

Mudanças climáticas atuais

Amanda Rehbein e Tercio Ambrizzi

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP

Resumo

O desenvolvimento humano, iniciado há cerca de 300 mil anos, sempre ocorreu em paralelo às variações naturais do clima. No entanto, desde a Revolução Industrial, a ação antrópica intensificou o efeito estufa, elevando a temperatura média global e alterando os padrões climáticos, resultando em impactos severos, como o aumento das temperaturas, alterações nos padrões de precipitação e aumento na frequência de eventos severos de tempo, como tempestades, tornados e furacões. Este artigo explora as principais mudanças climáticas atuais e como elas são monitoradas por meio da análise de dados históricos. Além disso, apresenta projeções de modelos climáticos que permitem antecipar cenários futuros, incluindo o aumento das temperaturas e mudanças nos padrões de precipitação, especialmente na América do Sul. Por fim, o texto destaca a importância de ações concretas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, responsáveis pelas mudanças climáticas atuais, utilizando tecnologias já disponíveis. Concluímos que, para enfrentar a emergência climática, é fundamental integrar os recursos humanos e naturais do Brasil, aliados ao conhecimento científico, a fim de implementar soluções eficazes para reduzir os impactos e proteger as populações mais vulneráveis.

Abstract

Human development, which began around 300,000 years ago, has always occurred in parallel with natural climate variations. However, since the Industrial Revolution, human action has intensified the greenhouse effect, raising the average global temperature and altering weather patterns, resulting in severe impacts such as rising temperatures, changes in precipitation patterns and an increase in the frequency of severe weather events such as storms, tornadoes and hurricanes. This article explores the main current climate changes and how they are monitored through the analysis of historical data. In addition, it presents projections from climate models that allow us to anticipate future scenarios, including rising temperatures and changes in precipitation patterns, especially in South America. Finally, the text highlights the importance of concrete actions to mitigate greenhouse gas emissions, responsible for current climate change, using technologies already available. We conclude that, in order to face the climate emergency, it is essential to integrate Brazil's human and natural resources, combined with scientific knowledge, in order to implement effective solutions to reduce impacts and protect the most vulnerable populations.

Palavras-chave: mudanças climáticas, aquecimento global, projeções climáticas, América do Sul, mitigação.

Keywords: climate change, global warming, climate projections, South America, mitigation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47590](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47590)

1 Introdução

O desenvolvimento da humanidade, iniciado cerca de 300 mil anos atrás, ocorreu em uma escala temporal muito menor, comparado com a história da Terra (mais de 4,5 bilhões de anos). Esse desenvolvimento foi acompanhado das variações naturais da atmosfera. Isso implica que nosso clima passou por constantes, embora lentas, mudanças naturais. Tais mudanças climáticas naturais foram relacionadas aos ciclos de Milankovitch, reguladores da quantidade de ra-

dição solar recebida pela Terra em escala geológica, grandes erupções vulcânicas capazes de injetar na alta atmosfera grande quantidade de partículas refletoras de radiação solar incidente e a própria atividade solar com ciclos de aproximadamente 11 anos. Esses fenômenos foram responsáveis por períodos de resfriamento da atmosfera, resultando em eras do gelo, e aquecimento, levando aos períodos interglaciares.

Com a evolução das atividades industriais, iniciadas por volta de 1750, outra forçante climática surgiu e está amplamente associada ao aumento

das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) resultantes, entre outros, da queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas insustentáveis, ou seja, é uma forçante antrópica (devido ao Homem) e não ocorrida na natureza espontaneamente, ocasionando mudanças no clima ao redor do mundo. Os impactos são muitos e descritos extensivamente nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, acrônimo em inglês) [1]. O aquecimento global, caracterizado pelo aumento das temperaturas médias globais, é o exemplo mais evidente da alteração do clima, com registros de temperaturas recordes nos últimos anos. A alteração nos padrões de precipitação tem levado a secas prolongadas em algumas regiões, enquanto outras enfrentam chuvas intensas e inundações. O aumento do nível do mar, causado pelo derretimento das calotas polares e expansão térmica da água dos oceanos, ameaça as áreas costeiras, afetando milhões de pessoas e ecossistemas. Além disso, eventos climáticos extremos, como furacões e ondas de calor, tornaram-se mais frequentes e intensos, representando uma ameaça crescente à segurança humana e à biodiversidade.

A relevância do tema das mudanças climáticas é imensa, pois elas afetam diretamente a qualidade de vida das populações, com impactos profundos na saúde pública, na produção de alimentos e na estabilidade econômica. As mudanças climáticas também exacerbam desigualdades sociais, atingindo de forma mais severa as comunidades mais vulneráveis, que possuem menos capacidade de adaptação e resiliência. Portanto, compreender as causas, os efeitos e as possíveis soluções para o fenômeno das mudanças climáticas é essencial para que possamos mitigar seus impactos e nos adaptar aos novos desafios que surgem. Este artigo tem como objetivo apresentar de uma forma simples as principais mudanças climáticas atuais, como elas são monitoradas e projetadas.

2 O aquecimento global e as mudanças climáticas

As condições atmosféricas observadas, como temperatura, umidade, precipitação, ventos, etc., em um determinado lugar e em um curto período

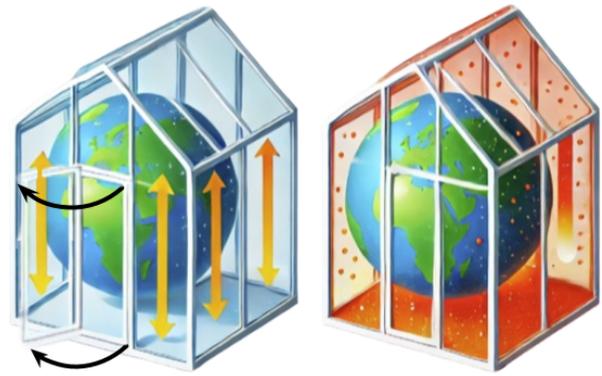


Figura 1: Esquemas de uma estufa vegetal (esquerda) e da atmosfera terrestre com os gases de efeito estufa (direita).

de tempo, geralmente horas ou dias, descrevem as condições de tempo deste lugar. Desta forma, se em um determinado dia está chovendo e a temperatura está mais baixa que no dia anterior, estamos descrevendo o tempo neste dia. Por outro lado, quando nos referimos às condições atmosféricas médias de uma região durante um período mais longo, geralmente décadas ou séculos, estamos falando do clima. O clima inclui a análise das variações do tempo, mas no contexto de uma média estatística ao longo do tempo. Portanto, enquanto o tempo pode mudar rapidamente, o clima é um fenômeno mais estável e a longo prazo. Por exemplo, o clima de uma região tropical é caracterizado por temperaturas elevadas e chuvas frequentes, enquanto uma região polar tem um clima frio e seco. As mudanças climáticas referem-se a alterações significativas e duradouras nos padrões climáticos da Terra. Nos últimos três séculos, as atividades humanas têm sido a principal força motriz das mudanças climáticas observadas atualmente em todo o mundo, especialmente através do aumento de emissões de GEE.

O efeito estufa é um fenômeno natural na atmosfera da Terra e é responsável por manter o planeta aquecido o suficiente para sustentar a vida. Esse fenômeno é comparável a um efeito que ocorre em uma estufa de plantas: enquanto as paredes de vidro ou plástico transparente da estufa permitem a entrada de luz solar, elas impedem que o calor escape, criando um ambiente mais quente (Figura 1). Na Terra, certos gases presentes em nossa relativamente fina atmosfera (aproximadamente 12 km) agem de maneira se-

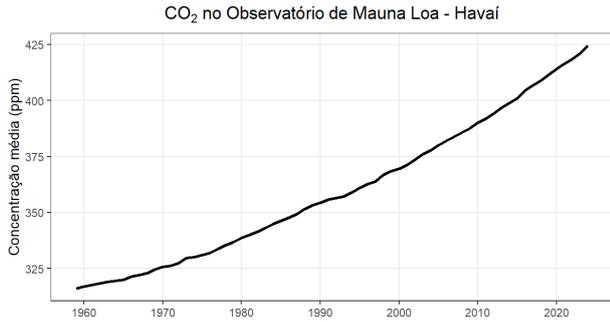


Figura 2: Concentrações médias anuais globais de CO_2 . Fonte de dados: NOAA/GML (gml.noaa.gov/ccgg/trends/).

melhante às paredes de vidro ou plástico transparente da estufa, aprisionando o calor na forma de radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra que deveria escapar para o espaço (Figura 1).

Os gases que causam o efeito estufa que nos referimos são principalmente vapor d'água (H_2O ; 50%), nuvens (25%), dióxido de carbono (CO_2 ; 20%), entre outros (5%), incluindo o gás metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3) e hidrofluorcarbonetos (HFCs) e formam uma espécie de “cobertura” que impede que parte do calor da Terra escape para o espaço. Sem o efeito estufa natural, a temperatura média da Terra seria cerca de -18°C , ou seja, modificando completamente as condições favoráveis para a vida no nosso planeta na forma que conhecemos. No entanto, quando a concentração de GEE aumenta devido às atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, por exemplo, seu efeito se intensifica. Isso resulta no aquecimento excessivo da atmosfera, o que tem causado o aquecimento global e as mudanças climáticas associadas.

A Figura 2 mostra a evolução das concentrações de CO_2 desde 1958, quando as medições foram iniciadas no Observatório de Mauna Loa, no Havaí. Mauna Loa é uma estação de monitoramento de CO_2 de referência, especialmente importante por ser um local relativamente isolado, longe de grandes fontes de emissão de CO_2 , o que permite observações mais representativas das concentrações globais desse gás. Note que a linha apresenta um aumento constante deste gás ao longo do tempo. Ao observar a Figura 3, a qual apresenta as temperaturas médias globais desde

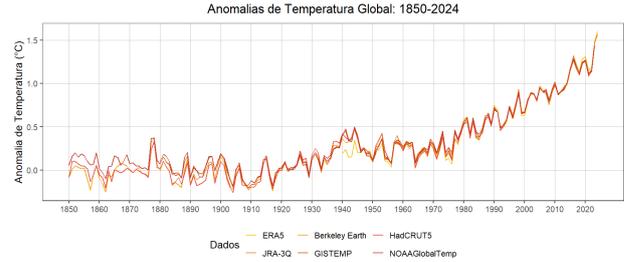


Figura 3: Temperatura média global ($^\circ\text{C}$). Fonte de dados: C3S (<https://climate.copernicus.eu/about-data-and-methods>).

1850, vemos que a partir do final dos anos 1950, a temperatura média do planeta começa a subir, coincidindo com o aumento constante do CO_2 observado na Figura 2.

Voltando ao efeito da estufa para cultivo de plantas, à medida que aumenta o calor no interior da estufa, janelas são abertas para haver ventilação e não causar um superaquecimento, que poderia comprometer a saúde das plantas cultivadas em seu interior. Na Terra, à medida que o planeta esquenta, não existem janelas a serem abertas. Ao invés, o calor é absorvido pelos oceanos e outros ecossistemas, causando um desequilíbrio e comprometendo o bom funcionamento de todos os organismos vivos. Desta forma, alguns dos efeitos ambientais resultantes das mudanças climáticas aceleradas que observamos com auxílio de medições locais e sensoriamento remoto via satélites em todo o globo, incluem o aumento em si da temperatura média na superfície da Terra, causando o derretimento das calotas polares e dos glaciares; elevação do nível do mar devido à expansão da água dos oceanos que vem absorvendo o calor extra da atmosfera, somado às águas do derretimento de geleiras e mantos de gelo sobre terra, tendo já ocasionado um aumento de 23 centímetros acima dos níveis observados em 1850; alterações nos ecossistemas, como, por exemplo, o aumento da acidificação dos oceanos, que podem levar à extinção de espécies; além do aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas severas prolongadas ou inundações devido a altos volumes de precipitação em um curto espaço de tempo.

De fato, ano após ano registramos e sentimos os efeitos descritos anteriormente. A Organização Meteorológica Mundial [2] relatou a ocorrência de 11.778 desastres climáticos e hídricos, causando

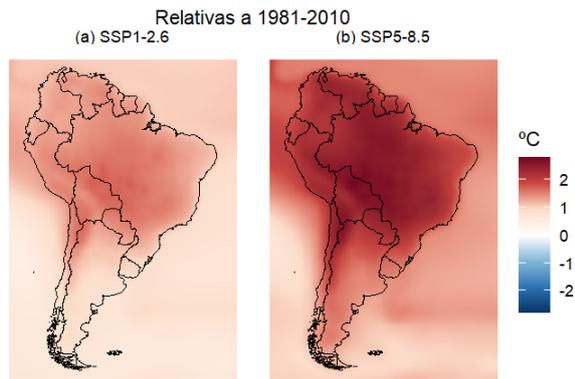
Mudanças na Temperatura Média (°C) em 2041-2060

Figura 4: Mudanças na temperatura média (°C) prevista para a metade do século XXI (2041-2060) em relação ao período de 1981-2010. Dois cenários do IPCC foram usados: a) SSP1-2.6 e b) SSP5-8.5, onde os resultados apresentaram uma média de, respectivamente, 32 e 34 diferentes modelos. Fonte dos dados: [4].

2 milhões de mortes e US\$4,3 trilhões em perdas econômicas entre 1970 e 2021. Só em 2024, segundo o último relatório “Climate and Catastrophe Insight” da AON seguradora britânica [3], ciclones tropicais, tempestades convectivas severas e inundações foram responsáveis pela maioria dos desastres, perdas de vidas (cerca de 18 mil) e econômicas (mais de US\$ 300 bilhões) ao longo do ano. Através das leis da termodinâmica, à medida que a temperatura média global aumenta, a capacidade da atmosfera de reter mais vapor d’água aumenta. Combinados, o calor e a umidade, são os principais combustíveis para a formação e desenvolvimento de sistemas de tempestades, como as relatadas pela OMM e AON. Portanto, já estamos observando efeitos claramente associados ao aquecimento global de força antrópica.

3 Projeções climáticas

Para nos ajudar a entender e prever os impactos do aquecimento global são utilizadas diversas ferramentas robustas, como uma rede de medições de variáveis meteorológicas globais e modelagem numérica do clima [5,6].

Apesar da complexibilidade do sistema climático terrestre, os modelos numéricos que descrevem o clima atingiram um estágio onde podem ser muito úteis para descrever o clima futuro sob determinadas circunstâncias. Por isso, usamos diferentes dados, abordagens e cenários. Na Amé-

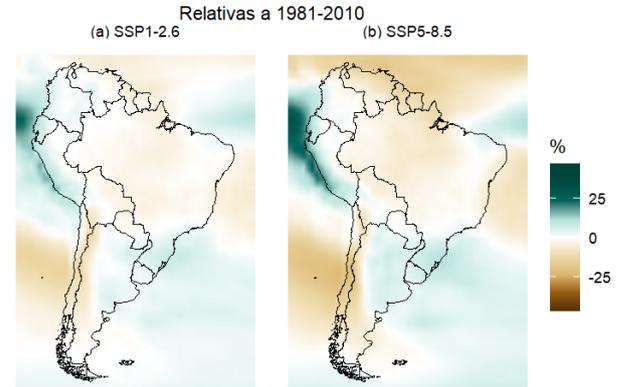
Mudanças na Precipitação Média (%) em 2041-2060

Figura 5: Mudanças na precipitação média (%) prevista para a metade do século XXI (2041-2060) em relação ao período de 1981-2010. Dois cenários do IPCC foram usados: a) SSP1-2.6 e b) SSP5-8.5, onde os resultados apresentam uma média de respectivamente 31 e 33 diferentes modelos. Fonte de dados: [4].

rica do Sul, particularmente, encontramos desafios como a extensão latitudinal do continente, a cordilheira dos Andes e as características climáticas locais e regionais, que são influenciadas por múltiplos fatores. A seguir apresentamos os mais recentes prognósticos produzidos dentro desses esforços científicos globais para entender e simular nosso clima. As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as projeções das mudanças nas temperaturas médias e precipitação para a metade deste século (2041-2060) comparado à climatologia de 1981 a 2010, onde assumiu-se que nosso planeta poderia aquecer com menos intensidade (Figura 4a e Figura 5a) e com projeções de grande aumento dos GEE neste período (Figura 4b e Figura 5b).

4 Conclusões

Com mais de 8 bilhões de habitantes e aumentando, diariamente, produzindo constantemente lixo em forma sólida, líquida e gasosa, é inevitável que o sistema climático natural responda à altura. É importante notar que, enquanto o tempo pode variar de maneira imprevisível e rápida, as mudanças climáticas referem-se a alterações mais lentas e duradouras nos padrões climáticos globais. As mudanças climáticas, portanto, não são observadas em eventos de curto prazo, como uma onda de calor ou uma tempestade, mas em tendências a longo prazo, como o aumento das

temperaturas médias anuais e mudanças nos padrões de precipitação em uma região, aumento da frequência e/ou intensidade destes fenômenos.

As projeções para um futuro próximo (metade deste século) indicam aumentos significativos da temperatura média na América do Sul, mesmo em um cenário de emissões de GEE mais brando. Por outro lado, os padrões de precipitação variam ao longo do continente, com uma porcentagem maior de mudanças positivas (mais chuvas) na porção sudeste do continente e negativa (menos chuvas) na parte norte, que envolve a Amazônia.

Atualmente existem diferentes tecnologias que poderiam mitigar as emissões de gases de efeito estufa, particularmente o CO₂ (dióxido de carbono) que vem do uso de combustíveis fósseis e queimadas, correspondendo a quase 80% das emissões. Impossível continuarmos vivendo sem existir um plano concreto de ação. O Brasil é um país economicamente rico, possui recursos humanos e naturais em abundância, com excelentes universidades formadoras de profissionais em meteorologia, climatologia, hidrologia e tantas outras áreas imprescindíveis para garantir uma previsão e estratégias de qualidade para toda a população. O que falta para combinar essas sinergias? Estamos passando por uma emergência climática e se nada for feito para mitigá-la, muitas vidas e bens patrimoniais ainda serão perdidos.

Sobre os autores

Amanda Rehbein (amanda.rehbein@usp.br) é pós-doutoranda no Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP), Brasil, e integrante do Núcleo de Pesquisa em Mudanças Climáticas da USP (INCLINE - INTER-disciplinary CLimate INvestigation cEnter).

Tercio Ambrizzi (tercio.ambrizzi@iag.usp.br) é Professor Titular do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP), Brasil. É coordenador do Núcleo de

Pesquisa em Mudanças Climáticas da USP (INCLINE - INTER-disciplinary CLimate INvestigation cEnter). Membro titular da Academia Brasileira de Ciências. É atualmente diretor do Instituto de Energia e Ambiente da USP.

Referências

- [1] S. K. Gulev et al., *Changing State of the Climate System*, in *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por V. Masson-Delmotte et al. (Cambridge University Press, 2021), 287–422.
- [2] Organização Meteorológica Mundial, *Mais de 90% das mortes por desastres naturais ocorreram em países em desenvolvimento*, ONU News (2023). Disponível em <https://news.un.org/pt/story/2023/05/1814787>, acesso em jan. 2025.
- [3] AON plc, *Climate and Catastrophe Insight* (2025). Disponível em <https://assets.aon.com/-/media/files/aon/reports/2025/2025-climate-catastrophe-insight.pdf>, acesso em jan. 2025.
- [4] J. M. Gutiérrez et al., *Atlas*, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por V. Masson-Delmotte, P. Zhai et al. (Cambridge University Press, 2021), 1927–2058.
- [5] T. Ambrizzi et al., *The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America*, *Annals of the new york academy of sciences* **1436**(1), 98 (2019).
- [6] M. Iturbide et al., *Implementation of FAIR principles in the IPCC: the WGI AR6 Atlas repository*, *Scientific Data* **9**(1), 629 (2022).