

Conexão Climática Global

Atmosfera, Oceano e Amazônia

Mensagens-chave

- A Amazônia enfrenta crescente pressão climática, com projeções indicando elevação contínua das temperaturas ao longo das próximas décadas.
- Os sistemas de circulação atmosférica e oceânica que regulam o clima global exercem influência direta sobre o regime hidrológico da Amazônia.
- Os oceanos absorvem mais de 90% do excesso de calor do planeta e regulam a umidade e a temperatura regionais. O aquecimento do Atlântico e o enfraquecimento da AMOC comprometem o transporte de umidade para a Amazônia, afetando seu regime hidrológico.
- Como consequência, há risco crescente de desequilíbrio nos chamados Rios Voadores, fluxos atmosféricos de vapor d'água, que sustentam o regime de chuvas e a estabilidade ecológica da floresta amazônica.
- Integrar conhecimentos científicos às políticas públicas é essencial para fortalecer a resiliência da Amazônia, orientando ações eficazes de adaptação e mitigação frente aos crescentes desafios climáticos.

Conexões climáticas na Amazônia

As interações entre oceano e atmosfera são fundamentais para o regime de chuvas da Amazônia. Mudanças nessas conexões afetam o transporte de umidade para a região e aumentam o risco de secas e instabilidade climática. Os Modelos climáticos globais, muito utilizados no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), ajudam a entender essas dinâmicas e a projetar cenários futuros, orientando ações de adaptação e mitigação. Esses modelos são baseados nas Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs), onde o cenário de altas emissões (SSP-585) pode levar a um aquecimento global superior a 4 °C até 2100. Esse cenário, usado como referência em análises de risco, indica maior vulnerabilidade da Circulação Meridional do Atlântico (em inglês: *Atlantic Meridional Overturning Circulation* - AMOC) a um enfraquecimento acentuado e interfere em elementos-chave para a manutenção da região Amazônica, tais como o oceano.

O PAPEL DO OCEANO NO CLIMA DA AMAZÔNIA

O oceano é o principal regulador do clima global. Ele absorve mais de 90% do calor extra causado pelas emissões de gases de efeito estufa¹. Esse aquecimento tem sido intenso no Atlântico tropical, onde a temperatura da superfície do mar vem subindo de forma acelerada. Quando o oceano aquece, há mais evaporação e umidade no ar, o que desloca a faixa onde os ventos dos dois hemisférios se encontram e formam nuvens e chuvas intensas, a Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT), alterando os padrões de chuvas e secas na Amazônia.

Entre 2023 e 2024, a temperatura da superfície do mar atingiu níveis históricos, especialmente no Atlântico Norte², que registrou 0,42 °C acima do recorde anterior, segundo a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (em inglês: *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA). As projeções indicam que essa tendência continuará. Em cenários de elevadas emissões, a temperatura do Atlântico pode subir mais de 2°C até 2050, aumentando o armazenamento de calor nas camadas superficiais do oceano (Fig. 1). Pesquisas indicam que o aquecimento do oceano Atlântico Norte Tropical exerce papel central na tendência de redução da precipitação na Amazônia, especialmente durante a estação seca, que pode ter diminuído em até 30% nas últimas décadas³. Esse aquecimento modifica os padrões de circulação oceânica e atmosférica, interferindo diretamente na dinâmica de chuvas da região.

Além disso, esse aquecimento acelera o derretimento de gelo nos polos e aumenta a entrada de água doce no Atlântico Norte, reduzindo sua salinidade. Isso enfraquece a Circulação Meridional do Atlântico (AMOC), um sistema essencial para redistribuir calor e manter a estabilidade climática global e regional⁴, como na Amazônia, a maior floresta tropical do mundo, que desempenha papel crítico na regulação do sistema climático global⁵ (Fig. 2).

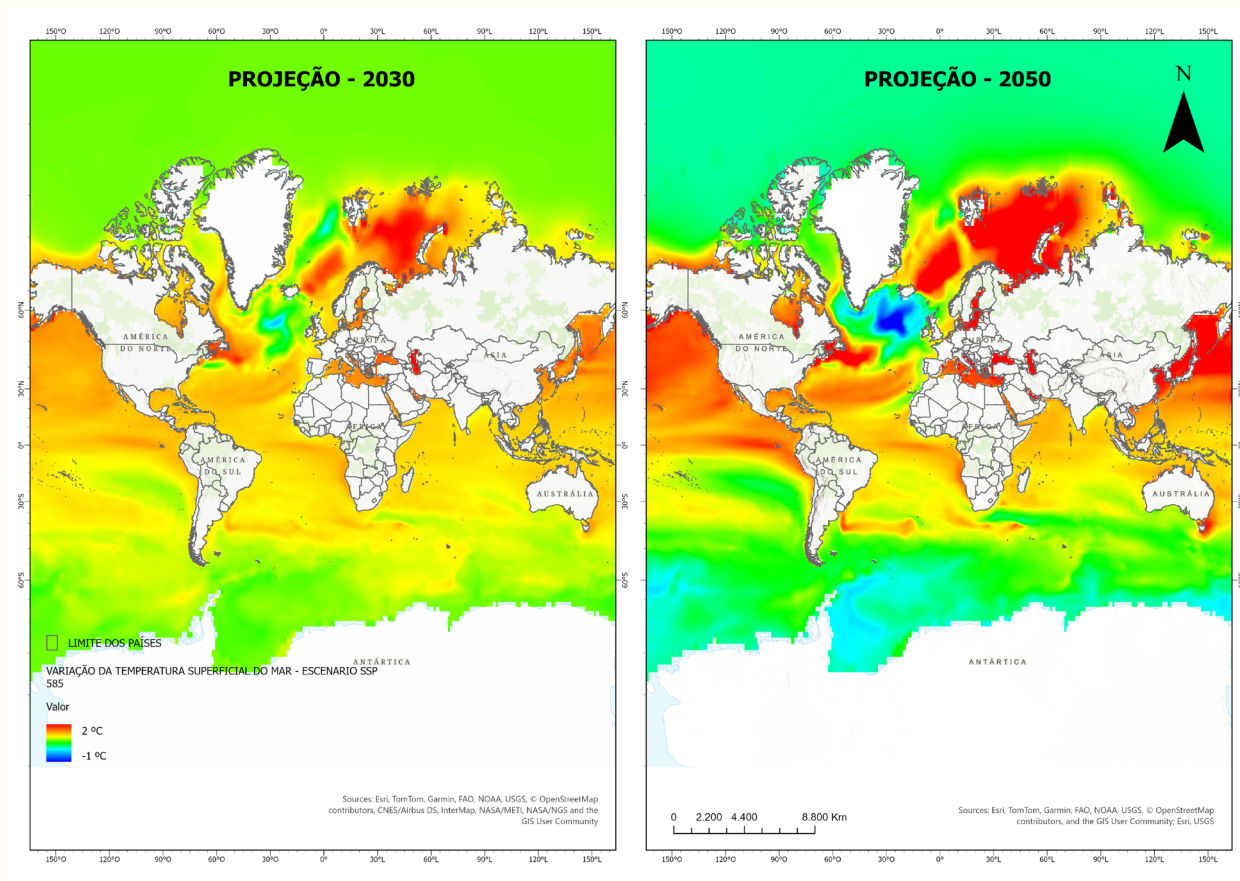


Figura 1. Média do conjunto de multimodelo (MME) do CMIP6 para a variação da Temperatura Superficial do Mar (ΔTSM) (°C) para projeções em 2030 e 2050 referente ao período 1970-2000 no cenário SSP-585. Fonte: Autor.

COMO A AMOC INFLUENCIA AS CHUVAS NA AMAZÔNIA?

A AMOC impacta diretamente as chuvas na Amazônia, pois regula o gradiente de temperatura do Atlântico e a posição da ZCIT. Quando a AMOC enfraquece, menos calor é transportado para o Hemisfério Norte, o que aquece relativamente mais o Atlântico Sul e desloca a ZCIT para o sul. O resultado é a mudança da intensidade e a sazonalidade das chuvas, aumentando a frequência e a gravidade das secas amazônicas.

Essas secas já são realidade. A região enfrentou eventos extremos em 2005, 2010, 2015, 2016 e 2023, muitos associados ao aquecimento anormal dos oceanos Atlântico e Pacífico^{6,7,8}. Em 2024, a temperatura média global ultrapassou 1,5 °C⁹, e as projeções indicam mais calor e secas prolongadas nos próximos anos, colocando a Amazônia em condição crítica.

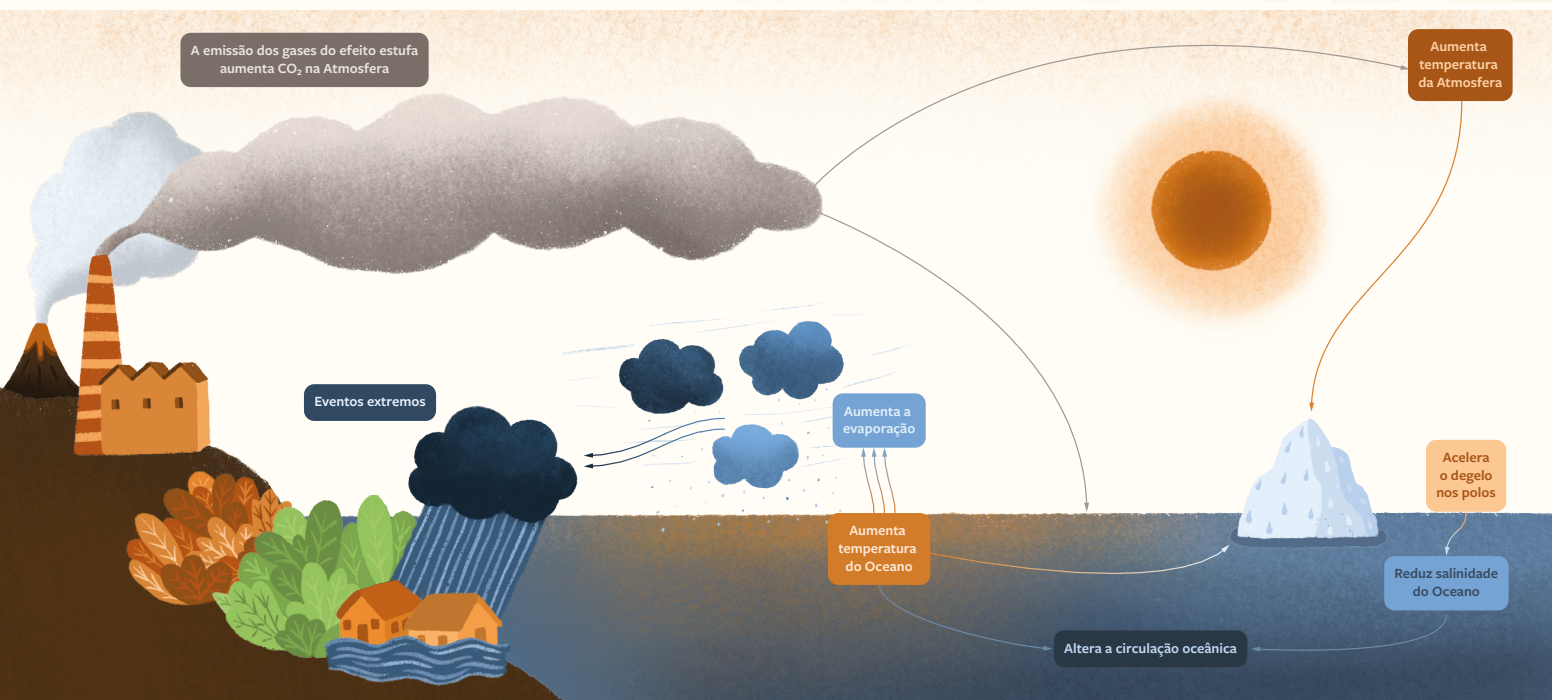


Figura 2. Interação oceano atmosfera sob efeito das mudanças climáticas no Oceano Atlântico.

Projeções Climáticas na Amazônia

Modelos climáticos e dados observacionais indicam que alterações na temperatura da superfície terrestre e oceânica já afetam o regime de chuvas na região, aumentando a frequência e intensidade de secas e chuvas extremas^{10,11}. A continuidade dessas pressões pode levar a transições ecológicas irreversíveis, pontos de não retorno, com substituição da floresta úmida por vegetações sazonais menos complexas como as savanas, resultando em perda de biodiversidade, capacidade de armazenamento de carbono e impactos em cascata para o clima continental^{12,13}.

A compreensão das mudanças climáticas na bacia amazônica depende da integração entre observações locais, reanálises regionais e modelos climáticos globais e regionais, capazes de representar a interação complexa entre florestas, atmosfera e oceanos. Esses modelos permitem simular impactos, avaliar riscos e orientar estratégias de mitigação e adaptação.

MUDANÇAS NA PRECIPITAÇÃO: SINAL DE ALERTA

Projeções climáticas apontam redução das chuvas na Amazônia, com áreas críticas já projetadas para 2030 e tendência de intensificação em 2050 (Fig. 3). Esse padrão aumenta o risco de secas extremas

e inundações sazonais, comprometendo: a) biodiversidade; b) agricultura e transporte fluvial; c) disponibilidade hídrica e d) fluxo de umidade que sustenta os rios voadores.

Esses impactos interligados podem levar a floresta a ultrapassar um ponto de não retorno, perdendo sua capacidade de regeneração e desencadeando um colapso ecológico. A Amazônia deixaria de ser um sumidouro de carbono, agravando ainda mais o aquecimento global e evidenciando a interdependência entre a estabilidade amazônica e o clima planetário.

RIOS VOADORES:

CORREDORES DE UMIDADE EM RISCO

Os chamados rios voadores são fluxos de vapor d'água gerados pela evapotranspiração da floresta amazônica e transportados por ventos de baixa altitude para regiões centrais e meridionais da América do Sul. Esses fluxos são essenciais para regular chuvas no continente.

Porém, mudanças climáticas, como aumento da temperatura e secas prolongadas, combinadas a degradação florestal, reduzem a recarga de umidade, comprometendo a formação e a estabilidade desses corredores atmosféricos. Estudos indicam que o desmatamento pode reduzir a precipitação regional em 10 a 20%, agravando ainda mais a perda progressiva dos rios voadores.¹⁴

A fragilidade desses sistemas evidencia que a Amazônia não responde apenas a pressões locais, mas que está profundamente conectada à dinâmica climática global. A perda dos rios voadores teria impactos severos na segurança hídrica, na produção agropecuária e na geração de energia, embora esses custos ainda sejam difíceis de estimar.

AQUECIMENTO GLOBAL E IMPACTOS LOCAIS

Os modelos climáticos globais projetam um aumento contínuo da temperatura ao longo do século XXI, com aquecimento mais acentuado no Hemisfério Norte em relação ao Sul (Fig. 4). Esse padrão assimétrico reflete a desigualdade histórica nas emissões de gases de efeito estufa, concentradas majoritariamente nos países do Norte global, enquanto regiões tropicais como a Amazônia, que pouco contribuíram para o problema, enfrentam de forma desproporcional os impactos do aquecimento global.

A elevação das temperaturas e a alteração nos padrões de precipitação agravam a vulnerabilidade ecológica e socioambiental da floresta, evidenciando uma assimetria entre responsabilidade e exposição aos riscos climáticos. Para a Amazônia, as projeções indicam aquecimento de até 2,5 °C em 2050 para altas emissões (Fig.4).

Esse cenário ameaça ecossistemas sensíveis, afetando a resiliência socioambiental da região e amplificando os impactos sobre a biodiversidade, o ciclo hidrológico e as populações que dependem da floresta.

Diante dessa desigualdade climática, a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA) fortalece a cooperação entre os países amazônicos, integrando dados e informações científicas por meio do Observatório Regional Amazônico (ORA), a fim de aprimorar os mecanismos de adaptação e mitigação regional.

REGULAÇÃO TÉRMICA PELAS CIRCULAÇÕES ATMOSFÉRICA E OCEÂNICA

A estabilidade do sistema climático global e de ecossistemas sensíveis como a Amazônia depende da regulação térmica promovida pelas circulações atmosférica e oceânica, que redistribuem o excesso de calor dos trópicos para latitudes mais altas.

Na atmosfera, os fluxos de circulação latitudinal e longitudinal redistribuem calor e umidade entre os trópicos, influenciando diretamente a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), faixa de instabilidade atmosférica que regula a ocorrência e a intensidade das chuvas na região amazônica. A ZCIT é uma faixa próxima ao Equador onde ventos dos dois hemisférios se encontram, fazendo o ar quente e úmido subir e gerar nuvens e chuvas. Essa faixa se desloca ao longo do ano, acompanhando as áreas mais aquecidas da superfície terrestre e dos oceanos.

No oceano, o transporte de calor ocorre por meio das correntes superficiais, impulsionadas pelos ventos, e pela circulação decorrente das diferenças de densidade causadas pela variação da temperatura e salinidade da água profunda, que conecta bacias oceânicas ao longo de milhares de quilômetros. Um dos principais sistemas envolvidos nesse processo é a Circulação Meridional do Atlântico (AMOC), uma corrente de larga escala que atua como uma “esteira transportadora” de calor entre o Hemisfério Sul e o Hemisfério Norte.

A AMOC leva águas quentes para o norte do oceano Atlântico, onde essas águas esfriam, tornam-se mais densas, afundam e retornam para o sul. A AMOC atua influenciando os gradientes térmicos inter-hemisféricos, consequentemente, a posição da ZCIT, fundamental para o equilíbrio térmico do planeta e influencia diretamente o clima em várias regiões, incluindo a Amazônia.

A umidade que alimenta a precipitação amazônica e que influenciam os Rios Voadores, provém majoritariamente do Atlântico tropical, sendo transportada por ventos de leste. A interação entre o oceano e a atmosfera modula o aporte dessa umidade sobre a bacia amazônica.



Corrente Meridional do Oceano Atlântico (AMOC)

Transporta águas quentes (superior)



Transporta águas frias (inferior)



Rios voadores



Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)



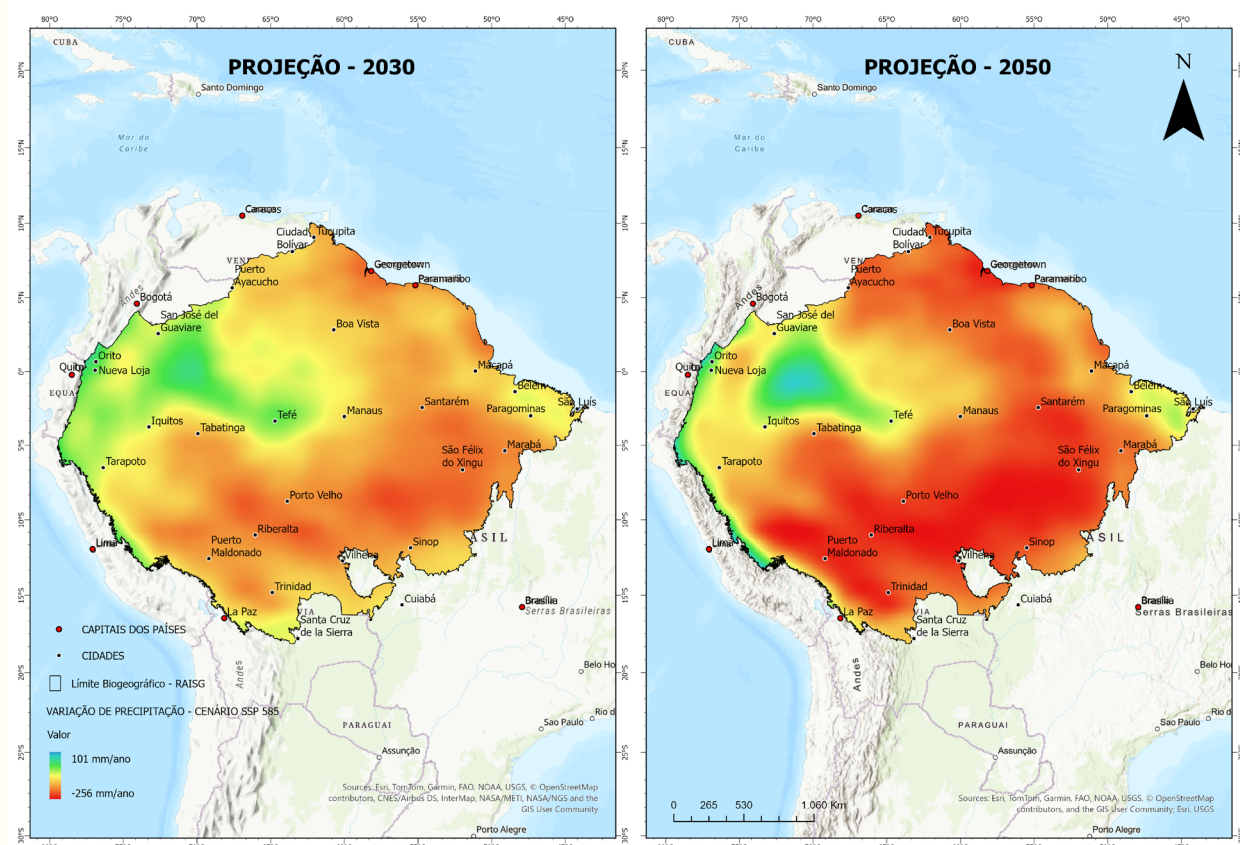


Figura 3. Média do conjunto de multimodelo (MME mean) do CMIP6 para a variação da Precipitação (mm/ano) para projeções em 2030 e 2050 referente ao período 1970-2000 no cenário SSP-585 na Amazônia. Fonte: Autor.

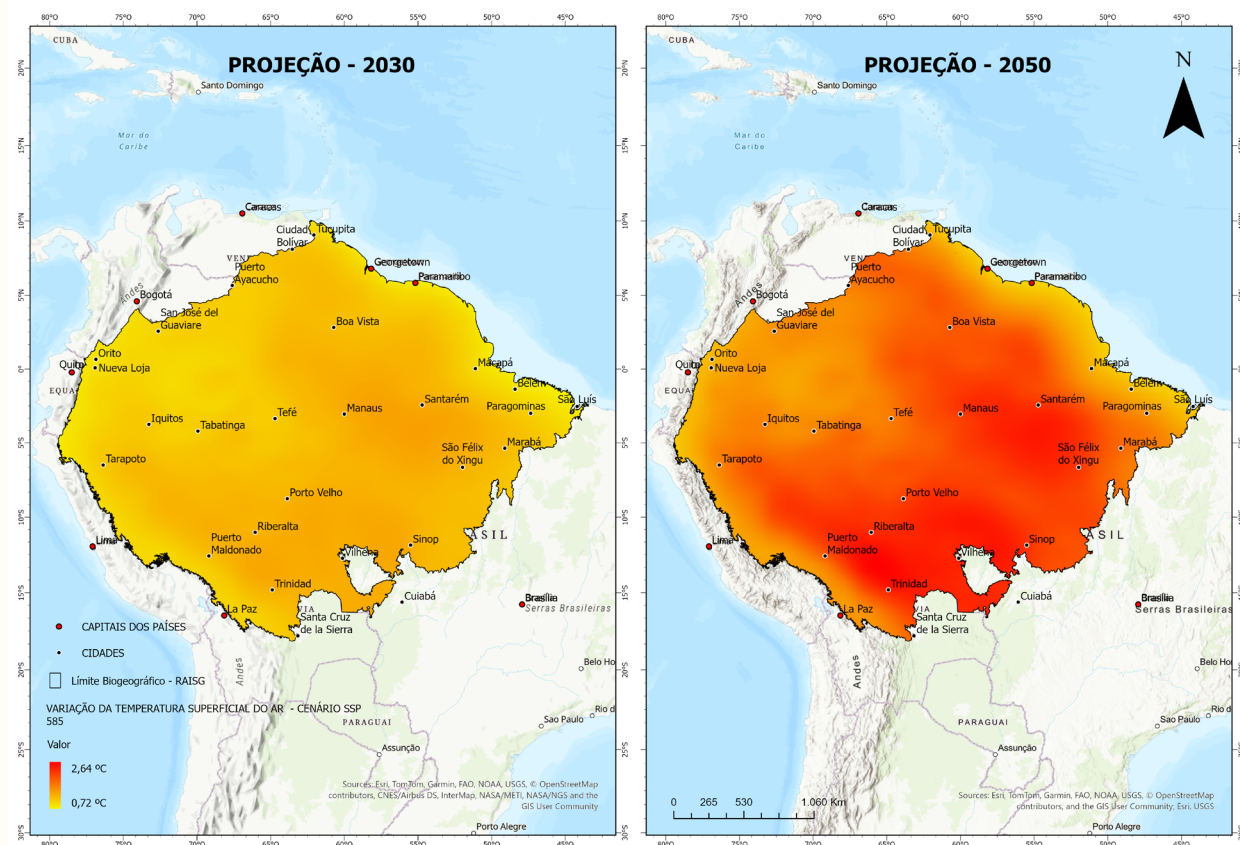
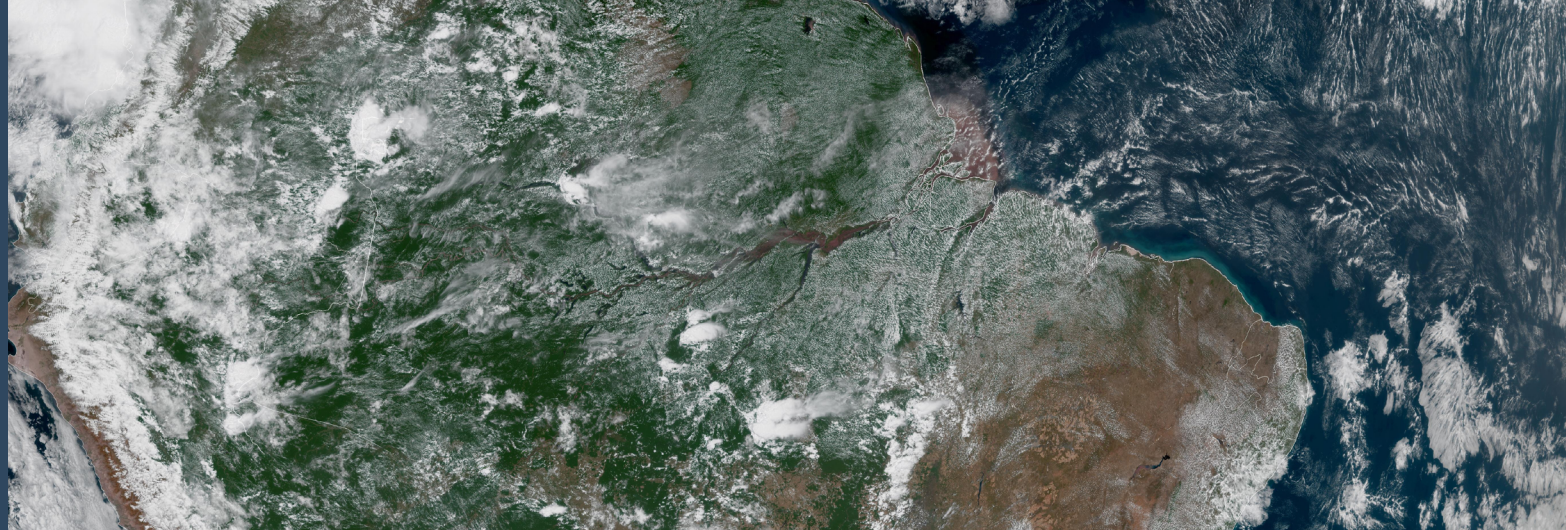


Figura 4. Média do conjunto de multimodelo (MME mean) do CMIP6 para a variação da Temperatura Superficial do Ar (°C) projetadas para 2030 e 2050 referente ao período 1970-2000 no cenário SSP-585 (Figura 4. Média do conjunto de multimodelo (MME mean) da variação da Temperatura Superficial do Ar (°C) projetadas para 2030 e 2050 período 1970-2000 no cenário SSP-585 na Amazônia. Fonte: Autor.



Recomendações

INTENSIFICAR A COOPERAÇÃO CIENTÍFICA E INSTITUCIONAL

Fortalecer redes integradas de monitoramento climático na Amazônia, com foco na Circulação Meridional do Atlântico (AMOC), elemento crítico da estabilidade climática global e modulador das chuvas na Amazônia.

INDICADORES CLIMÁTICOS NOS PLANOS NACIONAIS DE ADAPTAÇÃO (NAPS)

Integrar variáveis oceânicas e atmosféricas como aquecimento do Atlântico tropical aos NAPs, antecipando riscos hidrometeorológicos.

DESENVOLVER E IMPLEMENTAR MECANISMOS DE ADAPTAÇÃO E MITIGAÇÃO

Baseados em dados científicos atualizados, que considerem as dinâmicas ecológicas da floresta, a vulnerabilidade climática dos territórios e as necessidades socioeconômicas das populações amazônicas.

RECOMENDA-SE ASSEGURAR A PROTEÇÃO DOS POVOS INDÍGENAS EM ISOLAMENTO E CONTATO INICIAL (PIACI)

Fortalecer os instrumentos de salvaguarda do patrimônio cultural imaterial e valorizar ecossistemas amazônicos, terrestres e aquáticos, como fundamentais para a biodiversidade, segurança hídrica e resiliência climática.

FORTELECIMENTO DA CORRESPONSABILIDADE INTERNACIONAL NA PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA

Reconhecer a vulnerabilidade da Amazônia: apesar de ser um importante sumidouro de carbono, a Amazônia sofre de forma desproporcional os impactos das mudanças climáticas devido à elevada sensibilidade da região tropical e à assimetria estrutural das emissões globais, concentradas no Hemisfério Norte.

GARANTIR COOPERAÇÃO INTERNACIONAL JUSTA PARA FORTALECER A RESILIÊNCIA REGIONAL E REDUZIR RISCOS SOCIOAMBIENTAIS

Alinhados à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e ao Acordo de Paris, esse processo deve ser sustentado por financiamento climático, transição energética justa, transferência de tecnologia e cooperação técnica internacional, especialmente por parte dos países com maior responsabilidade histórica nas emissões de gases de efeito estufa, em conformidade com o princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas.

RECOMENDA-SE VIABILIZAR O FUNDO FLORESTAS TROPICAIS PARA SEMPRE (TFFF)

Como instrumento de mitigação e adaptação, mobilizando financiamento internacional de longo prazo para a conservação da Amazônia e fortalecimento da resiliência climática, em consonância com o Acordo de Paris.

FORTELECER A COORDENAÇÃO REGIONAL

A OTCA, como organização de cooperação dos oito países amazônicos, precisa avançar na criação de um Mecanismo Financeiro e na consolidação de dados regionais sobre clima e meio ambiente, fortalecendo a cooperação amazônica para enfrentar, de forma conjunta, os desafios de mitigação e adaptação da região.

Trajetórias amazônicas e Circulação Meridional do Atlântico (AMOC)

O aquecimento global simultaneamente enfraquece a Circulação Meridional do Atlântico (AMOC) e reduz as chuvas na Amazônia, colocando ambos os sistemas em risco de transição abrupta; contudo, um colapso da AMOC pode, paradoxalmente, atenuar a perda de precipitação na região, oferecendo um possível efeito estabilizador sobre a floresta, embora com sérias implicações para o clima global^{15,16}. No entanto, o enfraquecimento da AMOC também poderia intensificar a aridez no extremo norte da Amazônia (Fig. 5), influenciando significativamente sobre o regime de chuvas e eventos extremos, podendo superar os impactos diretos do aquecimento global, tendendo a agravar a seca ao norte da região¹⁷. Esses efeitos, já complexos, podem ser ainda mais agravados pela pressão antrópica sobre os ecossistemas, incluindo o desmatamento e o aumento da

incidência de queimadas, ampliando os riscos para a resiliência socioambiental da região¹⁸.

Esse padrão de redistribuição da umidade atmosférica expõe a floresta amazônica a um risco crescente de aridificação, com implicações ecológicas, hidrológicas e socioeconômicas críticas.

Se a AMOC entrar em declínio abrupto, os impactos serão globais, com mudanças drásticas nas chuvas tropicais¹⁹. Na Amazônia, isso significaria mais desequilíbrios hídricos e risco crescente de aridificação, comprometendo a biodiversidade, os rios voadores e a segurança socioambiental da região.

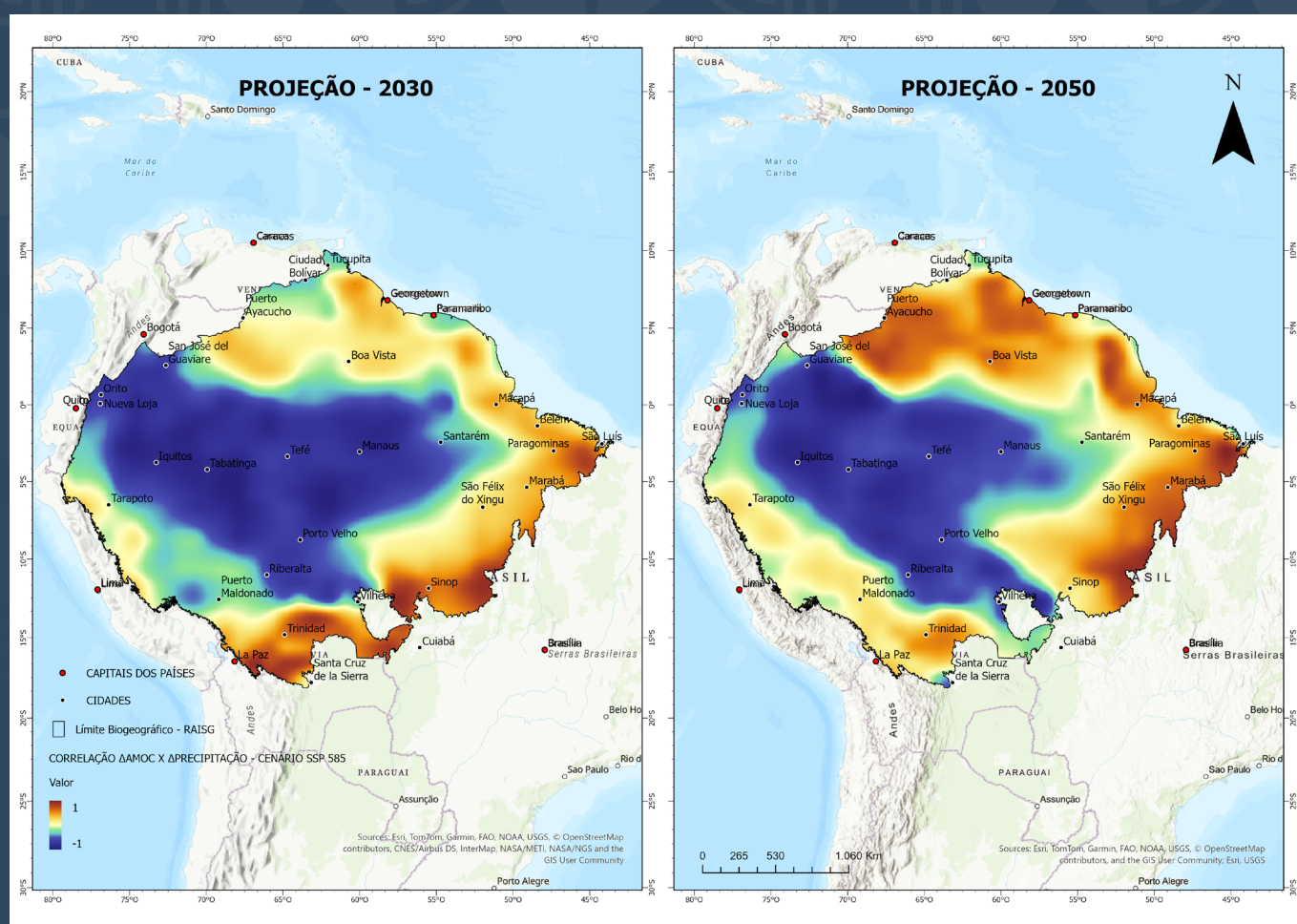


Figura 5. Mapa de correlação dos modelos climáticos do CMIP6: Entre as mudanças no transporte acumulado de AMOC (Sv) (de 20 Norte até 20 Sul) e a variação da precipitação (mm/ano) na Amazônia projetadas para 2030 e 2050, referente ao período 1970-2000 no cenário SSP-585. Fonte: Autor.

Glossário

ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma faixa próxima ao Equador onde massas de ar úmido se encontram e sobem, formando nuvens densas e chuvas intensas, desempenhando um papel central na distribuição da precipitação nas regiões tropicais, como a Amazônia.

MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS

Os Modelos climáticos globais do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)²⁰ aqui utilizados foram: GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-LR, MIROC6, NorESM2-LM e UKESM1-o-LL. Metadados: <https://ora-otca.opendata.arcgis.com>

TRAJETÓRIAS SOCIOECONÔMICAS COMPARTILHADAS (SSPS)

As trajetórias SSPs são combinadas com diferentes níveis de forçamento radiativo (medido em W/m^2 até 2100), que combinam projeções de emissões com diferentes cenários de desenvolvimento, resultando em cenários como o SSP-126, SSP-245 e o SSP-585, este último amplamente utilizado como cenário de referência para avaliação de riscos climáticos extremos, por representar um futuro de altas emissões e dependência prolongada de combustíveis fósseis.

SUGESTÃO DE CITAÇÃO

Vilela, I. (2025). Conexão Climática Global. Atmosfera, Oceano e Amazônia. Trajetórias Amazônicas nº2. [Policy Brief]. Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA). Disponível em <https://www.oraotca.org/pt>

Referências

- Levitus et al. (2012). World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*, 39(10).
- Terhaar et al. (2025). Record sea surface temperature jump in 2023–2024 unlikely but not unexpected. *Nature*.
- Cintra et al. (2021). Tree-ring oxygen isotopes record a decrease in Amazon dry season rainfall over the past 40 years. *Climate Dynamics*, 59(5–6), 1401–1414.
- Bellomo et al. (2021). Future climate change shaped by inter-model differences in Atlantic meridional overturning circulation response. *Nature Communications*, 12(1).
- Feldpausch et al. (2012). Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9(8), 3381–3403.
- Espinoza et al. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, 14(1).
- Papastefanou et al. (2022). Recent extreme drought events in the Amazon rainforest: assessment of different precipitation and evapotranspiration datasets and drought indicators. *Biogeosciences*, 19(16), 3843–3861.
- Zou et al. (2015). Do the recent severe droughts in the Amazonia have the same period of length? *Climate Dynamics*, 46(9–10), 3279–3285.
- State of the global climate 2024. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>
- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. (n.d.-b). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Costa et al. (2024). Droughts in the Amazon [Policy Brief]. New York: Science Panel for the Amazon.
- Flores et al. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature* 626, 555–564.
- McKay et al. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611).
- Smith et al. (2023). Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. *Nature*, 615(7951), 270–275.
- Nian et al. (2023). A potential collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation may stabilise eastern Amazonian rainforests. *Communications Earth & Environment*, 4(1).
- Ciemer et al. (2021). Impact of an AMOC weakening on the stability of the southern Amazon rainforest. *The European Physical Journal Special Topics*, 230(14–15), 3065–3073.
- Vilela et al. (accepted, 2025). AMOC weakening modulates global warming impacts on precipitation over Brazil. *npj Climate and Atmospheric Science*.
- Akabane et al. (2024). Weaker Atlantic overturning circulation increases the vulnerability of northern Amazon forests. *Nature Geoscience*, 17(12), 1284–1290.
- Liu et al. (2020). Climate impacts of a weakened Atlantic Meridional Overturning Circulation in a warming climate. *Science Advances*, 6(26).
- Eyring et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958.

ISABELLE VILELA

isabelle.vilela@otca.org

Oceanógrafa com mestrado e doutorado pela Universidade Federal de Pernambuco, com períodos na Humboldt State University (EUA) e Bjerknes Centre for Climate Research (Noruega). Pesquisa interações oceano-atmosfera e mudanças climáticas.

COORDENAÇÃO CIENTÍFICA ORA

Arnaldo Carneiro
arnaldo.carneiro@otca.org

COORDENAÇÃO EDITORIAL ORA

Paula Drummond

PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA E MODELAGEM ORA

Isabelle Vilela, Maycon Castro, Maria Fernanda Ribeiro, Mathias Alvarez e Rafaela Cipriano

DESIGN, DIAGRAMAÇÃO E ILUSTRAÇÕES

Patricia Sardá | Estúdio Abanico

FOTOGRAFIA DE CAPA

NOAA/ESDIS/STAR

AVISO DE RESPONSABILIDADE

Este documento constitui uma compilação técnico-informativa sobre um tema prioritário para a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA), elaborada com o propósito de subsidiar e enriquecer o debate regional. As opiniões, análises e interpretações aqui apresentadas correspondem exclusivamente a seus autores. Seu conteúdo não reflete necessariamente a posição oficial da OTCA nem de seus Países Membros. As informações apresentadas passaram por curadoria técnica que respalda sua credibilidade.

OBSERVATÓRIO REGIONAL AMAZÔNICO (ORA)

É o centro de referência da OTCA que integra dados, testa inovações e dissemina informações apoiando os países membros na cooperação e na tomada de decisões.

ORGANIZAÇÃO DO TRATADO DE COOPERAÇÃO AMAZÔNICA (OTCA)

A OTCA é uma organização intergovernamental, formada por oito países amazônicos: Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela, que assinaram o Tratado de Cooperação Amazônica, tornando-se o único bloco socioambiental da América Latina.

OTCA / ORA

SEPN 510, Bloco A, 3º andar – Asa Norte | Brasília (DF), Brasil, CEP: 70.750-52
ora@otca.org | <https://www.oraotca.org/>

©OTCA 2025 - Secretaria Permanente da Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (SP/OTCA)

