamentos climáticos locais e conselhos comunitários de sustentabilidade, pode reforçar o protagonismo social na tomada de decisões ambientais.

Barreiras e oportunidades

Apesar do crescente interesse por comportamentos sustentáveis, diversas barreiras estruturais e culturais dificultam sua ampla adoção. Entre elas:

- Falta de acesso a alternativas sustentáveis (por exemplo: transporte público de qualidade, alimentos orgânicos a preços acessíveis);
- Desigualdades socioeconômicas, que limitam escolhas e priorizam necessidades imediatas;
- *Greenwashing* e desinformação climática, que confundem consumidores e minam a confiança em soluções reais.

Contudo, oportunidades emergentes incluem o avanço das tecnologias verdes, os incentivos econômicos à eficiência energética e o crescente envolvimento de empresas e governos em programas de sustentabilidade corporativa e responsabilidade climática.

Reducir a pegada de carbono por meio de mudanças comportamentais é

não apenas possível, como necessário, e deve ser considerado um pilar complementar às estratégias tecnológicas e regulatórias. O sucesso dessa abordagem depende do reconhecimento de que as escolhas individuais estão inseridas em contextos sociais, econômicos e culturais específicos, o que requer políticas públicas de apoio, infraestrutura sustentável e educação ambiental de qualidade.

- A mudança climática é, em essência, um problema coletivo — e sua solução exigirá consciência, corresponsabilidade e ação conjunta em todas as esferas da sociedade. Estimular comportamentos sustentáveis não significa transferir a culpa do colapso climático para os indivíduos, mas, sim, empoderá-los para atuar como agentes de transformação na construção de um futuro climático mais justo e habitável.

”

Embora ações coletivas
sejam necessárias,
mudanças estruturais em larga escala
exigem mobilização coletiva.

Adaptação: preparando-se para o futuro

Infraestruturas resilientes, cidades sustentáveis e zonas costeiras

Com o agravamento das mudanças climáticas, a adaptação tornou-se um imperativo tão importante quanto a mitigação. Enquanto a mitigação visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), a adaptação climática busca diminuir a vulnerabilidade humana e ecológica aos impactos que já estão em curso ou que são inevitáveis. O aumento da frequência e intensidade de eventos extremos — como enchentes, secas, ondas de calor e elevação do nível do mar — impõe desafios sem precedentes para os sistemas urbanos, infraestruturas e populações costeiras. Nesse contexto, a construção de infraestruturas resilientes e o planejamento de cidades sustentáveis surgem como estratégias centrais para garantir a segurança, a funcionalidade e o bem-estar humano em um cenário climático em constante transformação.

O conceito de infraestrutura resiliente

Infraestruturas resilientes são sistemas projetados, mantidos e adaptados para resistir, absorver e recuperar-se rapidamente de impactos adversos. Segundo o IPCC (2022), a resiliência de infraestruturas deve abranger aspectos físicos, institucionais e sociais, incluindo:

- Redundância: presença de componentes alternativos para garantir a funcionalidade durante falhas;
- Flexibilidade: capacidade de adaptação a novas condições;
- Inclusão: integração de populações vulneráveis no planejamento e resposta a desastres;
- Capacidade de recuperação: tempo e eficiência para retornar à normalidade.

A aplicação prática desses princípios pode ser observada na construção de bairros com sistemas de drenagem pluvial descentralizados, edificações com isolamento térmico passivo e infraestruturas energéticas descentralizadas, como microrredes baseadas em fontes renováveis.

Cidades sustentáveis e adaptativas

As cidades concentram hoje mais da metade da população mundial e respondem por aproximadamente 70% das emissões globais de GEE (UN-Habitat, 2020). No entanto, também oferecem oportunidades significativas para inovação e adaptação. O conceito de cidade sustentável abrange não apenas a redução do impacto ambiental, como também o aumento da resiliência climática e a promoção da justiça social. Entre os elementos fundamentais para a adaptação urbana, destacam-se:

- Infraestrutura verde e azul: sistemas urbanos de vegetação (telhados verdes, corredores ecológicos, parques) e corpos d'água (rios, canais, áreas alagáveis) que atenuam inundações e regulam o microclima;
- Mobilidade urbana resiliente: redes de transporte público integradas, seguras e de baixa emissão, que permanecem funcionais mesmo em eventos extremos;
- Habitação climática: edificações projetadas para resistir a condições adversas (ventilação natural, isolamento térmico, elevação contra alagamentos);
- Planejamento participativo e governança adaptativa: processos decisórios que incluem múltiplos atores sociais e incorporam o conhecimento local e tradicional.

Cidades como Roterdã (Holanda), Copenhague (Dinamarca) e Curitiba (Brasil) têm se destacado pela incorporação de estratégias adaptativas inovadoras,

servindo de modelo para centros urbanos em regiões vulneráveis, incluindo zonas costeiras tropicais.

Proteção das zonas costeiras: uma prioridade global

As zonas costeiras, que abrigam cerca de 40% da população mundial, estão entre os ecossistemas mais ameaçados pelas mudanças climáticas, sobretudo pela elevação do nível do mar, erosão costeira, intrusão salina e eventos extremos, como tempestades tropicais (Nicholls; Cazenave, 2010). A proteção dessas regiões exige estratégias integradas de curto, médio e longo prazo, tais como:

a) Soluções Baseadas na Natureza (SbN)

- Recuperação de manguezais, recifes de coral e marismas: além de fornecerem proteção natural contra tempestades e alagamentos, esses ecossistemas sequestram carbono e sustentam biodiversidade;
- Restabelecimento de dunas e vegetação costeira: barreiras naturais contra a erosão e o avanço do mar.

b) Infraestruturas híbridas e engenharia costeira

- Diques, barreiras móveis e quebra-mares: utilizados para conter tempestades e marés extremas, embora muitas vezes sejam caros e ambientalmente impactantes;
- Infraestruturas híbridas que combinam soluções técnicas com vegetação nativa (por exemplo: diques verdes), reduzindo o impacto ambiental e aumentando a eficácia a longo prazo.

c) Planejamento territorial adaptativo

- Zonamento costeiro com base em risco climático;
- Realocação planejada de populações em áreas de risco extremo;
- Regulamentações de uso do solo que evitam novas ocupações em zonas vulneráveis.

Essas ações devem ser orientadas por dados científicos robustos, como projeções de elevação do nível do mar, modelagens de risco de inundação e mapas de vulnerabilidade socioambiental.



Figura 51. Traz a dimensão coletiva da ação climática, evidenciando o papel essencial das comunidades, movimentos sociais e da governança participativa na construção de soluções sustentáveis para o enfrentamento da crise climática. São apresentados quatro eixos principais: campanhas de descarbonização comunitária – iniciativas locais que incentivam práticas sustentáveis, como hortas urbanas e uso de energias renováveis, promovendo a redução das emissões de carbono de forma colaborativa; movimentos juvenis pelo clima – representados por grupos como o *Fridays for Future*, esses movimentos protagonizam mobilizações globais e exigem ação climática urgente por parte de governos e empresas, fortalecendo a conscientização coletiva; programas educacionais e de engajamento – ações voltadas para a educação ambiental e o engajamento cívico da população, essenciais para capacitar cidadãos a atuarem em defesa do clima; instrumentos de governança participativa – ferramentas que viabilizam a participação democrática da sociedade na formulação de políticas públicas, assegurando que diferentes vozes e interesses sejam considerados nos processos decisórios relacionados ao clima. A figura reforça que enfrentar as mudanças climáticas requer não apenas ações individuais e governamentais, como também o engajamento coletivo e a atuação coordenada de todos os setores da sociedade.

Planos de emergência e estratégias de resposta a desastres naturais

O aumento da frequência e intensidade de desastres naturais, como inundações, secas extremas, ciclones tropicais, ondas de calor e deslizamentos de terra, representa uma das expressões mais visíveis e impactantes das mudanças climáticas. Esses eventos climáticos extremos comprometem vidas humanas, infraestrutura crítica, segurança alimentar, abastecimento de água, além de afetarem desproporcionalmente populações vulneráveis em regiões periféricas e costeiras.

Nesse contexto, o desenvolvimento de planos de emergência e estratégias de resposta torna-se um componente vital das políticas de adaptação climática e de gestão de riscos de desastres (GRD). Esses instrumentos integram ações preventivas, de preparação, resposta rápida e recuperação, requerendo coordenação entre governos, sociedade civil, comunidades locais e organismos internacionais.

Desastres naturais e a escala de impacto climático

Desastres naturais são eventos súbitos que resultam em sérios danos à sociedade e ao meio ambiente. Embora tenham causas naturais, sua magnitude e consequências são amplificadas pela vulnerabilidade socioeconômica e pela exposição geográfica das populações.

As mudanças climáticas não criam novos tipos de desastres, mas agravam sua frequência, duração e intensidade. De acordo com o Relatório de Avaliação do IPCC (2021), a ocorrência de eventos extremos associados ao aquecimento global, como chuvas torrenciais e secas severas, tende a se intensificar mesmo em cenários de mitigação moderada.

Estruturação de planos de emergência

Um plano de emergência climática é um instrumento multidisciplinar que

antecipa possíveis riscos, organiza recursos e estabelece protocolos de ação coordenada. Os principais elementos que o compõem incluem:

Avaliação de riscos e mapeamento de áreas vulneráveis

A identificação de áreas suscetíveis a alagamentos, escorregamentos, incêndios florestais ou escassez hídrica é essencial para a elaboração de planos eficazes. O uso de sistemas de informação geográfica (SIG), sensores remotos e modelagem climática permite elaborar mapas de risco e vulnerabilidade socioambiental em alta resolução (Cutter *et al.*, 2003).

Monitoramento e sistemas de alerta precoce

Sistemas de alerta precoce (SAP) integram dados meteorológicos, hidrológicos e oceanográficos em tempo real para alertar comunidades e autoridades sobre a iminência de eventos extremos. Para serem efetivos, esses sistemas devem ser tecnicamente robustos, acessíveis e culturalmente adequados, garantindo que a informação chegue a todos, inclusive a populações marginalizadas.

Protocolos de evacuação e abrigamento temporário

A definição prévia de rotas de evacuação, pontos de encontro, centros de acolhimento e unidades de saúde é essencial para uma resposta rápida e coordenada. A logística deve considerar populações em situação de vulnerabilidade, como crianças, idosos, pessoas com deficiência e comunidades indígenas.

Planejamento intersetorial e treinamento

Planos de emergência bem-sucedidos requerem capacitação técnica contínua dos atores envolvidos, incluindo bombeiros, defesa civil, profissionais da saúde, gestores municipais e lideranças comunitárias. A realização de simulados e exercícios interinstitucionais aumenta a capacidade de resposta e reduz o tempo de reação durante o desastre.

Estratégias de resposta e recuperação pós-desastre

A resposta eficaz a desastres naturais deve ser imediata e coordenada, abrangendo os seguintes eixos:

Mobilização de recursos e assistência humanitária

O fornecimento de alimentos, água potável, medicamentos, abrigo e energia deve ocorrer de maneira organizada e segura. O uso de plataformas digitais para o rastreamento de doações e a coordenação entre agências pode melhorar significativamente a eficiência da resposta.

Reabilitação de infraestruturas e serviços essenciais

Após o evento é necessário reconstruir estradas, pontes, redes de energia e saneamento, com enfoque em soluções mais resilientes. A reconstrução deve seguir os princípios do Build Back Better (ONU, 2015), ou seja, reerguer de forma mais segura, sustentável e inclusiva.

Apoio psicossocial e reintegração comunitária

O impacto de desastres sobre a saúde mental das populações afetadas é frequentemente negligenciado. Políticas públicas devem incorporar o cuidado psicossocial às estratégias de recuperação, além de incentivar a participação das comunidades no processo de reconstrução, promovendo autonomia e coesão social.

Marcos normativos e governança de desastres

A gestão de desastres é amparada por marcos normativos nacionais e internacionais. Entre os principais, destacam-se:

- **Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres (2015-2030):** documento global que orienta ações de prevenção, preparação e resposta.

- **Lei nº 12.608/2012 (Brasil):** institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, priorizando a prevenção e a preparação.
- **Planos de contingência municipais e estaduais:** instrumentos de planejamento local obrigatórios em áreas de risco.

A articulação entre os diferentes níveis de governo (federal, estadual, municipal), bem como a cooperação internacional, é crucial para a efetividade das respostas. A descentralização, entretanto, exige fortalecimento institucional nos municípios, especialmente no que se refere à capacidade técnica e orçamentária.

O agravamento dos eventos climáticos extremos exige um redimensionamento das estratégias de gestão de desastres, em que os planos de emergência não sejam apenas reativos, mas estruturados a partir da ciência, da equidade e da justiça climática. A integração de saberes locais, tecnologias emergentes e políticas públicas efetivas é vital para proteger vidas humanas e reduzir as perdas econômicas e ecológicas.

Investir em resiliência territorial, por meio de educação comunitária, infraestrutura adaptativa e planejamento participativo, é mais eficiente e menos oneroso do que lidar apenas com os impactos após o desastre. Assim, preparar-se hoje é a melhor forma de evitar tragédias amanhã.

Educação e conscientização climática: pilar da transição socioambiental

A crise climática é, em essência, uma crise de percepção, compreensão e ação coletiva. Embora os avanços da ciência tenham delineado de forma inequívoca a influência humana sobre o clima, a efetiva resposta global às mudanças climáticas permanece limitada por fatores socioculturais, políticos e educacionais. Nesse contexto, a educação climática surge como um vetor estratégico e estruturante para a construção de sociedades resilientes, informadas e capazes de agir frente aos desafios da sustentabilidade planetária.

A alfabetização climática – entendida como a capacidade de compreender os processos climáticos, identificar seus impactos e agir para mitigá-los e adaptá-los – é um dos pilares para transformar conhecimento científico em comportamento social e ação política.

O papel da educação formal no enfrentamento da crise climática

A educação formal, especialmente a oferecida em escolas e universidades, desempenha um papel essencial na formação de cidadãos críticos e conscienc-



tes das interações entre sociedade e natureza. Para isso é fundamental que os currículos escolares integrem de maneira transversal os temas relacionados às mudanças climáticas, com base nas ciências naturais, humanas e tecnológicas.

Alfabetização científica e climática

A alfabetização científica vai além da transmissão de conteúdos: ela capacita indivíduos a interpretar dados, questionar fontes, avaliar riscos e compreender a complexidade dos sistemas terrestres. A educação climática eficaz deve incluir:



- Os fundamentos da ciência do clima e dos ciclos biogeoquímicos;
- As causas antropogênicas do aquecimento global;
- As consequências sociais, econômicas e ecológicas das mudanças climáticas;
- As soluções possíveis de mitigação e adaptação;
- Os direitos e deveres socioambientais no âmbito da cidadania.

Além disso, iniciativas como o uso de modelagem climática em sala de aula, simulações de conferências internacionais (como as COPs), análise de estudos de caso locais e projetos interdisciplinares tornam o aprendizado mais significativo e conectado à realidade.

A educação não formal e o papel das mídias e ONGs

Além do ambiente escolar, a educação não formal – promovida por organizações da sociedade civil, museus, meios de comunicação, centros de ciência e tecnologia e plataformas digitais – exerce papel central na formação contínua da população.

Campanhas de conscientização e participação pública

Campanhas educativas bem estruturadas, com linguagem acessível e estratégias participativas, podem promover mudanças culturais profundas. Exemplos incluem:

- Programas de mídia que abordam o impacto das mudanças climáticas sobre o cotidiano das pessoas;
- Oficinas comunitárias em áreas urbanas e rurais sobre soluções baseadas na natureza;
- Aplicativos e jogos educativos sobre a pegada de carbono e o consumo responsável;
- Programas de educação ambiental promovidos por ONGs em territórios indígenas e comunidades tradicionais.

A comunicação deve ser pautada em dados científicos, assim como em valores culturais e narrativas locais, promovendo empatia e engajamento.

Desafios e barreiras à educação climática

Apesar de seu papel fundamental, a educação climática enfrenta diversos obstáculos. Entre eles, destacam-se:

- A resistência ideológica e o negacionismo científico em algumas esferas políticas e sociais;
- A fragmentação curricular, que limita a abordagem interdisciplinar;
- A falta de formação continuada de professores sobre temas ambientais e climáticos;
- A carência de recursos pedagógicos atualizados e localizados, que dialoguem com as realidades regionais;
- O desinteresse da população adulta, muitas vezes sobre carregada por preocupações imediatas.

Superar essas barreiras requer investimento público, políticas educacionais progressistas, parcerias institucionais e inclusão ativa da juventude nos debates.

Educação para a transformação social e justiça climática

A educação climática também deve assumir um viés ético, político e transformador, ancorado no princípio da justiça climática. As comunidades historicamente marginalizadas são as que menos contribuíram para o problema, mas estão entre as mais afetadas por seus impactos. Assim, uma educação emancipatória deve promover:

- A participação social no planejamento urbano e ambiental;
- A valorização dos saberes tradicionais e indígenas na construção de soluções adaptativas;

- O fortalecimento da juventude climática como agente de mudança;
- A promoção da equidade racial, de gênero e territorial nas políticas climáticas.

Políticas públicas e instrumentos de implementação

Diversas iniciativas globais e nacionais têm destacado a centralidade da educação nas ações climáticas:

- A Agenda 2030 da ONU, especialmente o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 (ação contra a mudança global do clima) e o ODS 4 (educação de qualidade);
- A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), que prevê programas de educação, formação e conscientização pública;
- A inclusão da educação ambiental como tema transversal na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) no Brasil;



- Programas de capacitação climática para gestores públicos e comunitários.

Para além das diretrizes, é fundamental garantir orçamento, avaliação contínua e engajamento de múltiplos atores sociais para a efetividade das políticas educacionais voltadas ao clima.

A transição para uma sociedade resiliente ao clima e sustentável do ponto de vista ecológico e social depende diretamente da construção de uma consciência coletiva crítica, informada e engajada. A educação, em suas múltiplas dimensões, é o alicerce dessa transformação.

Educar para o clima é educar para a vida, para a equidade e para o futuro. Ao integrar ciência, cultura, valores e ação, a educação climática, além de formar indivíduos, fortalece comunidades, políticas e ecossistemas.



CAPÍTULO 8

O papel dos governos na luta contra as mudanças climáticas





A crise climática representa um dos maiores desafios do século XXI, exigindo respostas coordenadas e estruturadas em múltiplas escalas: global, nacional, regional e local. Em meio aos atores fundamentais nesse processo, os governos desempenham papel central, pois detêm a autoridade legal, o poder de regulamentação e os instrumentos de financiamento para planejar e implementar políticas públicas voltadas à mitigação dos gases de efeito estufa (GEE) e à adaptação aos impactos climáticos.

Governança climática e responsabilidades estatais

A noção de governança climática refere-se ao conjunto de mecanismos, instituições e processos pelos quais decisões sobre o clima são tomadas e implementadas. Na esfera dos Estados-nação, essa governança expressa-se por meio de:

- Políticas públicas climáticas e ambientais;
- Legislação nacional e regulamentações específicas;
- Integração da ação climática em planos de desenvolvimento;
- Participação ativa em negociações internacionais;
- Fomento à pesquisa científica e inovação verde.

A responsabilidade dos governos está alicerçada no princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada, consagrado na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Tal princípio reconhece que, embora todos os países compartilhem a responsabilidade pela proteção do sistema climático, os países desenvolvidos têm maior obrigação histórica e capacidade técnica para liderar os esforços de mitigação.

Políticas públicas climáticas: instrumentos e estratégias

Planos nacionais de mitigação e adaptação

Governos que assumem compromisso com a agenda climática geralmente elaboram Planos Nacionais de Ação Climática, que incluem:

- Inventários de emissões de GEE;

- Metas de redução de emissões (geralmente vinculadas às Contribuições Nacionalmente Determinadas – NDCs);
- Políticas de transição energética;
- Estratégias setoriais (indústria, transporte, agropecuária, uso do solo);
- Mapeamento de vulnerabilidades e planos de adaptação para setores críticos, como saúde, agricultura, recursos hídricos e infraestrutura urbana.

Ferramentas regulatórias e econômicas

Os governos dispõem de um leque de instrumentos para viabilizar a política climática:

- Tributação sobre carbono e outros instrumentos econômicos para internalizar externalidades;
- Sistemas de comércio de emissões (ETS), como o modelo europeu;
- Subsídios a energias renováveis e inovação tecnológica verde;
- Normas de eficiência energética e padrões de emissão para veículos e indústrias;
- Zonas de proteção ambiental e ordenamento territorial adaptativo.

A implementação de acordos climáticos internacionais

Da UNFCCC ao Acordo de Paris

Desde a assinatura da UNFCCC, em 1992, os governos têm se reunido anualmente nas Conferências das Partes (COPs) para negociar ações coletivas frente às mudanças climáticas. O Acordo de Paris (2015) representou um marco ao estabelecer:

- O objetivo de limitar o aquecimento global a bem abaixo de 2°C, com esforços para não ultrapassar 1,5°C;
- A obrigação de cada país submeter suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs);
- A promoção da transparência, revisão periódica e financiamento climático internacional;
- A valorização da adaptação e das perdas e danos em países vulneráveis.

Desafios na implementação

A implementação eficaz dos acordos climáticos esbarra em obstáculos como:

- Falta de articulação interministerial e coordenação entre diferentes níveis de governo;
- Insuficiência de financiamento climático, especialmente nos países em desenvolvimento;
- Mudanças políticas e retrocessos institucionais que enfraquecem compromissos assumidos;
- Necessidade de maior integração entre ciência climática e formulação de políticas públicas.

O caso brasileiro: avanços, contradições e perspectivas

O Brasil tem um histórico complexo na política climática. Como signatário da UNFCCC, do Protocolo de Quioto e do Acordo de Paris, o país apresentou NDCs ambiciosas, sobretudo na redução do desmatamento e na expansão de energias renováveis. Contudo, oscilações políticas e desmonte institucional, como o enfraquecimento do Ibama, do INPE e do Fundo Amazônia, têm comprometido os avanços.

Entre as estratégias bem-sucedidas, destacam-se:

- O Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm);
- Os investimentos em biocombustíveis e energia hidrelétrica;
- A liderança no uso de matrizes energéticas limpas.

Entretanto, o aumento do desmatamento, a flexibilização de normas ambientais e a ineficácia na fiscalização ainda colocam o país em situação ambígua no cenário internacional.

O papel dos governos é inegociável na condução da transição climática. Políticas públicas eficazes, embasadas em ciência e justiça climática, são essenciais para que os compromissos internacionais se traduzam em mudanças estruturais concretas. É imperativo que os governos, além de assumir compromissos globais, os integrem às realidades nacionais e regionais, promovendo a participação social, a equidade e a conservação ambiental.

A governança climática estatal, quando bem estruturada, pode catalisar sinergias entre inovação, desenvolvimento sustentável e justiça intergeracional, conduzindo a humanidade por caminhos mais seguros e sustentáveis em direção ao futuro.

”

A crise climática representa
um dos maiores desafios
do século XXI.

A COP30 e a Reconfiguração da Governança Climática Global

A 30^a Conferência das Partes (COP30), realizada entre 10 e 21 de novembro de 2025 em Belém do Pará, Brasil, representou um marco geopolítico ao deslocar o epicentro das negociações climáticas para o coração da Amazônia. Essa mudança territorial alterou a simbologia e a epistemologia do evento, colocando ecossistemas críticos e comunidades tradicionais no centro do debate sobre soluções. Apesar de impasses fundamentais — notadamente a ausência de um consenso sobre a eliminação vinculante de combustíveis fósseis — a COP30 produziu avanços estruturais que reconfiguraram a governança climática em cinco eixos centrais.



1. Governança Florestal: Do Carbono à Integridade Socioecológica

A conferência redesenhou o financiamento florestal internacional, superando a lógica compensatória baseada apenas em carbono. Novos fundos e mecanismos, como o *Fundo para a Floresta*, incorporam critérios baseados em biodiversidade funcional, conectividade de paisagens e manejo territorial comunitário. A grande inovação foi o fortalecimento da governança local, permitindo repasses diretos a comunidades, unidades de conservação e territórios indígenas, reduzindo a intermediação estatal. Essa reestruturação consolida uma nova visão da floresta: de ativo financeiro para infraestrutura bioclimática e geopolítica. Contudo, a eficácia deste modelo dependerá de auditorias independentes e de salvaguardas contra a captura corporativa dos recursos.

2. Governança dos Oceanos: Da Economia Azul à Segurança Climática Marinha

A COP30 reposicionou os oceanos como elemento central da agenda climática, com acordos como o pacto Brasil-França para o Atlântico Sul. O novo marco integra ciência, conservação e economia sob um enfoque ecossistêmico, incluindo:

- Redes integradas de monitoramento do carbono marinho.
- Metas vinculantes para áreas marinhas protegidas.
- Certificação de cadeias produtivas para combater o *greenwashing*.
- Diretrizes para tecnologias emergentes, como a geoengenharia.

Essa abordagem rompe com o histórico extrativista e insere os oceanos no núcleo das estratégias de mitigação e adaptação.

3. Povos Indígenas como Agentes Políticos e Epistêmicos

Um dos legados mais significativos da COP30 foi o reconhecimento dos povos indígenas não como participantes simbólicos, mas como coprodutores de conhecimento e corresponsáveis pela formulação de políticas. Medidas estruturais consagraram esse avanço:

- Participação ativa com capacidade deliberativa em mesas técnicas.
- Mecanismos permanentes de financiamento para gestão territorial indígena.
- Reconhecimento de seus territórios como infraestruturas climáticas efetivas.



Essa mudança insere epistemologias tradicionais no centro da política ambiental, estabelecendo um regime colaborativo de governança entre Estado e comunidades.

4. Transição Energética: Entre Inovação Tecnológica e Justiça Territorial

A conferência avançou em temas como redução de metano e eletrificação de transportes, mas expôs tensões profundas sobre o modelo de transição. As contradições ficaram evidentes:

- Mineração intensiva de lítio, níquel e terras raras para suprir as energias renováveis.
- Expansão de hidrelétricas e hidrovias sobre áreas sensíveis.
- Produção de hidrogênio verde voltada para a exportação, e não para demandas sociais internas.

A COP30 reforçou que uma transição energética sem equidade territorial pode simplesmente reproduzir o modelo extrativista dos combustíveis fósseis, apenas com novos insumos. O paradigma emergente exige a redefinição de "energia renovável" sob critérios de soberania socioambiental.

5. Justiça Climática como Arcabouço Normativo

A COP30 transformou a justiça climática de um princípio retórico em um critério estruturante para financiamento e políticas. As diretrizes aprovadas incluem:

- Priorização de países e populações vulneráveis na distribuição de recursos.

- Reconhecimento de "perdas e danos" como uma responsabilidade histórica dos maiores emissores, e não como assistência humanitária.
- Incorporação de desigualdades raciais, territoriais e socioeconômicas nas estratégias de adaptação.

Essa mudança reposiciona o debate climático de um universalismo abstrato para uma abordagem orientada por vulnerabilidade, redistribuição e reparação histórica.

Avanços e Desafios: O Legado Ambíguo de Belém

Apesar dos avanços conceituais, a COP30 foi marcada por uma significativa decepção: a ausência de menções a "mapas do caminho" para a eliminação progressiva dos combustíveis fósseis nos textos finais. A proposta, liderada pelo presidente Luiz Inácio Lula da Silva, enfrentou forte oposição de grandes produtores e consumidores, como Arábia Saudita, China e Índia, que ameaçaram travar todas as negociações. Como medida compensatória, a presidência brasileira anunciou que desenvolverá tais roteiros de forma independente para apresentação futura, uma medida vista como um "prêmio de consolação" pela sociedade civil.

Outros resultados práticos foram:

- **Financiamento para Adaptação:** Acordo para triplicar os recursos até 2035, chegando a US\$ 120 bilhões anuais. O prazo, porém, foi considerado tardio por especialistas, dado o agravamento acelerado da crise.
- **Reconhecimento de Afrodescendentes:** Inclusão histórica do termo nos textos oficiais, reconhecendo o papel crucial dessas populações no combate às mudanças climáticas.

- **Indicadores de Adaptação:** Estabelecimento de 59 critérios para medir o progresso global na adaptação, um passo importante para tornar os esforços tangíveis e mensuráveis.

Considerações Finais

A COP30 reconfigurou a governança climática ao integrar floresta, oceano, povos tradicionais e justiça climática em uma política mais robusta. Seu legado, no entanto, permanece condicionado a três desafios estruturais: a resistência internacional ao abandono dos combustíveis fósseis, a captura corporativa das agendas verdes e a ausência de mecanismos de fiscalização global vinculantes.

Mais do que um evento, a COP30 inaugurou uma mudança de paradigma: enfrentar a crise climática implica, fundamentalmente, redistribuir poder — ecológico, econômico e epistêmico —, e não apenas reduzir emissões. O sucesso histórico de Belém dependerá menos de suas declarações e mais da capacidade de transformar seus acordos inovadores em políticas verificáveis e protegidas contra interesses geopolíticos assimétricos.

”

A COP30 representou
um marco geopolítico ao deslocar
o epicentro das negociações climáticas
para o coração da Amazônia.
do século XXI

Estudos de caso internacionais: educação climática em ação

Finlândia – Integração climática transversal no currículo nacional

Desde 2016, a Finlândia implementa um currículo nacional que incorpora a educação ambiental e climática de forma transversal em todas as disciplinas. A abordagem, chamada de *phenomenon-based learning*, promove projetos interdisciplinares centrados em problemas reais, como mudanças climáticas, transição energética e consumo sustentável. Estudantes das etapas que equivalem no Brasil ao Ensino Fundamental e Ensino Médio são encorajados a desenvolver soluções locais, utilizando dados científicos e ferramentas digitais.

Resultados: a estratégia aumentou o engajamento estudantil e a compreensão sistêmica das questões climáticas, estimulando a formação de competências socioambientais e do pensamento crítico.

Costa Rica – Alfabetização climática comunitária

A Costa Rica implementou o programa *Environmental Education for Sustainable Development*, que inclui oficinas interativas, hortas escolares, visitas a áreas protegidas e uso de rádios comunitárias para difusão de conteúdo sobre mudanças climáticas e biodiversidade. O programa prioriza áreas rurais e comunidades indígenas, com participação ativa de professores, líderes locais e estudantes.

Resultados: houve aumento significativo na percepção dos impactos climáticos e na adoção de práticas sustentáveis locais, como reflorestamento, manejo de resíduos e segurança hídrica.

Reino Unido – *Climate Education Bill* e juventude ativista

O Reino Unido discute, desde 2022, a implementação do *Climate Education*

Bill, que visa tornar obrigatória a educação climática baseada em ciência em todos os níveis escolares. Em paralelo, organizações como Teach the Future e Fridays for Future UK pressionam o governo por investimentos em formação docente e infraestrutura verde nas escolas.

Resultados: o debate impulsionou políticas de educação climática nos currículos da Inglaterra, Escócia e País de Gales, além de maior participação juvenil na formulação de políticas públicas.

Proposta de modelo curricular para escolas públicas brasileiras

Inspirado em iniciativas internacionais e nas diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), o modelo abaixo propõe a integração da educação climática de forma transversal, prática e contextualizada no Ensino Fundamental e Médio.

Diretrizes gerais

- **Base científica sólida:** conteúdos atualizados baseados no IPCC, na ciência do clima e na ecologia brasileira.
- **Abordagem interdisciplinar:** integração com ciências, geografia, matemática, língua portuguesa e artes.
- **Aprendizagem ativa:** projetos investigativos, saídas de campo, uso de tecnologias digitais e ciência cidadã.
- **Conexão local-global:** articulação entre os impactos das mudanças climáticas no território do aluno e os fenômenos globais.
- **Formação docente continuada:** programas de capacitação em parceria com universidades e ONGs.

Temas norteadores por etapa escolar

ETAPA	CONTEÚDOS-CHAVE
Ensino Fundamental – Anos Iniciais (1º ao 5º ano)	Água, florestas e clima; reciclagem; energia; tempo e estações; práticas sustentáveis na escola.
Ensino Fundamental – Anos Finais (6º ao 9º ano)	Efeito estufa; desmatamento e queimadas; agroecologia; eventos extremos; consumo responsável.
Ensino Médio	Políticas climáticas (Acordo de Paris, COPs); energias renováveis; justiça climática; mobilização social.

Avaliação e monitoramento

- Indicadores qualitativos (mudanças de atitude, participação em projetos, produção de conteúdo);
- Indicadores quantitativos (implantação de hortas, coleta seletiva, monitoramento ambiental escolar);
- Parcerias com universidades e órgãos ambientais para acompanhar e aprimorar os programas.

Ao investir em um currículo climático que seja contextualizado, crítico e engajador, o Brasil pode preparar suas novas gerações para enfrentar os desafios do Antropoceno com lucidez, empatia e compromisso coletivo. A transformação educacional proposta é, antes de tudo, um gesto de esperança ativa, que reconhece a educação como ferramenta essencial para moldar futuros desejáveis e possíveis.

Instrumentos econômicos e cooperação internacional na ação climática

A crise climática, ao mesmo tempo em que representa um desafio ambiental sem precedentes, é também um fenômeno econômico e político de escala global. Suas causas e consequências atravessam fronteiras nacionais, exigindo

estratégias de atuação integradas, que combinem instrumentos econômicos de incentivo à sustentabilidade com mecanismos eficazes de cooperação internacional. Os dois pilares fundamentais dessa abordagem: os incentivos fiscais e subsídios destinados à promoção de indústrias sustentáveis; e os acordos e mecanismos de cooperação global voltados à mitigação e adaptação climática.

Incentivos fiscais e subsídios verdes: estímulo à transição ecológica

O papel dos incentivos econômicos na transformação setorial

Políticas econômicas voltadas ao meio ambiente são instrumentos centrais para corrigir falhas de mercado associadas às externalidades negativas das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Entre essas medidas, destacam-se:

- Incentivos fiscais, como isenção ou redução de impostos sobre tecnologias limpas;
- Subsídios diretos a cadeias produtivas verdes, como energias renováveis, agricultura regenerativa, biotecnologia e transporte sustentável;
- Créditos fiscais e financiamento público verde, por meio de bancos de desenvolvimento ou fundos climáticos.

Esses instrumentos funcionam como estímulos à inovação e à competitividade de setores que, em circunstâncias normais, enfrentariam desvantagens frente a indústrias fósseis tradicionalmente subsidiadas.

Exemplos de políticas de subsídio à sustentabilidade

Diversos países têm adotado pacotes de incentivo à economia verde. Exemplos relevantes incluem:

- **Alemanha e o Energiewende:** política de transição energética baseada em subsídios para energia solar e eólica, aliada à desativação progressiva de usinas nucleares e carvão.
- **Estados Unidos e o Inflation Reduction Act (2022):** inclui US\$ 369 bilhões em investimentos para acelerar a transição para energia limpa, com créditos fiscais para veículos elétricos, energia solar, captura de carbono e hidrogênio verde.
- **Brasil e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS):** prevê incentivos à logística reversa e à economia circular, embora a aplicação prática ainda seja limitada por entraves políticos e institucionais.

Estudos demonstram que subsídios verdes bem planejados podem reduzir significativamente os custos de tecnologias sustentáveis e fomentar empregos de qualidade no setor ambiental (IEA, 2022; OECD, 2021).

Desafios e riscos associados

Apesar de seus benefícios, os incentivos econômicos sustentáveis enfrentam limitações:

- Risco de subsídios regressivos, se não forem orientados por critérios de justiça social;
- Problemas de *greenwashing* em setores que se apropriam de benefícios fiscais sem mudanças estruturais;
- Concorrência desleal com indústrias poluentes ainda subsidiadas, como as que utilizam combustíveis fósseis, que em 2022 receberam cerca de US\$ 1 trilhão em subsídios globalmente (IEA, 2023).

É necessário, portanto, que tais instrumentos estejam vinculados a metas

de desempenho climático, auditoria independente e mecanismos de responsabilização ambiental.

Cooperação internacional no combate às mudanças climáticas

A criação de regimes multilaterais climáticos

Desde a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), a cooperação internacional tem sido a espinha dorsal da governança climática global. Instrumentos como o Protocolo de Quioto (1997) e o Acordo de Paris (2015) simbolizam o esforço coletivo para:

- Estabelecer metas comuns de redução de emissões;
- Transferir tecnologia limpa aos países em desenvolvimento;
- Prover financiamento climático internacional;
- Compartilhar dados científicos e boas práticas de adaptação.

Por meio de fóruns, como as Conferências das Partes (COPs), a cooperação multilateral visa mitigar a fragmentação política e econômica que historicamente dificultou ações coordenadas.

”

Diversos países têm adotado pacotes de incentivo à economia verde.

Mecanismos de financiamento e transferência tecnológica

A cooperação internacional também se materializa em instrumentos específicos:

- O Fundo Verde para o Clima (GCF), que financia projetos de baixo carbono e adaptação em países em desenvolvimento;
- O Mecanismo de Desenvolvimento Limplo (MDL) e, mais recentemente, os mecanismos de mercado sob o Artigo 6 do Acordo de Paris, que promovem intercâmbio de créditos de carbono;
- Iniciativas como a Coalizão de Ministros da Fazenda para Ação Climática e o Climate Investment Funds (CIF), voltadas à coordenação intergovernamental de recursos e políticas.

A importância da cooperação Sul-Sul e iniciativas regionais

Além das alianças tradicionais entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, destaca-se o papel da cooperação Sul-Sul, especialmente:

- Iniciativas do BRICS em financiamento climático e energia renovável;
- O Pacto Amazônico, reunindo países sul-americanos para ações de proteção florestal;
- A Parceria Africana para o Clima e Desenvolvimento, voltada à adaptação e segurança alimentar.

Esses arranjos regionais fortalecem a soberania climática dos países do Sul Global, promovendo intercâmbio técnico, diplomacia ambiental e fortalecimento institucional.

A ação eficaz frente à mudança do clima exige instrumentos econômicos que estimulem transformações sistêmicas, aliada à coerência política e à solidariedade internacional. Os incentivos fiscais e subsídios sustentáveis representam motores poderosos para alavancar inovação e competitividade, mas sua eficácia depende de critérios robustos de governança, justiça e avaliação de impactos.

Paralelamente, a cooperação internacional deve evoluir de compromissos retóricos para ações efetivas e vinculantes, com equidade na distribuição de responsabilidades, recursos financeiros e tecnologias. Em tempos de emergência climática, a coordenação entre governos, organizações multilaterais e atores econômicos torna-se não apenas desejável, mas imperativa para garantir um futuro habitável e justo para as próximas gerações.

Estudos de caso regionais

União Europeia: uma estratégia integrada de subsídios verdes e governança climática

A União Europeia (UE) tem se destacado mundialmente pela integração entre políticas econômicas, ambientais e climáticas. A partir do Pacto Ecológico Europeu (European Green Deal), lançado em 2019, a UE estabeleceu a meta de neutralidade climática até 2050, respaldada por um amplo conjunto de instrumentos:

- Fundo de Transição Justa: destinado a apoiar regiões economicamente dependentes de combustíveis fósseis, com €17,5 bilhões em subsídios diretos para a reconversão industrial.
- Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira (CBAM): especifica as emissões de produtos importados, incentivando padrões sustentáveis em escala global.

- Programa Horizon Europe (2021–2027): maior investimento em pesquisa climática do mundo, com €95 bilhões voltados à inovação verde.

Essa abordagem multisectorial, baseada em planejamento estratégico, regulação firme e financiamento robusto, tem sido apontada como exemplo de liderança climática e eficácia na indução de transformações estruturais (EEA, 2022).

América Latina: potencial sustentável e barreiras políticas

A América Latina, com sua abundância de recursos naturais, grande biodiversidade e matriz energética relativamente limpa, possui potencial singular para liderar a transição ecológica. No entanto, limitações políticas, instabilidade institucional e dependência de commodities fósseis e agrícolas ainda representam entraves significativos.

Brasil

Embora o Brasil possua uma das maiores capacidades de geração hidrelétrica do planeta e tenha sido um ator relevante nas negociações climáticas internacionais, os incentivos à sustentabilidade têm sido pontuais e inconsistentes.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), de 2009, previa mecanismos de mercado e metas setoriais, mas sua implementação foi limitada por cortes orçamentários e falta de integração com a política econômica.

Subsídios diretos aos combustíveis fósseis ainda superam, em valor absoluto, os incentivos aos renováveis, gerando distorções de mercado.

Iniciativas positivas, como o RenovaBio, visam estimular os biocombustíveis por meio de créditos de descarbonização, mas enfrentam resistência de setores agrícolas tradicionais.

Chile e Colômbia

Estes países têm se destacado por políticas inovadoras, como tributação do carbono, leilões de energia solar e acordos regionais para adaptação climática. O Chile lidera a América Latina em termos de investimento per capita em energia limpa, beneficiando-se de incentivos fiscais e acesso facilitado a financiamentos multilaterais.

África Subsaariana: cooperação internacional e financiamento climático

A África Subsaariana enfrenta um paradoxo: é uma das regiões menos responsáveis pelas emissões globais, mas uma das mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. A escassez de recursos próprios torna os países da região altamente dependentes da cooperação internacional para mitigação e adaptação.

Iniciativas de destaque incluem:

- O Africa Adaptation Acceleration Program (AAAP), com apoio do Banco Africano de Desenvolvimento e da ONU, que visa mobilizar US\$ 25 bilhões para adaptação.
- Parcerias bilaterais com países do Norte Global, como o Just Energy Transition Partnership (JETP) firmado com a África do Sul, que prevê mais de US\$ 8,5 bilhões em financiamento para descarbonização do setor elétrico.

Apesar desses avanços, persistem desafios relacionados à burocracia, instabilidade política, infraestrutura precária e acesso desigual a tecnologias verdes, limitando a eficácia da cooperação.

Sudeste Asiático: crescimento econômico e dilemas energéticos

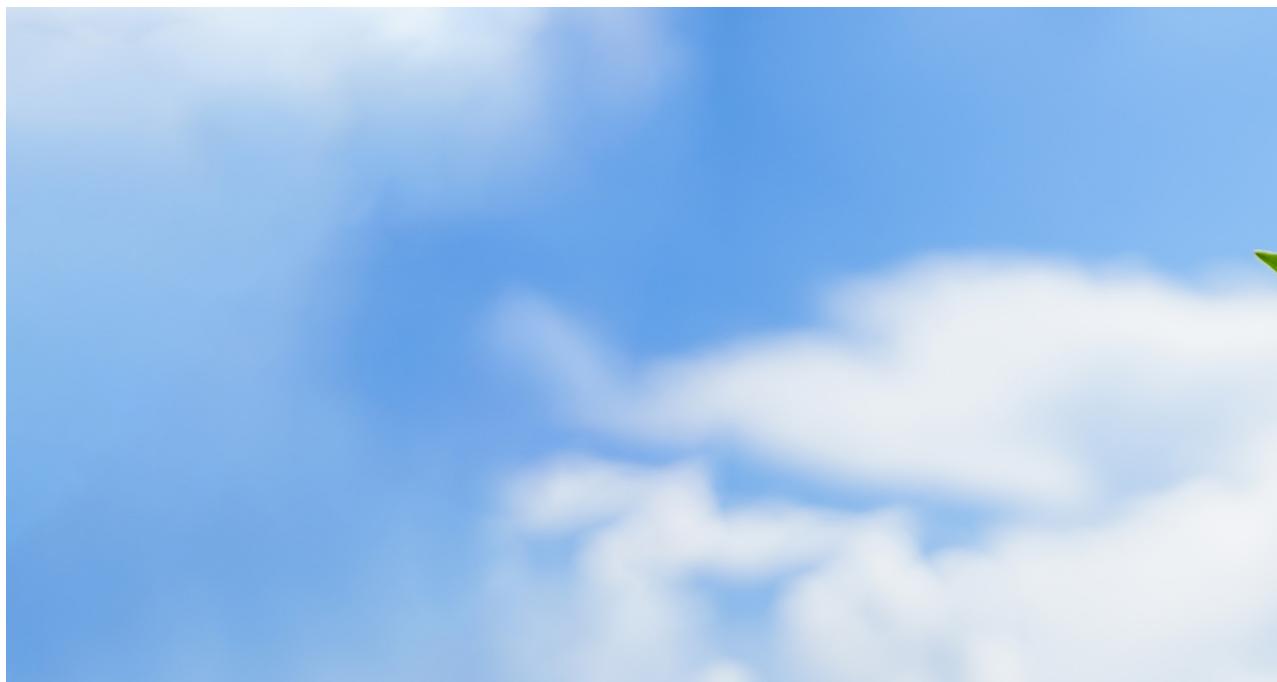
Regiões como o Sudeste Asiático enfrentam o dilema entre crescimento

econômico acelerado e pressão para descarbonizar suas economias. Indonésia, Filipinas, Vietnã e Tailândia vêm se destacando em programas de energia solar e eólica, impulsionados por:

- Incentivos tarifários (*feed-in tariffs*);
- Financiamento verde internacional (como o do Green Climate Fund);
- Cooperação técnica com países europeus e agências multilaterais.

Contudo, a continuidade do uso de carvão como base da matriz elétrica desafia a credibilidade das metas climáticas. A transição verde nessa região dependerá da capacidade de substituição gradual de fontes fósseis, do reforço de redes elétricas e da criação de empregos verdes em larga escala.

Os estudos de caso apresentados revelam diversidade de contextos, capa-



cidades institucionais e níveis de ambição climática, mas também apontam elementos comuns de sucesso:

- Existência de marcos legais claros e estáveis;
- Integração entre políticas fiscais, industriais e ambientais;
- Mecanismos de cooperação internacional eficazes, transparentes e acessíveis;
- Engajamento político sustentado e participação social.

À luz desses exemplos é possível afirmar que subsídios verdes e cooperação internacional não são opções, mas, sim, pilares estratégicos para a transição global rumo a uma economia de baixo carbono. A sua expansão dependerá, sobretudo, da vontade política, do fortalecimento da governança ambiental e do compromisso ético com as gerações futuras.



Empresas e o compromisso com a sustentabilidade: caminhos para a inovação verde

No contexto das mudanças climáticas globais, a atuação empresarial ocupa posição estratégica na mitigação dos impactos ambientais e na promoção de modelos econômicos resilientes e sustentáveis. As empresas, tradicionalmente associadas à exploração intensiva de recursos naturais e à geração de emissões, têm sido crescentemente chamadas a desempenhar um papel protagonista na transição para uma economia de baixo carbono. Esse movimento, conhecido como *corporate sustainability* ou sustentabilidade corporativa, compreende um conjunto de práticas organizacionais voltadas à integração entre desempenho econômico, responsabilidade ambiental e justiça social.

A adoção de práticas empresariais verdes não se limita a um imperativo ético, mas constitui uma vantagem competitiva crescente, dada a pressão dos consumidores, investidores, governos e da sociedade civil organizada, por padrões mais sustentáveis de produção e consumo (Porter; Kramer, 2011; Elkington, 1997).

A sustentabilidade como pilar da governança corporativa

As práticas empresariais sustentáveis vêm se consolidando por meio da internalização dos princípios ESG (*Environmental, Social and Governance*), que orientam a responsabilidade ambiental (E), a equidade social (S) e a transparência na governança (G). Empresas que adotam esses princípios tendem a apresentar maior estabilidade financeira, menor risco reputacional e melhor desempenho em longo prazo (Friede *et al.*, 2015).

Entre as estratégias mais eficazes, destacam-se:

- Ecoeficiência: uso racional de matérias-primas e energia, com redução de resíduos e reaproveitamento de insumos (Schmidheiny, 1992);
- Ciclo de vida do produto: avaliação dos impactos ambientais desde a extração dos recursos até o descarte, promovendo design sustentável e economia circular;
- Inventários e metas de emissões: medição e redução de pegadas de carbono e hídrica (Scopes 1, 2 e 3), alinhando-se ao Science-Based Targets Initiative (SBTi);
- Relatórios de sustentabilidade integrados: uso de frameworks como GRI (Global Reporting Initiative) ou SASB (Sustainability Accounting Standards Board) para divulgação de indicadores ambientais e sociais.

Tecnologias limpas e inovação verde

A inovação tecnológica é um dos principais vetores para a transição empresarial rumo à sustentabilidade. As chamadas tecnologias limpas ou *cleantechs* compreendem soluções que reduzem a pressão sobre os ecossistemas, aumentam a eficiência de processos e viabilizam novos modelos de negócios baseados em baixo impacto ambiental.

Entre os exemplos mais relevantes, destacam-se:

- Energia renovável descentralizada (solar, eólica, biomassa) aplicada a processos industriais;
- Sistemas de gestão ambiental automatizados (uso de IA, IoT e sensores para monitoramento de emissões e consumo de recursos);
- Logística reversa e materiais biodegradáveis em embalagens e cadeias de suprimento;
- Reuso de efluentes e economia circular, particularmente relevantes em setores de alto consumo hídrico, como o têxtil, alimentício e farmacêutico.

Estudos de caso indicam que empresas que investem em inovação verde, especialmente em países com regulamentações ambientais mais exigentes, tendem a obter maior retorno sobre investimento (ROI), além de captar mais facilmente recursos em fundos de impacto socioambiental (Bocken *et al.*, 2014).

Cadeias de valor sustentáveis e parcerias estratégicas

A sustentabilidade empresarial não se limita às operações internas, mas se estende às cadeias de valor globais, nas quais estão concentradas grande parte das emissões e dos impactos ambientais indiretos. Assim, fornecedores, distribuidores, consumidores e comunidades locais passam a ser atores-chave na construção de cadeias responsáveis.

Algumas das estratégias adotadas incluem:

- Certificações ambientais (como ISO 14001, FSC, Fair Trade) para garantir padrões mínimos;
- Avaliações de risco socioambiental em fornecedores;
- Engajamento de stakeholders e práticas de compras sustentáveis;
- Parcerias público-privadas e consórcios de inovação intersetoriais, como o Pacto Global da ONU ou o CDP (*Carbon Disclosure Project*).

Empresas líderes têm mobilizado iniciativas coletivas, como o RE100, que reúne organizações comprometidas em operar 100% com energia renovável, ou o Race to Zero, ligado à Convenção-Quadro da ONU sobre Mudança do Clima.

Desafios e oportunidades no Sul Global

Nos países em desenvolvimento, as empresas enfrentam desafios adicionais

nais, como infraestrutura deficiente, acesso limitado ao financiamento verde e ausência de políticas públicas integradas. No entanto, tais contextos também oferecem oportunidades estratégicas:

- Mercados emergentes de carbono, como o previsto no Brasil pela Política Nacional de Comércio de Emissões (PNCE);
- Crescimento da demanda por produtos éticos e rastreáveis, sobretudo no setor agroalimentar;
- Investimentos internacionais condicionados às práticas ESG, como os do Banco Mundial, BID ou IFC.

A adaptação de modelos de negócios sustentáveis às realidades locais, com respeito à justiça climática e inclusão social, será essencial para garantir que a transição verde não reforce desigualdades preexistentes.

A adoção de práticas empresariais verdes constitui, hoje, um pilar essencial da transformação socioeconômica necessária frente à crise climática. Empresas que incorporaram os princípios da sustentabilidade à sua cultura organizacional não apenas contribuem para a mitigação de impactos ambientais, como também reforçam sua resiliência, competitividade e legitimidade social.

O futuro da sustentabilidade corporativa exige inovação contínua, transparência, responsabilidade ética e articulação com políticas públicas, especialmente em regiões vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas. À medida que a urgência ambiental se intensifica, o setor privado será cada vez mais cobrado por ações concretas, mensuráveis e alinhadas às metas globais de desenvolvimento sustentável.

Economia circular e responsabilidade corporativa: novos paradigmas para a sustentabilidade empresarial

A economia circular desponta como um paradigma inovador frente ao mode-

lo econômico linear tradicional baseado na lógica “extrair–produzir–descartar”. Em contraste, a circularidade visa a maximização do uso de recursos, a eliminação de resíduos e a regeneração de sistemas naturais. Em tempos de emergência climática, escassez de recursos e aumento da pressão regulatória, a adoção de estratégias circulares deixou de ser uma tendência marginal para tornar–se uma diretriz estruturante da responsabilidade corporativa no século XXI.

Empresas que adotam os princípios da economia circular não apenas mitigam riscos ambientais e regulatórios, como também reconfiguram suas cadeias de valor, otimizam custos operacionais e respondem a uma demanda crescente por transparência e ética ambiental por parte de consumidores, investidores e governos (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Kirchherr *et al.*, 2018).

Economia circular: definições e princípios estruturantes

De acordo com a Fundação Ellen MacArthur (2013), a economia circular é um sistema econômico restaurativo e regenerativo por concepção, que busca manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor em todos os momentos. Seu funcionamento é sustentado por três pilares fundamentais:

- 1) Eliminação de resíduos e da poluição desde o *design*;
- 2) Manutenção de produtos e materiais em uso;
- 3) Regeneração de sistemas naturais.

Diferentemente das abordagens tradicionais de reciclagem, a economia circular propõe uma reorganização sistêmica de processos produtivos e modelos de negócios, envolvendo desde o design de produtos até a logística reversa, a remanufatura e o reaproveitamento de subprodutos industriais.

Responsabilidade corporativa e a transição circular

A responsabilidade corporativa frente à crise ambiental demanda não apenas o cumprimento da legislação vigente, mas a adoção proativa de práticas que promovam a resiliência ecológica, a justiça intergeracional e a inovação sustentável. Nesse contexto, a economia circular oferece uma estrutura operacional concreta para empresas implementarem a sustentabilidade como valor estratégico.

As principais abordagens de circularidade empresarial incluem:

- *Design para durabilidade, reparabilidade e desmontagem;*
- Modelos de negócio circulares, por exemplo: produtos como serviço (PaaS), economia do compartilhamento, *leasing reverso*;
- Gestão circular de resíduos industriais, com valorização de resíduos como matéria-prima secundária;
- Simbioses industriais, em que resíduos de uma empresa tornam-se insumos para outra;
- Digitalização para rastreabilidade, com uso de *blockchain* e inteligência artificial para mapear fluxos de materiais.

”

A adoção de práticas empresariais verdes constitui, hoje, um pilar essencial da transformação socioeconômica necessária frente à crise climática.

A responsabilização das empresas na adoção dessas práticas envolve o compromisso com metas mensuráveis, prestação de contas pública e alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial os ODS 12 (consumo e produção responsáveis), 9 (indústria, inovação e infraestrutura) e 13 (ação climática).



Figura 52. Ilustra como a sustentabilidade consolida-se como pilar essencial da governança corporativa, integrando práticas ambientais, sociais e de governança — conhecidas pela sigla ESG (*Environmental, Social and Governance*). Quatro eixos fundamentais são destacados: ecoeficiência — representa o esforço das empresas para aliar produtividade à redução do impacto ambiental, promovendo a adoção de tecnologias limpas, uso de fontes de energia renovável e processos mais sustentáveis; economia circular — aborda a transição do modelo linear para um ciclo produtivo baseado na reutilização, reciclagem e revalorização de materiais, minimizando desperdícios e otimizando o uso de recursos naturais; Relatório de Sustentabilidade Integrado (GRI) — enfatiza a importância da transparência corporativa por meio da publicação de relatórios que sigam padrões internacionais, como os da Global Reporting Initiative, permitindo que stakeholders avaliem o desempenho ambiental, social e de governança da empresa; ESG como estratégia corporativa — refletido na figura do executivo, reforça a incorporação dos princípios ESG na gestão empresarial como elemento-chave para atrair investidores, fortalecer a reputação e garantir a perenidade dos negócios frente aos desafios climáticos e sociais contemporâneos. Essa abordagem evidencia que a sustentabilidade não é mais uma prática opcional, mas, sim, uma diretriz estruturante para a inovação, a competitividade e a responsabilidade corporativa no século XXI.

Indicadores, certificações e avaliação de desempenho circular

Medir o desempenho circular corporativo é um desafio técnico e metodológico em evolução. Organizações internacionais vêm propondo métricas que permitem avaliar, além dos fluxos físicos de materiais, os impactos sociais, econômicos e ecológicos associados.

Entre os principais instrumentos disponíveis estão:

- Material Circularity Indicator (MCI) – Desenvolvido pela Ellen MacArthur Foundation e a Granta Design.
- ISO 59000 (em desenvolvimento) – Família de normas ISO sobre economia circular.
- Certificações Cradle to Cradle® – Avaliando o ciclo de vida completo de produtos.
- Relatórios baseados em GRI (Global Reporting Initiative), com indicadores específicos de gestão de resíduos, materiais e emissões.

Adicionalmente, modelos de avaliação multicritério e ferramentas de análise de ciclo de vida (ACV) têm sido integrados para orientar decisões de investimento e inovação em tecnologias circulares.

Desafios e oportunidades da implementação corporativa

Apesar de seu potencial transformador, a transição para a economia circular ainda enfrenta obstáculos importantes, tais como:

- Barreiras regulatórias: ausência de marcos legais claros que incentivem ou exijam circularidade;

- Resistência organizacional: estruturas corporativas tradicionais pouco flexíveis à inovação sistêmica;
- Falta de infraestrutura logística e tecnológica;
- Baixa percepção de valor por consumidores finais;
- Desigualdades no acesso a recursos tecnológicos e capacitação técnica, especialmente no Sul Global.

Entretanto, os benefícios econômicos associados são expressivos. Segundo a Accenture (2015), modelos de negócio circulares podem gerar até US\$ 4,5 trilhões em valor econômico até 2030. Empresas pioneiras, como Philips, Unilever e Renault, já demonstram retornos positivos ao reestruturar suas operações para alinhar-se aos princípios circulares.

A economia circular representa uma oportunidade concreta para que empresas alinhem sua atuação às demandas do século XXI, integrando desempenho econômico à conservação ambiental e à justiça social. A responsabilidade corporativa, nesse contexto, deve ser entendida não como um custo ou obrigação regulatória, mas como um caminho estratégico para inovação, competitividade e legitimidade social.

A construção de um setor produtivo circular exige, contudo, políticas públicas integradas, incentivos econômicos adequados, capacitação técnica e engajamento de todos os atores da sociedade. A consolidação dessa transição dependerá da capacidade das empresas de liderar processos de transformação com visão sistêmica, responsabilidade ética e compromisso com um futuro sustentável e resiliente.

Lideranças corporativas na mitigação das mudanças climáticas: exemplos, estratégias e impactos

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios enfrenta-

dos pela humanidade no século XXI, exigindo ações coordenadas por governos, sociedade civil e, especialmente, pelo setor privado. As empresas, enquanto agentes econômicos fundamentais, têm papel decisivo na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), seja por meio da transição energética, da inovação tecnológica ou da transformação de seus modelos produtivos e logísticos. Casos emblemáticos de corporações globais que assumiram a dianteira na mitigação climática, adotando metas ambiciosas de descarbonização e soluções de impacto socioambiental positivo, contribuindo com os esforços globais para conter o aquecimento da Terra.

Casos de liderança empresarial na mitigação climática

Microsoft (tecnologia e compensação de carbono)

A Microsoft tem se destacado por sua postura proativa frente às mudanças climáticas. Em 2020, a empresa anunciou o compromisso de tornar-se *carbon negative* até 2030, ou seja, remover mais CO₂ da atmosfera do que emite. Além disso, até 2050, a companhia pretende eliminar de forma permanente todo o carbono que já emitiu desde sua fundação, em 1975 (Microsoft, 2020).

Para isso, investe em tecnologias de remoção direta de carbono, em reflorestamento e em soluções baseadas na natureza. Em termos operacionais, adota uma política interna de *carbon fee*, em que cada departamento paga por suas emissões, criando incentivos econômicos para reduzir sua pegada. Em 2021, a Microsoft comprou mais de 1,4 milhão de toneladas de remoção de carbono de diferentes projetos certificados globalmente.

Ørsted (energia eólica e transição energética)

A dinamarquesa Ørsted é um dos exemplos mais marcantes de transforma-

ção empresarial: até 2008, era uma das empresas de energia mais intensivas em carbono da Europa, com matriz baseada predominantemente em carvão. Em uma década, a Ørsted redesenhou seu portfólio energético e tornou-se líder global em energia eólica offshore, com mais de 75% de sua produção oriunda de fontes renováveis em 2022 (Ørsted, 2022).

Atualmente, a companhia possui como meta atingir emissões líquidas zero até 2040, com investimentos contínuos em tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS), eletrolisadores para hidrogênio verde e soluções híbridas (solar + eólica). A Ørsted é frequentemente citada como modelo de transição energética justa, com foco em inovação, empregabilidade e sustentabilidade.

Patagonia (vestuário e consumo consciente)

A marca de roupas outdoor Patagonia é reconhecida por seu modelo de negócios fundamentado em valores ambientais e sociais. A empresa não apenas neutraliza suas emissões operacionais com compensações verificadas, como



também prioriza o *design circular*, a longevidade de produtos e o consumo responsável. Seu programa *Worn Wear* promove a reutilização e o reparo de vestuário, reduzindo o descarte têxtil.

Em 2022, seu fundador Yvon Chouinard anunciou a doação de toda a estrutura de controle da companhia a um *trust* e a uma ONG ambiental. Os lucros da Patagonia são integralmente direcionados para o combate às mudanças climáticas e para a proteção da biodiversidade (Patagonia, 2022).

Unilever (bens de consumo e agricultura regenerativa)

A Unilever, multinacional de bens de consumo, tem se comprometido a atingir emissões líquidas zero em todas as suas operações e cadeia de valor até 2039. Adicionalmente, implementa práticas de agricultura regenerativa em sua cadeia de fornecedores, especialmente nos setores de chá, laticínios e óleo de palma. A empresa atua na promoção da biodiversidade do solo, na redução de fertilizantes sintéticos e na melhoria do sequestro de carbono no solo.

Seu programa *Climate and Nature Fund*, com orçamento de €1 bilhão, financia inovações em embalagens biodegradáveis, logística de baixo carbono e educação ambiental em comunidades vulneráveis. A Unilever também atua como influente articuladora de políticas públicas por meio de consórcios como o *Corporate Leaders Group on Climate Change*.

Natura &Co (indústria cosmética e bioeconomia)

No contexto latino-americano, a brasileira Natura &Co é uma das líderes em sustentabilidade empresarial. Desde 2007, a empresa adota inventários de carbono auditados e metas de mitigação alinhadas à metodologia Science-Based Targets Initiative (SBTi). A companhia também investe em projetos de conservação florestal na Amazônia, promovendo cadeias produtivas baseadas em bioativos nativos e na valorização do conhecimento tradicional.

A empresa neutraliza 100% de suas emissões de carbono desde 2007 e, em 2020, tornou-se signatária do compromisso *Net Zero* até 2030, buscando descarbonizar toda sua cadeia produtiva, logística e comercial (Natura, 2021).

Impactos, limites e lições aprendidas

Esses casos demonstram que a liderança corporativa na mitigação climática, além de ser possível, é economicamente viável e reputacionalmente vantajosa. Empresas que alinham suas estratégias de longo prazo com as demandas do Acordo de Paris tendem a apresentar maior resiliência de mercado, atração de investidores (ESG) e fidelização de consumidores conscientes.

Contudo, ainda há desafios consideráveis. A ausência de métricas padronizadas dificulta a comparabilidade entre compromissos; muitas metas permanecem voluntárias e não vinculantes; e há críticas ao uso excessivo de compensações de carbono em detrimento da redução direta de emissões.

Adicionalmente, o fenômeno do *greenwashing* (maquiagem verde) exige maior escrutínio público e regulatório. Portanto, a transparência, a auditoria independente e a participação da sociedade civil são elementos fundamentais para validar os avanços corporativos rumo à neutralidade climática.

A mitigação das mudanças climáticas requer uma reconfiguração profunda dos modelos econômicos e produtivos atuais. Nesse contexto, as empresas desempenham papel central, não apenas como emissores relevantes, mas como agentes de transformação tecnológica, cultural e institucional.

As experiências da Microsoft, Ørsted, Patagonia, Unilever e Natura &Co indicam que é possível alinhar lucratividade com responsabilidade climática. Ao adotarem metas ambiciosas, investirem em inovação e promoverem parcerias com governos e comunidades, essas corporações sinalizam caminhos viáveis para uma transição justa e sustentável.

Entretanto, para que esses esforços não permaneçam restritos a uma elite

empresarial, é necessário um ecossistema de incentivos, regulação efetiva, educação climática e participação social. Só assim será possível consolidar um setor privado verdadeiramente comprometido com a contenção do colapso climático.



Figura 53. Apresenta os principais instrumentos de avaliação de desempenho na economia circular corporativa e seus desafios de implementação. A imagem apresenta quatro ferramentas relevantes: o Material Circularity Indicator (MCI), da Ellen MacArthur Foundation; a futura norma ISO 59000, voltada à padronização de métricas para economia circular; as Certificações Cradle to Cradle, que avaliam o ciclo de vida completo dos produtos; e os relatórios baseados nos indicadores da Global Reporting Initiative (GRI). Na parte inferior, são destacados os principais desafios para a implementação corporativa da economia circular, incluindo barreiras regulatórias, resistência organizacional, infraestrutura limitada, baixa percepção de valor pelos consumidores finais e desigualdades no acesso a recursos tecnológicos, especialmente no Sul Global.

O papel do ativismo climático e da pressão pública nas respostas governamentais à crise climática

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios do século XXI, exigindo transformações profundas em padrões de produção, consumo e

governança. Embora os avanços científicos tenham consolidado o diagnóstico da crise climática, o progresso político global tem sido marcado por lentidão e, muitas vezes, retrocessos. Nesse contexto, o ativismo climático e a pressão pública emergem como forças centrais para romper a inércia institucional e acelerar a transição ecológica. A sociedade civil, por meio de protestos, campanhas digitais, greves escolares e litígios climáticos, tem desempenhado um papel cada vez mais relevante na formulação e implementação de políticas ambientais robustas (Fisher; Nasrin, 2021).

Ativismo climático: conceito, evolução e abordagens

O ativismo climático pode ser entendido como um conjunto de ações coletivas orientadas a influenciar políticas públicas, práticas corporativas e comportamentos sociais no enfrentamento da emergência climática. Ele manifesta-se em diversas escalas – local, nacional e internacional – e por meio de múltiplas estratégias: mobilizações de rua, desobediência civil pacífica, campanhas nas mídias sociais, produção de conhecimento independente e lobby legislativo.

Historicamente, o movimento ambiental global ganhou força nos anos 1970, com a emergência de organizações como Greenpeace e Friends of the Earth. Contudo, o ativismo climático contemporâneo, a partir da década de 2000, passou a ter maior protagonismo com a consolidação do IPCC, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) e as Conferências das Partes (COPs), nas quais organizações da sociedade civil atuam como observadoras e pressionam por ambição climática.

Mais recentemente, novos atores e formatos de mobilização surgiram, notadamente com o movimento *Fridays for Future*, liderado por Greta Thunberg, com a *Extinction Rebellion* e com os litígios climáticos promovidos por ONGs, coletivos de jovens e povos indígenas. Tais movimentos, apesar de diversos em suas táticas, compartilham a denúncia do “greenwashing institucional”, a

defesa da justiça climática intergeracional e a urgência de ação política baseada na ciência.

Pressão pública como alavanca de ação governamental

A literatura em ciência política ambiental indica que governos tendem a responder com maior agilidade e ambição às mudanças climáticas quando enfrentam pressão pública organizada (Tarrow, 2011; Dryzek *et al.*, 2013). Em democracias, essa pressão pode se traduzir em custos políticos para a inação, enquanto em regimes autoritários ou híbridos, o ativismo ambiental pode ser reprimido, mas ainda exerce influência via diplomacia, mídia e movimentos transnacionais.

Estudos de caso demonstram que:

- A mobilização popular contra a mineração e a expansão de combustíveis fósseis levou à suspensão de grandes projetos na Alemanha, França, Argentina e África do Sul;
- Campanhas como *Divest From Fossil Fuels* conseguiram com que universidades, fundos de pensão e instituições religiosas retirassem investimentos de indústrias poluentes, influenciando políticas financeiras públicas;
- Ações judiciais climáticas movidas por cidadãos e ONGs em países como Holanda (caso Urgenda), Alemanha e Colômbia resultaram em decisões judiciais vinculantes, obrigando os governos a aumentar suas metas climáticas;
- Em diversas cidades, consultas públicas e orçamentos participativos verdes têm levado à adoção de planos de mitigação e adaptação em resposta à pressão de comunidades vulneráveis e movimentos locais.

O papel da mídia e das redes digitais

As mídias tradicionais e plataformas digitais desempenham um papel

ambíguo: de um lado, amplificam mensagens ativistas e facilitam o engajamento; de outro, são também espaços de desinformação climática e discursos anticientíficos.

Campanhas como ClimateStrike, ActOnClimate e ClimateJustice viralizaram globalmente, conectando ativistas de diferentes realidades socioculturais e promovendo o conceito de “clima como direito humano”. A literatura aponta que a comunicação eficaz e emocionalmente envolvente, ancorada em dados científicos, é mais eficaz do que mensagens meramente catastróficas ou culpabilizadoras (Moser, 2016).

Desafios e críticas ao ativismo climático

Apesar de sua relevância, o ativismo climático enfrenta desafios significativos:

- Fragmentação discursiva, com tensões entre abordagens reformistas (por exemplo: transição energética gradual) e radicais (como decrescimento econômico e crítica ao capitalismo);
- Repressão estatal e criminalização de ativistas, especialmente em países do Sul Global;
- Barreiras sociais à participação, como desigualdades de acesso à informação, tempo livre e segurança;
- Esgotamento e *burnout* em militantes expostos a constantes frustrações políticas e catástrofes climáticas.

Ainda assim, a literatura aponta que os movimentos climáticos exercem efeitos simbólicos e culturais profundos, promovendo mudanças normativas e moldando a opinião pública, o que, a longo prazo, influencia ciclos eleitorais e marcos regulatórios (Rootes, 2004; Dietz *et al.*, 2013).

O ativismo climático e a pressão pública são componentes indispensáveis na luta contra a crise climática. Eles cumprem funções estratégicas, como:

- Exigir *accountability* dos governos e corporações;

- Defender os interesses das populações vulnerabilizadas;
- Traduzir o conhecimento científico em linguagem acessível e mobilizadora;
- Estimular a inovação democrática e institucional.

Frente ao risco de colapso ecológico e injustiça climática, a mobilização cidadã torna-se não apenas legítima, mas essencial. Como demonstrado ao longo desta seção, a construção de uma democracia ecológica participativa e informada é inseparável do fortalecimento dos movimentos sociais, da liberdade de expressão e do reconhecimento da ação política como uma dimensão central da sustentabilidade.



Figura 54. Mostra a dinâmica entre ativismo climático, pressão pública e respostas governamentais diante da crise climática. O diagrama ilustra um ciclo em que o ativismo climático impulsiona a mobilização da sociedade civil, gerando pressão pública. Essa pressão influencia a formulação de respostas governamentais voltadas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas. As ações ou omissões dos governos, por sua vez, impactam o agravamento ou o controle da crise climática, retroalimentando novas manifestações de ativismo. A imagem destaca a interdependência entre atores sociais e instituições públicas no enfrentamento da emergência climática.

Movimentos sociais e iniciativas de base como catalisadores de transformações climáticas e socioambientais

A intensificação das mudanças climáticas, associada à crise da biodiversidade e à desigualdade socioambiental crescente, tem fomentado uma ampla gama de movimentos sociais e iniciativas de base comunitária voltadas à mitigação dos impactos ambientais e à promoção da justiça climática. Esses movimentos operam como atores políticos e culturais essenciais, pressionando governos, influenciando práticas empresariais e propondo alternativas sustentáveis enraizadas em saberes locais, científicos e populares. Esta seção explora experiências concretas que ilustram o potencial transformador desses coletivos em contextos diversos.

Movimentos sociais globais e mudanças sistêmicas

Fridays for Future (FFF)

Iniciado em 2018 pela ativista sueca Greta Thunberg, o Fridays for Future rapidamente expandiu-se para mais de 150 países. Baseando-se em greves escolares coordenadas, o movimento mobilizou milhões de jovens em protestos pacíficos e articulados em torno da urgência de ações climáticas embasadas na ciência (Han; Ahn, 2020). A visibilidade internacional do FFF gerou impactos tangíveis: partidos políticos foram pressionados a adotar metas mais ambiciosas; o movimento influenciou decisões do Parlamento Europeu e da ONU, como a adoção do European Green Deal.

Extinction Rebellion (XR)

Lançado no Reino Unido em 2018, o Extinction Rebellion utiliza estratégias de desobediência civil não violenta para demandar ações radicais frente

à crise climática. O XR obteve destaque ao interromper centros urbanos e forçar a mídia a dar cobertura contínua ao tema. Seus protestos culminaram na declaração de “emergência climática” pelo Parlamento britânico em 2019, influenciando legislações de neutralidade de carbono em diversos países europeus (Taylor *et al.*, 2020).

Iniciativas de base no Sul Global: justiça climática e saberes tradicionais

Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB), Brasil

Desde os anos 1980, o MAB atua na defesa dos direitos de populações impactadas por grandes empreendimentos hidrelétricos no Brasil. Com base em uma crítica estrutural ao modelo energético nacional, o movimento propõe alterna-



**Considerações
finais**



As evidências científicas são inequívocas: as atividades humanas são as principais responsáveis pelas mudanças climáticas em curso, por meio da emissão maciça de gases de efeito estufa. A intensificação do uso de combustíveis fósseis, o modelo agroindustrial expansionista e o crescimento urbano sem planejamento sustentável estão entre os vetores mais relevantes dessa crise.

Mitigar essas emissões requer ações coordenadas e multiescalares, que envolvam descarbonização da matriz energética, proteção de florestas e solos, transição para sistemas agroecológicos, eficiência energética e mudança de padrões de consumo.

O desafio é imenso, mas o conhecimento científico acumulado fornece as ferramentas necessárias para a ação. Ignorar as causas antrópicas da mudança do clima não é apenas um erro epistemológico: é um ato de negligência ética com as futuras gerações e com os limites planetários.



Figura 55. Ilustra a atuação dos movimentos sociais e das iniciativas de base como vetores de transformação climática e socioambiental. A imagem mostra diferentes formas de engajamento popular, incluindo protestos por justiça climática, práticas comunitárias sustentáveis (como o cultivo agroecológico), projetos de energias renováveis em comunidades locais e diálogos colaborativos voltados à educação e à conscientização ambiental. Esses elementos destacam o papel crucial das ações locais e coletivas na construção de soluções integradas frente às mudanças climáticas, reforçando a importância da justiça social e ambiental no processo de transição ecológica.

Referências

- ADGER, W. N. *et al.* (2005). Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 309(5737):1036–1039. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1112122>.
- ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 2019, 11, 1675–1710. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.
- ALBRECHT, G. (2011). Chronic environmental change: Emerging ‘psychoterratic’ syndromes. In: WEISS-BECKER, I. (ed.). *Climate Change and Human Well-Being: Global Challenges and Opportunities*. Springer, 2011, pp. 43–56.
- ALDERMAN, K.; TURNER, L. R.; TONG, S. Floods and human health: A systematic review. *Environment International*, 2012, 47, 37–47. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.06.003>.
- ALONGI, D. M. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 2012, 3(3), 313–322. Disponível em: <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>.
- ALONGI, D. M. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76(1), 1–13.
- ALTIERI, M. A.; Nicholls, C. I. Agroecology and the emergence of a post COVID-19 agriculture. *Agriculture and Human Values*, 2020, 37, 525–526. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10043-y>.
- ARRHENIUS, S. A. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1896, 41(251):237–276. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>.
- BACCINI, A. *et al.* Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science*, 2017, 358(6360), 230–234. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aam59>.
- BASU, R.; SAMET, J. M. Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Reviews*, 2002, 24(2), 190–202. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/epirev/mxf007>.
- BERGER, A. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35(12), 2362–2367. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/1520-0469>.
- BERRY, H. L.; BOWEN, K.; KJELLSTROM, T. Climate change and mental health: a causal pathways framework. *International Journal of Public Health*, 2010, 55(2), 123–132. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00038-009-0112-0>.
- BINDOFF, N. L. *et al.* Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/>.

BOCKEN, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, *65*, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>.

BOPP, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*, 2013, 10: 6225–6245. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>.

BOYD, P.W. et al. Biological responses to environmental heterogeneity under future ocean conditions. *Global Change Biology*, 2015, 22(8): 2633–2650. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.13287>.

BRADLEY, R. S. *Paleoclimatology*: reconstructing climates of the Quaternary. San Diego: Academic Press, 1999, 610pp.

BRANCH, T.A. et al. Impacts of ocean acidification on marine seafood. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(3): 178–186. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.001>.

BROOK, B. W.; SODHI, N. S.; BRADSHAW, C. J. A. Synergies among extinction drivers under global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008 23(8), 453–460. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.03.011>.

BROOK, R. D. et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 2010, 121(21), 2331–2378. Disponível em: <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbece1>.

BUDYKO, M. I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 1969, 21(5), 611–619. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1969.tb00466.x>.

BURKE, M. et al. Higher temperatures increase suicide rates in the United States and Mexico. *Nature Climate Change*, 2018, 8(8), 723–729. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-0180222-x>.

BULLARD, R. D.; WRIGHT, B. *The Wrong Complexion for Protection*: How the Government Response to Disaster Endangers African American Communities. NYU Press: 2012.

CAESAR, L. et al. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature*, 2018, 556, 191–196. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>.

CALDEIRA, K.; KASTING, J. F. The life span of the biosphere revisited. *Nature*, 1992, 360(6406), 721–723. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/360721a0>.

CAMINADE, C. et al. Impact of climate change on global malaria distribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3286–3291. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1302089111>.

CAMPBELL-LENDRUM, D.; PRÜSS-USTÜN, A. Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. *Bulletin of the World Health Organization*, 2019, 97(2), 160–161. Disponível em: <https://doi.org/10.2471/BLT.18.224295>.

CHANCEL, L. et al. *World Inequality Report 2022*. World Inequality Lab. Disponível em: <https://wir2022.wid.world/>.

CHEN, I. C. et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(6045), 1024–1026. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1206432>.

CHEUNG, W. W. L. *et al.* Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology*, 2010, 16(1), 24–35. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01995.x>.

CLARK, P. U. *et al.* The Last Glacial Maximum. *Science*, 2009, 325(5941), 710–714.

CLAYTON, S. Climate anxiety: Psychological responses to climate change. *Journal of Anxiety Disorders*, 2020, 74, 102263. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2020.102263>.

CLAYTON, S. *et al.* Mental health and our changing climate: Impacts, implications, and guidance. *American Psychological Association and ecoAmerica*, 2017. Disponível em: <https://ecoamerica.org>.

COHEN, A. J. *et al.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 2017, 389(10082): 1907–1918. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6).

CONFALONIERI, U. E. C.; MARINHO, D. P.; RODRIGUEZ, R. E. Saúde na Amazônia: um modelo conceitual para análise de paisagens e doenças. *Estudos Avançados*, 2009, 23(65), 183–204. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142009000100013>.

CROWLEY, T. J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 2000, 289(5477):270–277. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.270>.

CUNSOLO, A.; ELLIS, N. R. Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss. *Nature Climate Change*, 2018, 8(4), 275–281. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0092-2>.

CUNSOLO, A.; LANDMAN, K. (eds.). *Mourning Nature: Hope at the Heart of Ecological Loss and Grief*. McGill–Queen’s University Press, 2017. Disponível em: <https://www.mqup.ca/mourning-nature-products-9780773549340.php>.

DESCHAMPS, P. *et al.* Ice-sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 years ago. *Nature*, 2012, 483(7391), 559–564.

DIETZ, T., Stern, P. C., & Weber, E. U. (2013). Reducing carbon-based energy consumption through changes in household behavior. *Daedalus*, 142(1), 78–89. https://doi.org/10.1162/DAED_a_00186.

DOBSON, A. *Environmental Citizenship: Towards Sustainable Development*. MIT Press, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sd.344>.

DOHERTY, T. J.; CLAYTON, S. The psychological impacts of global climate change. *American Psychologist*, 2011, 66(4), 265–276. Disponível em: <https://doi.org/10.1037/a0023141>.

DONEY, S. C. *et al.* Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1, 169–192. Disponível em: <https://n2t.org/ark:/85065/d78p61jc>.

DRYZEK, J. S.; NORGAARD, R. B.; SCHLOSBERG, D. *Climate-Challenged Society*. Oxford University Press, 2019. Disponível em: <https://global.oup.com/academic/product/climate-challenged-society-9780199660117?cc=br&lang=en&>.

DUDGEON, D. *et al.* Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 2006, 81(2), 163–182. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>.

ECDC – European Centre for Disease Prevention and Control. **Autochthonous dengue cases in Europe.** 2023. Disponível em: <https://www.ecdc.europa.eu>.

EBI, K. L.; NEALON, J. Dengue in a changing climate. **Environmental Research**, 2016 151, 115–123. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.026>.

EBI, K. L. et al. Hot weather and heat extremes: health risks. **The Lancet**, 2018, 392(10153), 2174–2175. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32594-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32594-5).

ELKINGTON, J. (1997). **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business.** Oxford: Capstone Publishing.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. (2013). **Towards the circular economy**, Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.

FABRY, V. J. et al. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. **ICES Journal of Marine Science**, 2008, 65(3): 414–432. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn048>.

FAIRBANKS, R. G. A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. **Nature**, 1989, 342(6250), 637–642.

FAO et al. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023:** Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. Rome, FAO, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc3017en>.

FEW, R. et al. Floods, health and climate change: a strategic review. **Tyndall Centre for Climate Change Research**, 2004, Working Paper 63. Disponível em: https://www.unisdr.org/files/1985_VL206506.pdf.

FISHER, D. R.; NASRIN, S. Climate activism and its effects. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, 2021, 12(1), e682. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/wly/wirecc/v12y2021iine683.html>.

FLEMING, K. et al. Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far-and intermediate-field sites. **Earth and Planetary Science Letters**, 1998, 163(1–4), 327–342.

FOURIER, J. Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. **Mémoires de l'Académie Royale des Sciences**, 1827, 7:569–604. Disponível em: <https://geosci.uchicago.edu/~rtp1/papers/Fourier1827Trans.pdf>.

FRIEDE, G., Busch, T., & Bassan, A. (2015). ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. **Journal of Sustainable Finance & Investment**, 5(4), 210–233. <https://doi.org/10.1080/20430795.2015.1118917>.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Global Carbon Budget 2022. **Earth System Science Data**, 2022, 14(11), 4811–4900. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.

GATTI, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Araújo, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. L. (2021). **Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change.** *Nature*, *595*(7867), 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

GEISSDOERFER, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

GILES, L. V. *et al.* From good intentions to proven interventions: Effectiveness of actions to reduce the health impacts of air pollution. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(1), 29–36. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.1002258>.

GISSI, E. *et al.* A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment. *Sci Total Environ*, 2020, 10;755(Pt 1):142564.10.1016/j.scitotenv.2020.142564.

GUILD, R.; WANG, X.; QUIJÓN, P. A. Climate change impacts on coastal ecosystems. *Environmental Research: Climate*, 2025, 3(4). Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad9f90>.

HABERLE, R. M.; CATLING, D. C. A Micro-Meteorological mission for global network science on Mars: rationale and measurement requirements. *Planetary and Space Science*, 1996, 44,11, 1361–1375. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(96\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(96)00056-6).

HAJAT, S.; O'CONNOR, M.; KOSATSKY, T. Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. *The Lancet*, 2010, 375(9717), 856–863. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)61711-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)61711-6).

HAN, H.; AHN, S. W. Youth mobilization to stop global climate change: Narratives and impact. *Sustainability*, 2020, 12(10), 4127. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v12y2020i10p-4127-d359682.html>.

HAYS, J. D.; IMBRIE, J.; SHACKLETON, N. J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194(4270), 1121–1132. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.194.4270.1121>.

HELLER, N. E.; ZAVALETÀ, E. S. Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 2009, 142(1), 14–32. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.006>.

HEUER, R. M.; GROSELL, M. Physiological impacts of elevated carbon dioxide and ocean acidification on fish. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2014, 307(9): R1061–R1084. Disponível em: <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00064.2014>.

HOEGH-GULDBERG, O. *et al.* Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 2007, 318(5857), 1737–1742. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1152509>.

HOFFMAN, P. F.; SCHRAG, D. P. (2002). The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 2002.

HOPKINS, R. *The Transition Companion: Making Your Community More Resilient in Uncertain Times*. Chelsea Green Publishing, 2011.

HUGHES, T. P. *et al.* Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 2017, 543: 373–377. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature21707>.

IDMC – Internal Displacement Monitoring Centre (2023). *Global Report on Internal Displacement 2023*. Disponível em: <https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2023/>.

IEA – International Energy Agency. **World Energy Outlook 2021**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: https://www.balkanenergy.com/forecasting?gad_source=1&gad_campaignid=21513372719&gbrai-d=oAAAAADqao22l9GZLqEjceoyHwS2pSLSRW&gclid=CjoKCOjw097CBhDIARISAJ3-nxfd1_mPsXgWW-VM_8YMDpMnykF7INWStwZWBxoYukAi_kgvGVTAm1S8aAj27EALw_wcB.

IEA. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021. **International Energy Agency**, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.

IPCC. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.

IPCC. **Climate Change 2013**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C**: Summary for Policymakers. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. **Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report**. Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.

IPCC. Climate Change 2023: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/>.

IVANOVA, D. et al. Environmental impact assessment of household consumption. **Journal of Industrial Ecology**, 2016, 20(3), 526–536. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jiec.12371>.

JACOB, D. J.; WINNER, D. A. Effect of climate change on air quality. **Atmospheric Environment**, 2009, 43(1): 51–63. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>.

JONES, P. D. et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. **Reviews of Geophysics**, 1999 37: 173–199.

JUNK, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). **The flood pulse concept in river-floodplain systems**. In D. P. Dodge (Ed.), Proceedings of the International Large River Symposium (LARS) (pp. 110–127). Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences.

KEELING, C. D. et al. Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole. **Tellus**, 1976. 28: 552–564. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1976.tb00702.x>.

KIMBLE, G. H. T. **Geografia na Idade Média**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2013, 345p. Disponível em: <http://www.uel.br/editora/portal/pages/arquivos/geografia%20na%20idade%20media.pdf>.

KIRCHHERR, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.

KNOLL, A. H. **Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth.** Princeton University Press, 2003.

KOVATS, R. S.; HAJAT, S. Heat stress and public health: a critical review. *Annual Review of Public Health*, 2008 29, 41–55. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>.

KROEKER, K. J. Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecology Letters*, 2013, 13(11): 1419–1434. 10.1111/j.1461-0248.2010.01518.x.

KUDO, G.; IDA, T. Y. Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators. *Ecology*, 2013, 94(10), 2311–2320. Disponível em: <https://doi.org/10.1890/12-2003.1>.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677), 1623–1627. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.

LAMBECK, K.; CHAPPELL, J. Sea level change through the last glacial cycle. *Science*, 2001, 292(5517), 679–686.

LAMBECK, K. *et al.* Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(43), 15296–15303.

LANDRIGAN, P. J. *et al.* The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 2018, 391(10119), 462–512. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0).

LEAN, J. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2009, 1(1), 111–122. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.18>.

LEITE, J. C. Controvérsias na climatologia: o IPCC e o aquecimento global antropogênico. *Sci. Stud.*, 2015, 13 (3). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-31662015000300008>.

LELIEVELD, J. *et al.* Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116(15), 7192–7197. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>.

LENTON, T. M. *et al.* Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(6), 1786–1793. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>.

LIERMANN, C. R. *et al.* Implications of dam obstruction for global freshwater fish biodiversity. *BioScience*, 2012, 62(6), 539–548. Disponível em: <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.5>.

LIU-HELMERSSON, J. *et al.* Vectorial capacity of *Aedes aegypti*: effects of temperature and implications for global dengue epidemic potential. *PLoS ONE*, 2014, 9(3): e89783. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089783>.

LOREK, S.; FUCHS, D. Strong sustainable consumption governance – precondition for a degrowth path? *Journal of Cleaner Production*, 2013, 38, 36–43. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.008>.

LORENZ, E.N. (1963) Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20, 130–141. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:dnf>2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:dnf>2.0.co;2).

LOUGHNAN, M. E.; NICHOLLS, N.; TAPPER, N. J. The effects of summer temperature, age and socioeconomic circumstance on acute myocardial infarction admissions in Melbourne, Australia. *International Journal of Health Geographics*, 2015, 9(1), 1–10. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1476-072X-9-41>.

LOVEJOY, T.E.; NOBRE, C. Amazon tipping point: Last chance for action. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaat2340. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>.

LOWE, S. R. et al. Psychological resilience after Hurricane Sandy: the influence of individual- and community-level factors on mental health after a large-scale natural disaster. *PLOS ONE*, 2013, 10(5), e0125761. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125761>.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. IPCC, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

MARTINEZ, G. S.; DÍAZ, J.; GARCÍA-HERRERA, R. Climate change and health inequities: a framework for analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(14), 7542. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147542>.

MCGREGOR, G. R. **Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development**. World Meteorological Organization & WHO, 2015.

MESSINA, J. P. et al. The current and future global distribution and population at risk of dengue. *Nature Microbiology*, 2019, 4(9), 1508–1515. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41564-019-0476-8>.

MONTAGGIONI, L. F. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: development patterns and controlling factors. *Earth-Science Reviews*, 2005, 71(1–2), 1–75.

MORDECAI, E. A. Climate change could shift disease burden from malaria to arboviruses in Africa. *The Lancet Planetary Health*, 2017, 1(9), e416–e423. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30100-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30100-6).

MOSER, S. C. Reflections on climate change communication research and practice in the second decade of the 21st century. *WIREs Climate Change*, 2016, 7(3), 345–369. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/wly/wirecc/v7y2016i3p345-369.html>.

MOUTINHO, P. **REDD in Brazil**: A focus on the Amazon. Principles, criteria, and institutional structures for a national program for Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation – REDD. Edition: First. Publisher: Center for Strategic Studies and Management, 2011. Editor: Center for Strategic Studies and Management. ISBN: 978-85-60755-44-8.

MYERS, S. S. et al. Climate change and global food systems: Potential impacts on food security and undernutrition. *Annual Review of Public Health*, 2017, 38: 259–277. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031816-044356>.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance. **The National Academies Press**, 2021. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25762/reflecting-sunlight-recommendations-for-solar-geoengineering-research-and-research-governance>.

NOAA Global Monitoring Laboratory – Carbon Cycle Greenhouse Gases. 2023. Disponível em: <https://gml.noaa.gov>.

NOYES, P. D.; MCELWEE, M. K.; MILLER, H. D. The toxicology of climate change: environmental contaminants in a warming world. **Environment International**, 2009, 35(6): 971–986. Disponível em: [10.1016/j.envint.2009.02.006](https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.02.006).

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1982, 108(455), 1–24. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.

OLIVEIRA, M. J. et al. História geológica e ciência do clima: métodos e origens do estudo dos ciclos climáticos na Terra. 2015.

OPAS – Organização Pan-Americana da Saúde. **Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos na saúde: cenários e incertezas para o Brasil**. Série Saúde Ambiental, 2008. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/mudancas_climaticas_ambientais_efeitos.pdf.

ØRSTED. (2022). **Annual report 2022**. Ørsted. <https://orsted.com/en/investors/ir-material/annual-reporting-2022>.

OTTO, I. M. et al. Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050. **PNAS**, 2020, 117(5), 2354–2365. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1900577117>.

PAN, Y., et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, 2011, 333(6045), 988–993. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.12016>.

PARMESAN, C.; YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. **Nature**, 2003, 421(6918), 37–42. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature01286>.

PATZ, J. A. et al. Impact of regional climate change on human health. **Nature**, 2005, 438(7066), 310–317. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature04188>.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Sumário Executivo do Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudança do Clima – RAN1**. 2016. Disponível em: https://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documents/RAN1_completo_vol1.pdf.

PECL, G. T. et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. **Science**, 2017, 355(6332), eaai9214. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>.

PETIT, J. R. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, 1999, 399(6735):429–436. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/20859>.

PIERREHUMBERT, R. T. **Principles of Planetary Climate**. Cambridge University Press, 2010.

PIERREHUMBERT, R. T. Climate dynamics of a hard snowball Earth. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 2005, 110(D1). Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2004JD005162>.

POPE, C. A.; EZZATI, M.; DOCKERY, D. W. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, 2009, 360(4): 376–386. Disponível em: <https://doi.org/10.1056/NEJMsa0805646>.

POLOCZANSKA, E. S. et al. Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 2013, 3, 919–925. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1958>.

POPKIN, B. M.; CORVALAN, C.; GRUMMER-STRAWN, L. M. Dynamics of the double burden of malnutrition and the changing nutrition reality. *The Lancet*, 2020, 395(10217), 65–74. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)32497-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)32497-3).

PORTRER, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating Shared Value: How to reinvent capitalism—and unleash a wave of innovation and growth. *Harvard Business Review*, 89(1/2), 62–77.

PÖRTNER, H. O.; FARRELL, A. P. Physiology and climate change. *Science*, 2008, 322(5902): 690–692. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1163156>.

RAMANATHAN, V.; COAKLEY, J. A. Climate modeling through radiative-convective models. *Reviews of Geophysics*, 1978, 16(4), 465–489. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/RG016i004p00465>.

RAY, D. K. et al. Climate change has likely already affected global food production. *PLOS ONE*, 2019, 14(5): e0217148. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>.

REID, G. M.; MacBeath, C. T.; CSATÁDI, K. Global challenges in freshwater-fish conservation related to public aquaria and the aquarium industry. *Internacional Zoo Yearbook*, 2013, 47(1): 6–45.

REID, C. E. et al. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(9), 1334–1343. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.1409277>.

REID, A. J. et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 2019, 94(3), 849–873. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/brv.12480>.

ROBISON, C. Energy poverty and gender in England: A spatial perspective. *Geoforum*, 2019, 104: 222–233. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.05.001>.

ROHLING, E. J. et al. Antarctic temperature and global sea level closely coupled over the past five glacial cycles. *Nature Geoscience*, 2009, 2(7), 500–504.

ROOTES, C. Environmental movements. In: SNOW, D.; SOULE, S.; KRIESI, H. (Eds.). *The Blackwell Companion to Social Movements*. Blackwell, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470674871.wbespm464.pub2>.

RYAN, S. J. et al. Global expansion and redistribution of Aedes-borne virus transmission risk with climate change. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 2019, 13(3): e0007213. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007213>.

SCHLOSBERG, D.; COLLINS, L. B. From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2014, 5(3), 359–374. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.275>.

SCHMIDHEINY, Stephan. *Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment*. Cambridge: MIT Press, 1992.

SEDDON, N. *et al.* Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2020, 375(1794): 20190120. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>.

SELLERS, W. D. A global climatic model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8(3), 392–400. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2).

SILVA, D. R. *et al.* Respiratory diseases in Brazil: economic impact and inequalities. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 2013, 39(2), 108–109. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-37132013000200001>.

SIRAJ, A. S. *et al.* Altitudinal changes in malaria incidence in highlands of Ethiopia and Colombia. *Science*, 2014, 343(6175): 1154–1158. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1244325>.

SHI, D. *et al.* Response to Comment on The complex effects of ocean acidification on the prominent N₂-fixing cyanobacterium *Trichodesmium*. *Science*, 2017, 357(6356). Disponível em: <http://science.sciencemag.org/content/357/6356/eaao0428>.

SIX, K. D. *et al.* Global warming amplified by reduced sulphur fluxes as a result of ocean acidification. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 975–978. 10.1038/nclimate1981.

SOLOMON, S. *et al.* Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(6), 1704–1709. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.0812721106>.

SPRINGMANN, M. *et al.* Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 2018, 562(7728), 519–525. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>.

STANAWAY, J. D. *et al.* Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks. *The Lancet*, 2018, 392(10159), 1923–1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32225-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32225-6).

STANKE, C. *et al.* Health effects of drought: a systematic review of the evidence. *PLOS Currents Disasters*, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/currents.dis.7a2cee9e980f91ad7697b570bcc4b004>.

STERN, P. C. Toward a coherent theory of environmentally significant behavior. *Journal of Social Issues*, 2000, 56(3), 407–424. Disponível em: https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/2170a4cf4ce55cbdfb2856011a8930bb.pdf/08_stern_2000.pdf.

STONE, B.; HESS, J. J.; FRUMKIN, H. Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities? *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(10), 1425–1428. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.0901879>.

TARROW, S. **Power in Movement**: Social Movements and Contentious Politics. Cambridge University Press, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511973529>.

TAUIL, P. L. Urbanização e ecologia do dengue. *Cadernos de Saúde Pública*, 2001, 17, S99–S102. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2001000700018>.

TAYLOR, F. W.; TITOV, D. V.; LIMAYE, S. **Venus**: The Atmosphere, Climate, and Surface. Springer, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-018-0467-8>.

TAYLOR, M. 2020. The evolution of Extinction Rebellion. **The Guardian**, 2020, <https://www.theguardian.com/environment/2020/aug/04/evolution-of-extinction-rebellion-climate-emergency-protests-coronavirus-pandemic>.

TRASANDE, L.; THURSTON, G. D. The role of air pollution in asthma and other pediatric morbidities. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, 2006, 117(4): 732–738. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2006.01.064>.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T. An apparent hiatus in global warming? **Earth's Future**, 2013, 1(1), 19–32. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013EF000165>.

TYNDALL, J. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 1861, 151:1–36. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstl.1861.0001>.

TYLIANAKIS, J. M. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, 2008, 11(12), 1351–1363. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01250.x>.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. **Global Stocktake Synthesis Report**. 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/topics/global-stocktake>.

UNEP. Emissions Gap Report 2023. **United Nations Environment Programme**, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>.

UNEP. **United Nations Environment Programme Emissions Gap Report 2022**. Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention On Climate Change**. 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.

VALERO, N. N.; URIARTE, M. Environmental and socioeconomic risk factors associated with visceral and cutaneous leishmaniasis: a systematic review. **Parasite Research**, 2020, 10, e00189. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00436-019-06575-5>.

VOLK, T.; HOFFERT, M. I. Ocean carbon pumps: analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO₂ changes. 1985. In: SUNDQUIST, E. T.; BROECKER, W. S. (Eds.), **The carbon cycle and atmospheric CO₂: natural variations Archean to present. Chapman conference papers**, 1984 (pp. 99–110). American Geophysical Union; Geophysical Monograph 32.

XU, R., Yu, P., Abramson, M. J., Johnston, F. H., Samet, J. M., Bell, M. L., Haines, A., Ebi, K. L., Li, S., & Guo, Y. (2020). Wildfires, global climate change and human health. **The New England Journal of Medicine**, *383*(22), 2173–2181. <https://doi.org/10.1056/NEJMsr2028985>.

ZISKA, L. H. et al. Food security and climate change: on the potential to reduce the nutritional quality of wheat under elevated CO₂. **Food Security**, 2016, 8: 865–874. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S12571-016-0604-0>.

ZHOURI, A.; OLIVEIRA, R. Desenvolvimento, conflitos territoriais e violência: a trajetória do movimento dos atingidos por barragens (MAB) em Minas Gerais. **Sociedade e Estado**, 2012, 27(2), 233–252. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/fvjLxvyn5chD8BJBsVrBJsS/?format=pdf&lang=pt>.

WALDBUSSER, G. et al. Saturation-state sensitivity of marine bivalve larvae to ocean acidification. **Nature Clim Change** 5, 273–280 (2015). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate2479>.

WALTHER, G. R. et al Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416(6879), 389–395. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/416389a>.

WATTS, N. et al. The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *The Lancet*, 2023, 402(10421), 1836–1894. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)01859-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01859-7).

WATTS, N. et al. The Lancet Countdown: tracking progress on health and climate change. *The Lancet*, 2017, 389(10074), 1151–1164. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)32124-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)32124-9).

WATTS, N. et al. The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *The Lancet*, 2021, 397(10269), 129–170. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32290-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32290-X).

WHO – World Health Organization. **Air pollution**. 2021. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>.

WHO – World Health Organization. **Operational Frameworks and Reports on Climate Change and Health**. 2015; 2018; 2021. Disponível em: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/373837/9789240081888-eng.pdf>.

WHO – World Health Organization. **Operational framework for building climate resilient health systems**. Geneva: WHO, 2015. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565073>.

WHO – World Health Organization. **World Malaria Report 2023**. Geneva: World Health Organization, 2023.

WHO – World Health Organization. **Air pollution and child health: prescribing clean air**. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/air-pollution-and-child-health>.

WHO – World Health Organization. **Operational framework for building climate resilient health systems**. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/373837/9789240081888-eng.pdf>.

WHO – World Health Organization. **Climate change and health**. 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>.

WHO – World Health Organization. **Operational framework for building climate resilient health systems**. Geneva: World Health Organization, 2015. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565073>.

WHO – World Health Organization. **Climate change and health**. 2018. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>.

WYNES, S.; NICHOLAS, K. A. The climate mitigation gap: Education and government recommendations miss the most effective individual actions. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(7), 074024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7541>.

Sobre os Autores



Edison Barbieri

Oceanógrafo, especializado em oceanografia biológica e geológica, com mestrado em Geografia Física e doutorado em Oceanografia, com ênfase em Oceanografia Biológica, pela Universidade de São Paulo (USP). Entre 2017 e 2024, esteve incluído entre os cientistas mais influentes do mundo, segundo o ranking da Universidade de Stanford (EUA) e da editora Elsevier BV. Membro da Comissão EcoOne Internacional.



Erick Paiva Barbieri

Jovem cientista da informação, formado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, com expertise em tecnologia da informação.



CENTRO UNIVERSITÁRIO
SÃO CAMILO

