Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

RECONSTRUÇÃO DA VEGETAÇÃO DOS BIOMAS BRASILEIROS COM BAIXO DE CO_2 ATMOSFÉRICO E A EXISTÊNCIA DE FOGO NO ÚLTIMO MÁXIMO GLACIAL

Reconstruction of vegetation in brazilian biomes with low atmospheric CO_2 and the existence of fire in the Last Glacial Maximum

Reconstrucción de la vegetación en biomas brasileños con bajo CO_2 atmosférico y la existencia de fuego en el Último Máximo Glacial

Clara Quadros do Amaral
Instituto de Floresta - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (IF-UFRRJ)
Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil
quadros.ca@gmail.com

Henderson Silva Wanderley
Departamento de Ciências Ambientais - Instituto de Floresta
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil
henderson@ufrrj.br

Resumo: O Último Máximo Glacial representa o fim da última glaciação e é marcado pela redução na temperatura média de todo o globo, em comparação as médias atuais. Nesse período, as flutuações climáticas causaram mudanças na vegetação. No entanto, uma análise que leve em consideração a influência da baixa concentração de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico e fogo sobre a vegetação são escassos. Frente a isso, o presente estudo pretende reconstruir a vegetação dos biomas brasileiros para cenários distintos, com diferentes nível de CO_2 atmosférico e a existência fogo no Último Máximo Glacial (UMG) e no período Pré-Industrial (PI). Para tanto, foi utilizada como metodologia a simulação de reconstruções da cobertura da vegetação, o modelo Land-surface

Process and exchanges (LPX), com dados do modelo Miroc de circulação geral da atmosfera. Foram avaliados quatro cenário de reconstrução da vegetação dos biomas brasileiros, para o período pré-industrial e para o UMG, com mudança da variação da concentração atmosférica de CO_2 e a existência de incêndios florestais. Os resultados mostraram fragmentação da vegetação, sobretudo para a redução das florestas tropicais e temperadas, com árvores de grandes portes, substituídas por florestas menos adensadas, com dossel aberto ou regiões com vegetação rasteira ou até mesmo desérticas. A hipótese de aparecimento de Refúgios Amazônicos foi verificada. A mudança na concentração do CO_2 e a existência de fogo podem acelerar o processo de fragmentação da vegetação dos biomas brasileiros, acelerando o processo de savanização.

Palavras-chave: Floresta Amazônica. Refúgios Amazônicos. savanização.

Abstract: The Last Glacial Maximum (LGM) represents the end of the last glaciation and is marked by a reduction in global average temperatures compared to present-day levels. However, analyses accounting for the combined influence of low atmospheric carbon dioxide (CO_2) concentrations and fire on vegetation remain scarce. In view of this, the present study aims to reconstruct the vegetation of Brazilian biomes under different scenarios, incorporating varying atmospheric CO_2 levels and the presence or absence of fire during the Last Glacial Maximum and the Pre-Industrial (PI) period. To achieve this, vegetation cover reconstructions were simulated using the Land-surface Process and eXchanges (LPX) model, driven by atmospheric data from the MIROC general circulation model. Four vegetation reconstruction scenarios were evaluated for both the PI period and the LGM, incorporating variations in atmospheric CO_2 concentration and fire regimes. The results indicated vegetation fragmentation—specifically a reduction in tropical and temperate forests dominated by large trees, which were replaced by less dense forests with open canopies, low vegetation, or desertified areas. Furthermore, the hypothesis of Amazonian glacial refuges was supported. Changes in CO_2 concentration and fire regimes can accelerate vegetation fragmentation in Brazilian biomes, thereby accelerating savannization processes.

Keywords: Amazon Rainforest. Amazonian Refuges. savannization.

Resumen: El Último Máximo Glacial (LGM, por sus siglas en inglés) representa el final de la última glaciación y se caracteriza por una disminución de la temperatura media global en comparación con los niveles actuales. Sin embargo, los análisis que consideran la influencia combinada de la baja concentración de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico y el fuego en la vegetación siguen siendo escasos. En vista de esto, el presente estudio tiene como objetivo reconstruir la vegetación de los biomas brasileños en diferentes escenarios, incorporando niveles variables de CO_2 atmosférico y la presencia de incendios durante el Último Máximo Glacial y el período Preindustrial (PI). Para lograr esto, la simulación de las reconstrucciones de la cubierta vegetal se realizó mediante el modelo LPX (Land-surface Process and eXchanges), alimentado con datos del modelo de circulación general de la atmósfera MIROC. Se evaluaron cuatro escenarios de reconstrucción de la vegetación en los biomas brasileños, tanto para el período preindustrial como para el LGM, considerando variaciones en la concentración de CO_2 atmosférico y en el régimen de incendios. Los resultados mostraron una fragmentación de la vegetación, específicamente una reducción de los bosques tropicales y templados con árboles de gran porte, los cuales fueron reemplazados por bosques menos densos con doseles abiertos, vegetación baja o áreas desertificadas. Asimismo, se confirmó la hipótesis de los refugios glaciares amazónicos. Los cambios en la concentración de CO_2 y la presencia de incendios pueden acelerar la fragmentación de la vegetación en los biomas brasileños, favoreciendo el proceso de sabanización.

Palabras clave: Selva amazónica. refugios amazónicos. sabanización

Submetido em: 04/09/2025
Aceito para publicação em: 05/09/2026
Publicado em: 10/11/2026



1. INTRODUÇÃO

O Último Máximo Glacial (UMG), cerca de 21-18 mil anos atrás, representa o fim da última glaciação e é marcado pela redução de 2 a 5 °C na temperatura média de todo o globo, em comparação as médias atuais. Nesse período na América do Sul, foi observado avanço de geleiras no sul próximo a Cordilheira dos Andes, redução da temperatura, diminuição da umidade em áreas florestadas (Tierney *et al*., 2020). A mudança do clima desde o UMG tem atraído interesse de pesquisa devido a sucessão de três grandes estágios climáticos durante este período: glacial, deglacial e interglacial, bem como a sobreposição de uma série de eventos climáticos extremos e abruptos (Sun *et al*., 2023).

O intervalo de tempo que abrange o UMG até a era pré-industrial representa a mais recente reorganização em larga escala do sistema climático, sobre o qual a Terra rapidamente fez a transição de um estado frio e glaciado para um clima quente. A evolução das temperaturas da superfície global durante este período crítico oferece uma excelente oportunidade para entender melhor os mecanismos de mudança climática em larga escala, incluindo interações do sistema terrestre e respostas a vários complementos, como por exemplo, concentração dos gases de efeito estufa (GEE), cobertura de gelo, mudanças orbitais, dentre outros (Osman *et al*., 2021).

Essa compreensão ocorre devido o UMG e o Holoceno médio representarem estados climáticos radicalmente diferentes dos dias atuais e um do outro. Essas simulações oferecem uma oportunidade para quantificar os feedbacks associados, a baixos níveis de dióxido de carbono (CO_2), mudanças de vegetação, ocorrência de incêndios florestais (Braconnot *et al*., 2012). Essa demanda significativa por reconstruções dos grandes padrões espaciais de estados paleoclimáticos, serve para entender as mudanças do clima passado e como elas podem se relacionar com as mudanças climáticas em curso. Estimar esses estados está longe de ser trivial, já que os dados de proxy climático são limitados em tempo e espaço, e contêm incertezas substanciais e vieses potencialmente sistemáticos, principescamente para o Brasil (Guimaraes *et al*., 2021).

Uma vantagem de usar períodos paleoclimático para avaliar modelos é que, dependendo do período de escolha, a escala de mudança pode ser muito grande, como verificada para o UMG (Annan *et al*., 2022). De acordo com Mahowald et al. (2006) o UMG é

considerado como um período adequado para testar modelos climáticos devido ao fato de que o componente do resfriamento verificado nesse período foi forçado por mudanças dos GEE. Assim, esse período representa clima quase em equilíbrio, o que facilita comparações, com simulações de modelo, a magnitude geral da mudança do clima.

O registro paleoclimático fornece um teste em que os modelos climáticos podem ser avaliados sob condições de mudança substancial de CO_2. No entanto, esses dados são tipicamente subutilizados no processo de desenvolvimento e avaliação do modelo (Lunt *et al*., 2024). Simulações de paleovegetação da bacia amazônica sugere que além do clima glacial a concentração de CO_2 atmosférico foi essencial para alterar o tipo e a estrutura da vegetação, bem como para explorar os potenciais mecanismos fisiológicos subjacentes a essas respostas ao nível do ecossistema (Blaus *et al*., 2024).

A concentração de dióxido de carbono na atmosfera no UMG, aumentou de 180 ppm para 280 ppm, no período Pré-Industrial (PI). Em 1860 a concentração atingiu 290 ppm, tendo como base as medições no estudo do gelo. Já em 1900 estava em 295 ppm, chegando a 300 ppm em 1920 e atingindo 310 ppm em 1950 (Alves, 2021). Atualmente essa concentração já alcançou níveis superior a 420 ppm. Se a concentração de CO_2 continuar a aumentar contribuirá para intensificar as mudanças no clima, a qual tem impacto na vegetação terrestre devido ao ar mais quente e seco, déficits de umidade do solo, o que poderia levar a mortalidade generalizada de árvores e ao declínio das florestas, o que contribuem para acelerar o acúmulo de CO_2 na atmosfera (Cernusak *et al*., 2019).

Embora os resultados mostrem mudanças significativas para o UMG, os estudos de mudança da vegetação no Brasil são predominantemente realizados em registros de solo e lacustres, que documentam mudanças na temperatura, precipitação e vegetação por meio do uso de pólen e outras proxies orgânicas e inorgânicas (Morton *et al*., 2013). Alguns desses registros, no entanto, estão sujeitos a processos de intemperismo e raramente exibem horizontes profundos e adequados para datação radiométrica para estimar mudanças nas taxas de sedimentação. Assim, essas limitações complicam seu uso para a reconstrução de modelos de idade cronologicamente robustos, necessários para entender as rápidas mudanças ambientais em longos períodos.

É relevante ressaltar que há divergências quanto a distribuição da vegetação no UMG, pois as diferentes zonas climáticas causam mudanças na vegetação, variando entre uma

expansão da vegetação sazonal e a estabilidade nas áreas centrais de cada bioma, de acordo com a alternância entre climas seco e quente, frio e úmido. Observa-se assim que as vegetações resultam da interação entre os fatores ambientais, tais como a geologia, clima e solo, sofreram alterações em virtude de mudanças ambientais (Arruda *et al*., 2017). Porém, a interação entre fatores climáticos e não climáticos, como CO_2 atmosférico e fogo, também tem potencial de influenciar nas mudanças da vegetação (Sato *et al*., 2021). Dessa forma, se torna importante que estudos de reconstrução da vegetação, levem em conta a influência desses fatores.

O fogo ocorre independentemente da presença humana e sempre desempenhou um papel na estrutura da vegetação. No entanto, o aumento do desmatamento e a ocorrência de fogo nos biomas brasileiros, que era considerada rara, tornou-se mais frequente. A combustão da matéria orgânica libera CO_2, o principal gás de efeito estufa. A queima de biomassa afeta a floresta em nível local e o ciclo do carbono, influenciando as mudanças no clima (Aragão *et al*., 2016).

A perturbação ecológica induzidas pelo fogo é um componente fundamental dos ecossistemas de pastagens e demonstra que o fogo foi um mecanismo de feedback essencial, que levou à expansão das pastagens durante o final do UMG. Além disso, estudos das pastagens do sudoeste africano da Namíbia demonstram que a intensificação da atividade de fogo causada pela aridificação desencadeou o estabelecimento inicial e o domínio posterior de plantas C4 (Maezumi *et al*., 2023).

Para a cobertura vegetal da América do Sul se tem duas grandes teorias. A primeira que se refere a Teoria dos Refúgios, em que haveria a retração das áreas florestais da Amazônia nos períodos mais frios e secos e áreas de savana com vegetação em maior expansão. A segunda se refere a teoria do Arco Pleistocênico com formação de um arco contínuo de vegetações sazonais, com períodos glaciais, abrangendo a Caatinga, o Cerrado e o Chaco (Utida *et al*., 2020). Deste modo, o presente estudo pretende reconstruir a vegetação dos biomas brasileiros para cenários distintos, com diferentes níveis de CO_2 atmosférico e a existência fogo no Último Máximo Glacial (UMG) e no período Pré-Industrial (PI).

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

Para a realização desta pesquisa, propôs-se analisar os impactos de 2 parâmetros importante para a vegetação dos biomas do território brasileiro. O primeiro com a variação do nível de CO_2. A variação do CO_2 teve como referência o nível de CO_2 do Período Pré-Industrial (PI (1850-1943) de 280 ppm), e o nível do Último Máximo Glacial (UMG (21 mil) de 180 ppm).

Compreende-se que a concentração de CO_2 é fator limitante para a fotossíntese, sendo assim um limitante para o desenvolvimento vegetal. O segundo parâmetro avaliado foi a ocorrência dos incêndios florestais, pois o processo de queima pode impactar em uma área vegetada, sendo ainda responsável pela emissão de CO_2 na atmosfera, além de influenciar a temperatura, que também é um fator limitante para a fotossíntese. Logo, entende-se que a concentração de CO_2 e as queimadas são fatores importantes para o desenvolvimento da vegetação.

A reconstrução da vegetação foi realizada para os biomas existentes no território brasileiro. O Brasil possui 6 biomas, com vegetações e características próprias, os quais foram utilizados para a análise de mudança da vegetação. Os biomas analisados foram: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal (Figura 1).

Figura 1 - Biomas brasileiros.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O bioma Amazônia ocupa 49,5% da extensão territorial brasileira. Possui vegetação de floresta ombrófila densa e floresta ombrófila aberta. O clima é equatorial úmido, com pluviosidade elevada e presença de planícies constantemente alagadas, com precipitação média anual de aproximadamente 2.300 mm/ano (Brito *et al*., 2022). O Cerrado corresponde a 23,3% da área territorial nacional, com vegetação expressiva savânica, e clima tropical úmido, com subtipo clima de savana, com invernos secos e chuvas máximas de verão. Uma pequena parcela possui clima temperado quente, com inverno seco (Albuquerque e Silva, 2008). A Mata Atlântica é o terceiro maior bioma do Brasil ocupando 13% do território nacional. Sua vegetação é composta por floresta estacional semidecidual, sendo caracterizada por mata, ao longo da costa litorânea do Brasil. A Mata Atlântica possui grande biodiversidade em virtude de sua amplitude térmica e diferentes pluviosidades em decorrência das diferenças climáticas, com clima tropical e subtropical úmido (Vale *et al*., 2021).

A Caatinga representa 9,9% da área do Brasil e possui clima predominantemente semiárido, com totais pluviométricos e umidade relativa do ar baixos. A vegetação característica é composta por plantas decíduas e espinhosas, espécies suculentas e com porte de arbóreo a arbustivo, com a presença de cactáceas e bromeliáceas (Camacam e De Omena, 2022). O pantanal abrange uma área de 1,8% no território do Brasil, sendo esse o menor bioma brasileiro, tendo como vegetação predominante a do tipo savânica na região Centro-Oeste do Brasil. Esse bioma apresenta verão com elevados totais pluviométricos e inverno seco (Pereira *et al*., 2012). O pampa é representado por formações campestres e florestais cobrindo uma área de 2,1% do território brasileiro. Esse bioma apresenta por característica a presença de campos de gramíneas, com cerca de 450 espécies de capins, gramas ou relvas, florestas nas margens dos rios, arbustos, leguminosas, bromélias e até mesmo cactos. O clima é predominante subtropical úmido, com períodos chuvosos e estações bem definidas (Trentin *et al*., 2021).

2.2. Modelo e Cenário Climático

As características climáticas do UMG são resultantes do Projeto de Intercomparação de Modelagem Paleomático Fase II (PMIP2). Para a análise da mudança da vegetação, nesta

pesquisa, foi utilizado os dados obtidos com o modelo MIROC 3.2. As condições de contorno do modelo como: gelo, linhas costeiras, concentrações de gases de efeito estufa, excentricidade, obliquidade e precessão angular são descritas por Braconnot *et al*. (2007).

O modelo MIROC inclui uma representação de transporte de radiação e aerossol chamado Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS) (Takemura *et al*., 2005). Este modelo calcula distribuições tridimensionais de cinco tipos de aerossóis: sulfato, carbono negro, carbono orgânico, sal marinho e poeira do solo. O modelo representa explicitamente o efeito microfísico direto de aerossóis solúveis (carbono orgânico, sulfato e sal marinho) em nuvens de estratos de água, juntamente com os efeitos diretos e semidiretos sendo foi usado para simular os efeitos meteorológicos nos períodos estudados.

2.3. Modelo de incêndio da vegetação

As informações da reconstrução climática para o UMG do modelo MIROC, foi utilizado para simular a reconstruções da vegetação, por meio do modelo Land-surface Process and exchanges (LPX) (Wüster *et al*., 2005), que contabiliza apenas incêndios iniciados por raios. O modelo LPX é capaz de simular as principais características do regime de incêndio, mesmo em áreas onde muitos incêndios são iniciados pelo homem. Essa capacidade aparentemente paradoxal é consistente com a evidência de que incêndios provocados pelo homem em regiões naturalmente propensas ao fogo tendem a antecipar, em vez de aumentar, o regime de fogo natural (Prentice *et al.*, 2011).

A parametrização das características dos biomas usados nesta pesquisa foi análoga aos apresentados por Prentice *et al*. (2011), onde foi implementado três saídas pós-processamento: graus-dia de crescimento, altura da vegetação e cobertura projetiva da folhagem. O limite de graus-dia de crescimento médio anual foi definido para 350 °C dias. Este limite foi usado para separar os biomas frios e quentes. A altura da vegetação e cobertura da folhagem foram usados para distinguir entre os biomas de solo descoberto, pastagem, savana e floresta.

2.4. Cenários Utilizados

Esta pesquisa utilizou 4 cenários distintos para simular a reconstruções da vegetação, os quais têm por objetivo avaliar os efeitos de incêndios florestais e mudanças de dióxido de carbono (CO_2) na vegetação dos biomas Brasileiros. A pesquisa analisa a resposta da vegetação da Floresta Tropical Úmida (FTU), Floresta Tropical Seca (FTS) e Floresta Temperada Quente (FTQ) sobre os efeitos da baixa concentração de CO_2 e a existência de incêndios florestais na distribuição dos biomas brasileiros, sobre possível aparecimento de vegetação de características de Savana Tropical (ST), Grama Seca (GS) e de Desertos Quentes (DQ). Foram utilizados 2 períodos distintos para essa análise. O primeiro referente ao período Pré-Industrial (PI) e o segundo o Último Máximo Glacial (UMG) devido a semelhança da floresta nesses intervalos (Cowling *et al*., 2001; Claussen *et al*., 2013; Hopcroft e Valdes, 2015). Para esses períodos foram adorados uma mescla de 4 cenários, os quais contam com variação da concentração de CO_2 de 180 ppm e 280 ppm, e a existência de incêndios conforme descrição abaixo dos cenários:

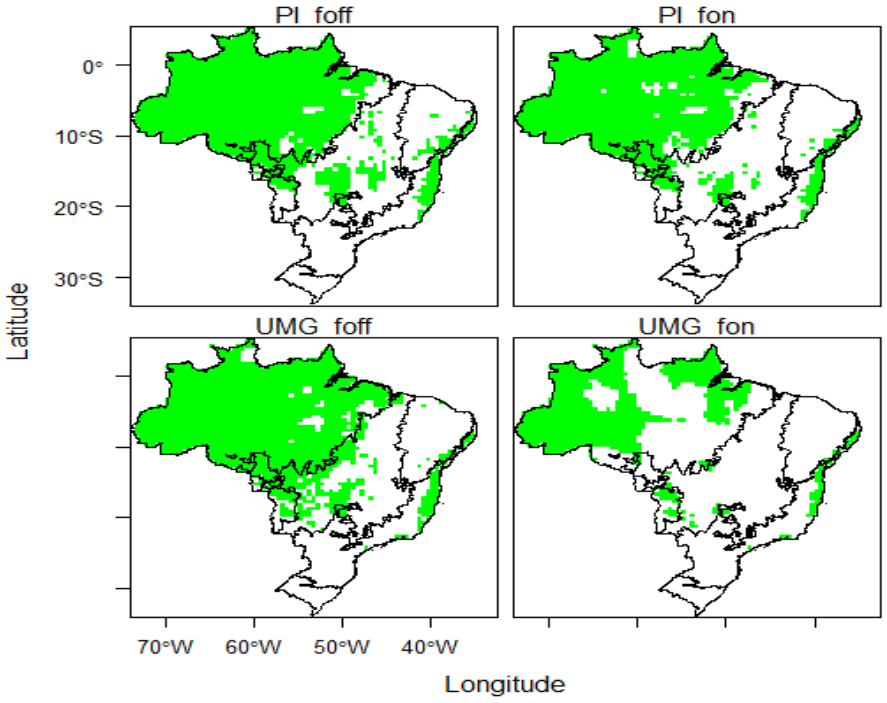
- PI foff: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO_2 pré-industrial e sem fogo (Cenário controle);
- PI fon: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO_2 pré-industrial e fogo ativado;
- UMG foff: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO_2 do UMG (baixo CO_2) e fogo desligado;
- UMG fon: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO_2 do UMG (baixo CO_2) e fogo ativado.

Os resultados obtidos serão mostrados em recorte da cobertura florestal da reconstrução da vegetação dos biomas brasileiros, onde são mostrados os mapas representando as coberturas de vegetação em cada um dos 4 cenários. A confecção dos mapas foi feita com o intuito de estimar os efeitos da variação de CO_2 e da presença do fogo nos cenários, com a ênfase em analisar os efeitos desses fatores na distribuição da vegetação nos biomas de Floresta Tropical Úmida (FTU), Floresta Tropical Seca (FTS), Floresta Temperada Quente (FTQ), Savana Tropical (ST), Grama Seca (GS) e de Desertos Quentes (DQ).

3. DESENVOLVIMENTO

A Floresta Tropical Úmida (FTU) existente no Brasil no PI abrangia quase que a totalidade do bioma amazônico, partes dos biomas Cerrado, Pantanal, Mata Atlântica e Caatinga (Figura 2). A ocorrência de incêndios florestais no período PI não apresentou mudanças relevantes na vegetação. As maiores alterações foram observadas no Cerrado e parte da região litorânea, quando comparado ao período controle. A mudança na vegetação foi observada para o período do UMG. A redução do CO_2 proporcionou fragmentação da vegetação na região litorânea do Nordeste e Sudeste do Brasil, assim como na Caatinga e no Norte do Cerrado. Os níveis mais baixos de CO_2 no UMG reduziram a eficiência do uso da água da planta e a fotossíntese, o que contribui para a redução da vegetação (Sharon, 1999).

Figura 2 - Reconstrução da vegetação na Floresta tropical úmida (FTU).



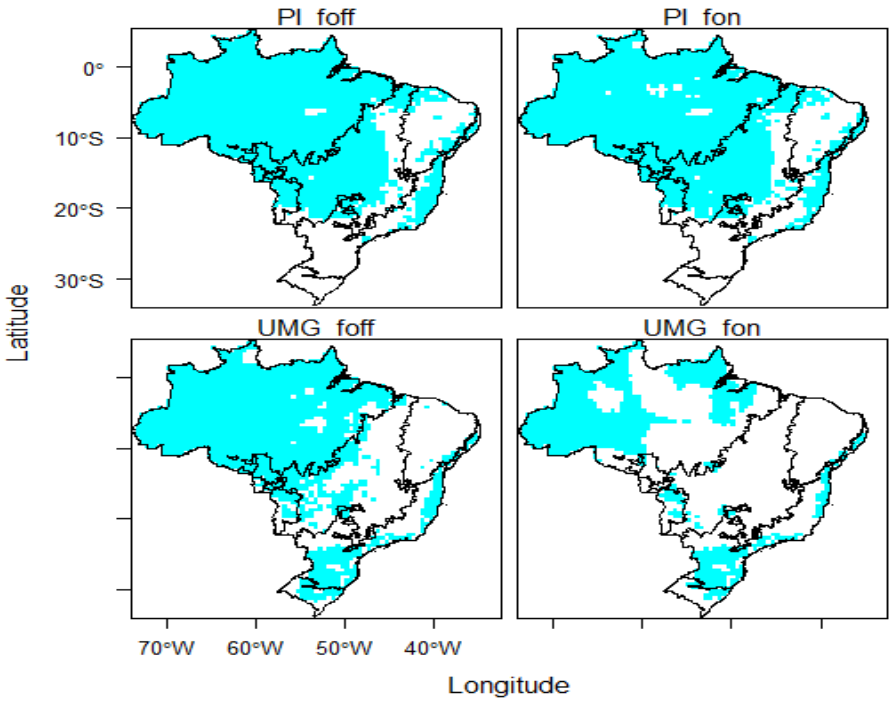
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O impacto maior na vegetação é observado mediante a existência de incêndios florestais, o qual corrobora para a extinguir a vegetação total da FTU da Caatinga, e quase a totalidade do Cerrado e Mata Atlântica. A existência do fogo indica perdas arbórea até para o bioma amazônico, o qual é caracterizado por condições favoráveis para o desenvolvimento

das florestas tropicais. A redução do CO_2 tende a reduzir a densidade da cobertura arbórea e o fogo resulta em baixa cobertura arbórea (Sato *et al.,* 2021). A menor concentração de CO_2 atmosférico pode ter promovido o aquecimento atmosférico e o aumento da aridez, através da alteração das taxas de troca de água e calor com a atmosfera, o qual impacta diretamente a vegetação (Sharon, 1999).

A FTS apresentou resultado análogo a FTU (Figura 3). Deste modo, surge indícios de que a relação de baixo CO_2 e fogo podem proporcionar o surgimento de corredor central na Amazônia em função da fragmentação da floresta. Nossos resultados sugerem que a floresta tropical amazônica pode ter se dividido em pelo menos 2 fragmentos principais. O maior fragmento teria sido no núcleo úmido do Oeste da Amazônia e o segundo a Nordeste na Amazônia. Resultados semelhantes foram encontrados por Kelley *et al*. (2024), onde foi verificada fragmentação da floresta no centro/sul da Amazônia.

Figura 3 - Reconstrução da vegetação na floresta tropical seca (FTS).



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

De acordo com Rivas e Navarro-Cerrillo (2024) as FTS são as mais ameaçadas de todas as florestas existentes no mundo, com apenas 25% de sua cobertura ainda intacta, onde as

atividades humanas como desmatamento, expansão da agricultura e urbanização levaram essas florestas a se tornarem cada vez mais fragmentadas, impactando tanto os aspectos ecológicos quanto socioeconômicos. A fragmentação das florestas ou o surgimento de corredores no UMG são chamados por Haffer (1969) de Refúgios Amazônicos.

A Amazônia é um componente crítico do sistema climático da Terra, cujo destino está incorporado no de uma emergência planetária maior. A Amazônia é o ecossistema de escala subcontinental, rico em espécies e abriga mais de 10% de todas as espécies de plantas e vertebrados, concentradas em apenas 0,5% da área da superfície da Terra. A floresta amazônica também é um componente crítico do sistema climático da Terra, contribuindo com cerca de 16% de toda a produtividade fotossintética terrestre e regulando fortemente os ciclos globais de carbono e água (Albert *et al*., 2023).

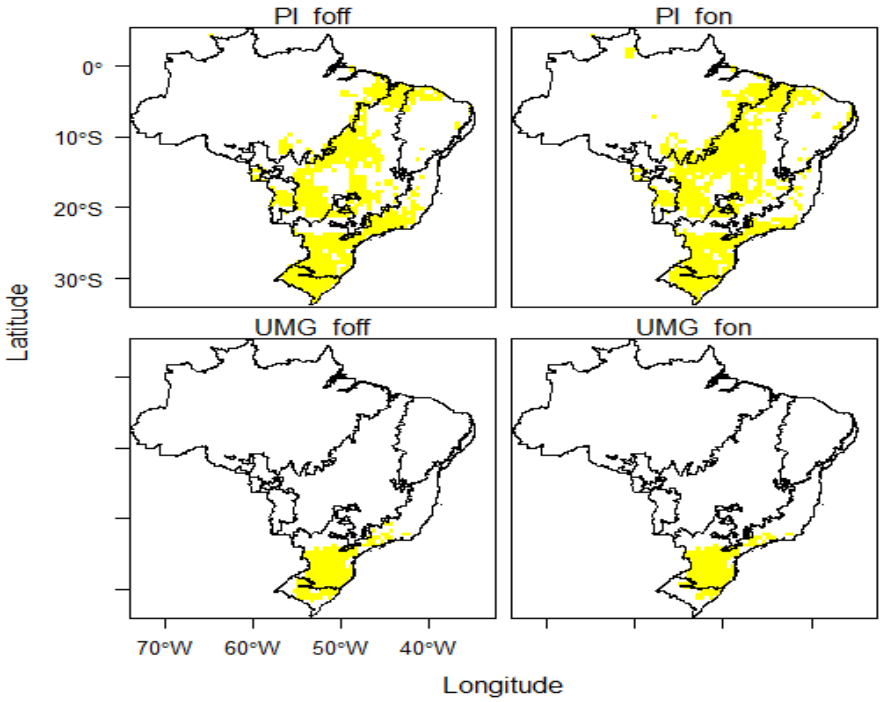
A Amazônia está sobre risco de transição rápida da florestada para uma paisagem não florestal, devido ao processo de savanização, que pode ser agravado pelo desmatamento e mudanças do clima (Bottino *et al*., 2024). Essas mudanças estão acontecendo rapidamente para que espécies, povos e ecossistemas se adaptem. Os ecossistemas amazônicos estão sendo rapidamente degradados pelas atividades industriais humanas. Um total acumulado de 17% da floresta original já foi desmatado e 14% substituído pelo uso agrícola de terras. Depois de milhões de anos servindo como uma imensa piscina global de carbono, a floresta amazônica está prevista para se tornar uma fonte líquida de carbono para a atmosfera (Albert *et al*., 2023). Impacto que se estende também a Mata Atlântica, com o Cerrado avançando em sua direção (Passos *et al*., 2025).

A reconstrução da floresta realizada por Kelley *et al*. (2024) sugerem que vegetação mais alta e densa de floresta localizadas e regiões de fronteiras, com vegetação de savana tropical, em áreas de bioclima semelhantes, se conectam aos fragmentos florestais diferentes em toda a Amazônia. Essa junção pode ter atuado para criar um corredor para espécies de florestas generalistas e savanas, criando conectividade que permite a expansão do alcance durante os períodos glaciais.

A fragmentação da floresta não foi só verificada para a Amazônia. A FTQ, que se estende pelas zonas tropicais e subtropicais do Brasil, cobrindo os biomas Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa, no período controle, foi impactada pelo fogo e baixo CO_2, sendo confinada a região serrana do Sul do Brasil (Figura 4). Associada a existência de fogo e baixo

CO_2 as características climáticas do UMG fizeram com que a vegetação subtropical reduzisse mediante o avanço de espécies campestres sobre as florestas subtropicais, provocando mudanças nas paisagens (Behling *et al*., 2004). Essa hipótese explica a redução drástica na vegetação da FTQ no UMG.

Figura 4 - Reconstrução da vegetação na floresta temperada quente (FTQ).



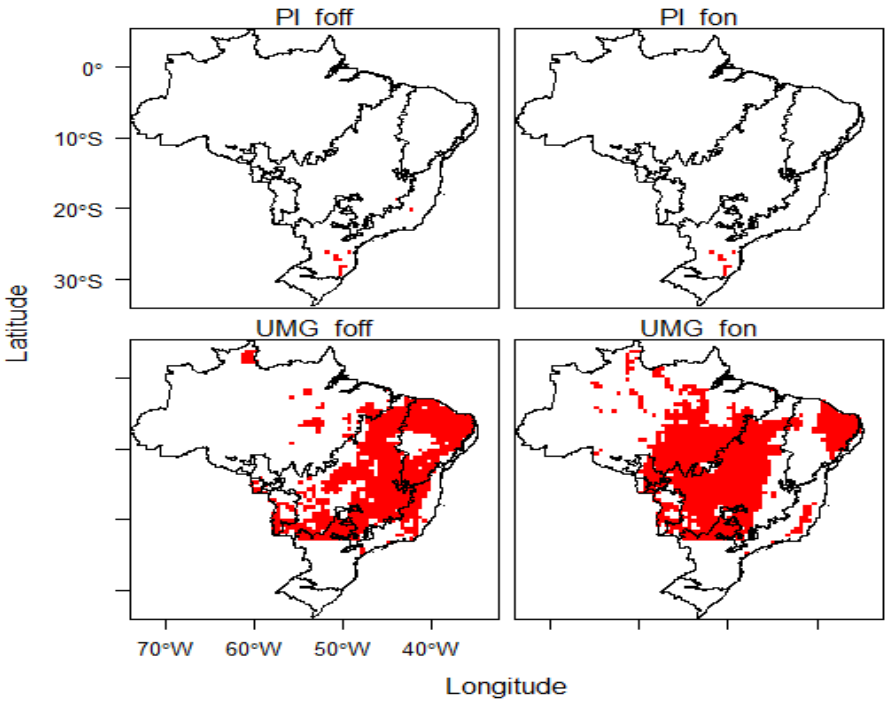
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Segundo Behling *et al*. (2004) durante o UMG podia ser observado pequenas populações de espécies de floresta com araucária e latifoliada em áreas de altitudes ou nas úmidas encostas litorâneas. De acordo com Behling *et al*. (1997) a região Sul do Brasil era dominada pela vegetação campestre, havendo a condição climática fria e seca. No início do Holoceno, condições climáticas mais quentes e úmidas favoreceram a passagem da vegetação campestre para floresta.

A fragmentação da floresta tropical e temperada facilitou que os biomas constituídos por vegetação, com características de Cerrado, Caatinga e Grama avançassem e tomassem o lugar das florestas. O que foi observado nos biomas brasileiros durante o UMG (Figuras 5). A distribuição e abundância das florestas foram fortemente afetadas por distúrbios como o fogo. Em ecossistemas mistos de árvores/grama, os incêndios recorrentes nas gramíneas

podem suprimir fortemente as mudas de árvores e, portanto, controlar o domínio das árvores fazendo com que a Savana avance por praticamente todo Cerrado, Caatinga e Sul da Amazônia (Bond *et al*., 2003), como observado nesta pesquisa.

Figura 5 - Reconstrução da vegetação savana tropical (ST).



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Anteriormente se tinha a ideia de que apenas as características do clima no UMG seriam responsáveis pela mudança da vegetação. Ab'Saber (1977) mostra que o avanço ocorrido do Cerrado sobre a Amazônia, e da Caatinga sobre o Cerrado e parte da floresta atlântica situada no Sudeste, no UMG se deu ao clima mais frio e seco em todo Brasil, com redução da precipitação cerca de 35% a 55%. O déficit hídrico na zona tropical fez com que a precipitação anual fosse 200 a 1.000 mm/ano menor do que hoje na região equatorial (Wu *et al*., 2007). Nos extratrópicos, as mudanças na vegetação são em grande parte determinadas pelas temperaturas do inverno, enquanto nos trópicos são amplamente determinadas por mudanças na água disponível para as plantas (Behling, 2002). No entanto, essas pesquisas não levaram em consideração da existência de incêndios florestais.

De acordo com Harrison e Goñj (2010) os poucos registros existentes no Hemisfério Sul mostram resposta de vegetação ao fogo e à variabilidade climática em escala milenar. Os

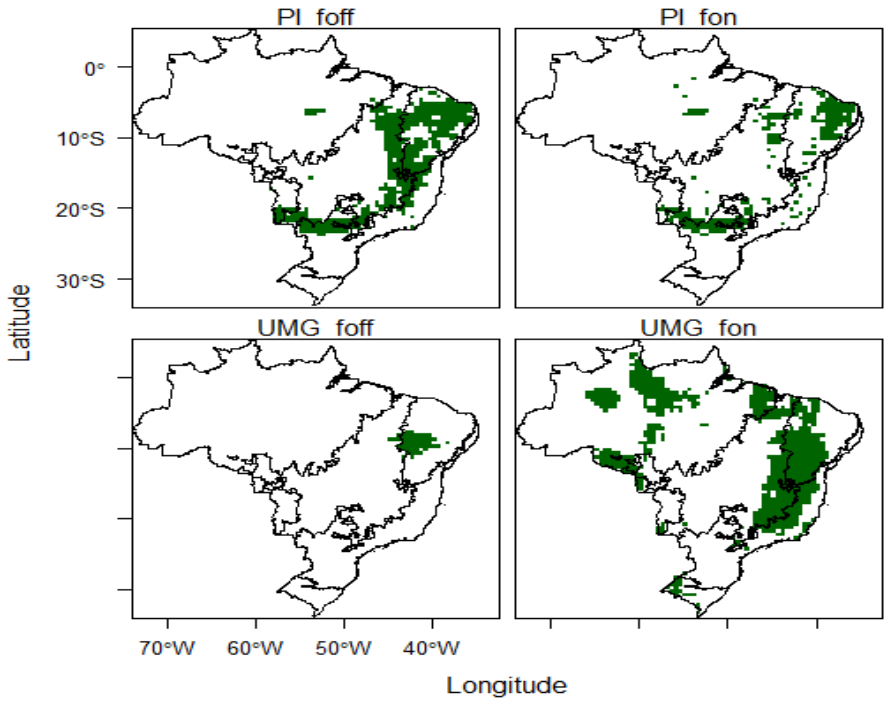
regimes de incêndios mostram uma resposta imediata às mudanças climáticas, mas durante os intervalos de resfriamento há uma lenta recuperação da queima de biomassa após a redução inicial. Mas, segundo Williams (2003) a fragmentação das árvores no UMG provavelmente foi devido a uma combinação de baixas temperaturas, precipitação e concentrações atmosféricas de CO_2.

A baixa concentração de CO_2 atmosférico induz um efeito ecofisiológico de diminuição na cobertura da vegetação, em função da redução na produção primária líquida. E como indicado por Claussen *et al.* (2013) o efeito direto da redução do CO_2 nos processos ecofisiológico de árvores tropicais perenes é aproximadamente 50% menor entre o UMG e PI. O índice de área foliar também apresentou variação no UMG, induzindo mudança na densidade do dossel geograficamente (Cowling *et al*., 2001).

Arruda *et al.* (2018) mostraram a hipótese de formação de condição ambiental favorável para a formação de uma floresta que seria similar à floresta Atlântica costeira no UMG. Haffer (1967), Prance (1978), Ab'Saber (2002) e Quijada-Mascareñas *et al.* (2007) destacam áreas de floresta tropical no Brasil e possíveis manchas de Savanas em unidades de vegetação aberta, incluindo a Amazônia, ratificando a evidência da hipótese dos refúgios. Essa existência corrobora para a extinções de alguns táxons da megafauna em decorrência da preservação de áreas de refúgios e desfragmentação da floresta.

As mudanças no UMG proporcionadas pelo baixo CO_2 e pelo fogo fez com que não só a vegetação com características de Savana, mais também a grama avançasse pelos biomas brasileiros, ocupando as regiões até dos refúgios amazônicos (Figura 6). Lapola (2007) destaca que a região Nordeste do Brasil demostrou indícios de aridez elevado, a existência de semidesertos em grande parte do Brasil, com savanas, caatingas e grama no lugar da Mata Atlântica, mostrando consistência com os resultados obtidos nessa pesquisa. A mudança do clima e a ocorrência incêndio mostrou que no Nordeste do Brasil existia paisagem florestada por toda parte, e que com mudanças na composição da atmosfera, temperatura e precipitação a vegetação foi substituída por espécies características de climas mais frios (Blaus *et al*., 2024).

Figura 6 - Reconstrução da vegetação para a grama seca (GS).



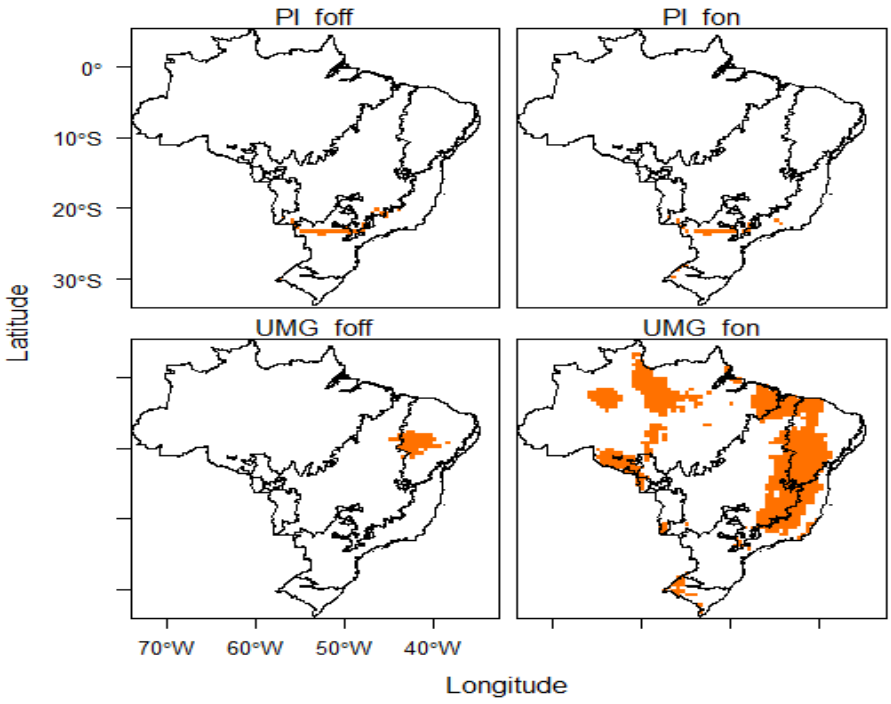
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Behling (2002) destaca que a vegetação subtropical da América do Sul compõe-se de um mosaico de florestas e campos, com o avanço de espécies campestres sobre as florestas subtropicais provocando mudanças nas paisagens, como demonstrado nessa pesquisa. À medida que as árvores morrem e suas copas se abrem, os incêndios de superfície penetram cada vez mais no interior das florestas intactas, trazendo mais grama e alterando as condições locais de incêndio, o que realimenta o processo. Os ciclos de incêndio destroem as mudas existentes nas bordas da floresta, paralelamente à invasão de gramíneas, impediriam o estabelecimento da vegetação florestal original, mantendo o domínio das espécies inflamáveis. Esse equilíbrio competitivo que atualmente ocorre na borda da floresta, logo na junção da grama e mata úmida, merece maior atenção da comunidade científica.

Mas, os resultados obtidos podem ser mais alarmantes, uma vez que vegetação com características de desertos quentes também avançou sobre os biomas brasileiros (Figura 7). Os resultados obtidos mostram que os biomas brasileiros podem ser tornar regiões desérticas, principalmente devido a redução das chuvas e aumento dos incêndios florestais. Bush (2005)

mostrou que a redução da precipitação poderia ter impulsionado mudança da vegetação nos biomas Caatinga, Cerrado e floresta estacional.

Figura 7 - Reconstrução da vegetação para os desertos quentes (DQ)



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Ao logo dos séculos foi observado mudança da vegetação nos biomas existentes no Brasil. Parte dessa mudança é resultante de alterações nos padrões climáticos, outras das mudanças no CO_2 e ocorrência de fogo. No entanto, esperasse que as mudanças do clima aceleram os processos de degradação das florestas. Secas mais longas, severas e frequentes são esperadas na Amazônia (Espinoza *et al*., 2023) e para outras regiões do Brasil (De Souza Santos *at el*., 2024). Redução da disponibilidade de água no solo e aumento da temperatura também (Arévalo *et al*., 2023), alteração do sumidouro de carbono (Nath *et al*., 2024), uso eficiência do uso da água (perez-Quezada *et al.,* 2024), desertificação (De Moraes *et al*., 2023) e incêndios florestais (Delgado *et al*., 2022).

A mudança climática global pode afetar a ocorrência de incêndios, como mudanças nos recursos e condições de combustível, condições climáticas e estrutura da vegetação (Liu *et al*., 2014). As estimativas da mudança global preveem o aumento das taxas de incêndio em

regiões como a Bacia Amazônica, onde as condições climáticas e atmosféricas em grandes partes da região geralmente impedem essa ameaça (Ray *et al*., 2005; Krawchuk *et al*., 2009; Liu *et al*., 2014). A redução das chuvas e o aumento da temperatura do ar são os pontos cruciais para o aumento da possibilidade de incêndios florestais. Essa mudança pode fazer com que a floresta apresente nível maior de degradação e favoreça o avanço de biomas de vegetação aberta e/ou rasteira como observado no UMG.

A redução da precipitação pode alterar a estrutura de vegetação das florestas, levando a mudanças em sua resistência ao fogo, o que redistribuirá globalmente as áreas dependentes do fogo (Krawchuk *et al*., 2009). As condições atmosféricas são um fator importante na promoção ou prevenção de incêndios, porque os incêndios florestais e o clima são processos intimamente relacionados (Liu *et al*., 2014). Ecossistemas tropicais, onde crescem gramíneas e plantas herbáceas, incluindo savanas, são alguns dos ambientes mais vulnerareis a queimadas do mundo (Chuvieco *et al.,* 2008).

Os incêndios florestais na Amazônia ocasionarão mudanças no microclima e esgotamento da vegetação, aumentando assim o risco e a suscetibilidade ao fogo. O fogo afeta a estrutura e a composição da floresta amazônica por milhares de anos. Os solos contendo carvão indicam que os incêndios ocorreram pelo menos nos últimos 6.000 anos, período durante o qual o clima em algumas áreas tornou-se mais seco e a vegetação endureceu significativamente e era mais esparsa do que hoje (Uhl e Kaufman, 1990).

Dependendo das condições ambientais e da composição do combustível, principalmente da continuidade da serapilheira e dos galhos baixos, os incêndios de superfície podem atingir as camadas mais altas da floresta (Cochrane e Barber, 2009). A inflamabilidade das florestas tropicais é modulada por padrões de chuva, altura da floresta e abertura do dossel (Ray *et al*., 2005). Em florestas úmidas, que são locais de extremo estresse quando há redução da precipitação, principalmente as regiões com dossel mais aberto, o microclima sofre mudanças fundamentais, aumentando a temperatura do ar e do solo e reduzindo a umidade relativa do ar e da serapilheira (Fearnside, 2009).

A combinação desses fatores aumenta a probabilidade de novos incêndios, agravando sua severidade, a recorrência e as distâncias de penetração do fogo em florestas intactas tanto tropicais úmidas e secas, onde essas condições são agravadas pelas secas extremas na Amazônia (Espinoza *et al*., 2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo se propõe a reconstruir a vegetação dos biomas brasileiros no último máximo glacial referente a redução da concentração atmosférica de CO_2 e a ocorrência de incêndios florestais, concluindo que:

A vegetação das florestas tropicais e temperadas apresentam redução em sua cobertura arbórea, para quase todos os biomas brasileiros. O impacto individualizado do baixo CO_2 e do fogo tem potencial para causar grandes mudanças na vegetação. No entanto, quando a ocorrência é simultânea a degradação é acentuada.

A vegetação tropical e temperada apresenta um padrão de recuo maior para a região central do Brasil. Também foi observado a migração da floresta para as regiões extremas Norte e Sul do Brasil.

A fragmentação da vegetação da floresta propiciou o surgimento de corredores com vegetação atípica de florestas tropicais e temperadas ratificando a hipótese de Refúgios Amazônicos.

A degradação da floresta tropical e temperada fará com que sua vegetação seja substituída por vegetação de dossel aberto e menor altura. Em alguns casos, a floresta poderá ser substituída por vegetação típica do cerrado, grama ou vegetação típica de desertos.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul, por ocasião dos períodos glaciais quaternários. **Paleoclimas**, São Paulo, n. 3, p. 1-19, 1977.

AB'SABER, A. N. **Os domínios da natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ALBERT, J. S. *et al.* Human impacts outpace natural processes in the Amazon. **Science**, v. 379, n. 6630, eabo5003, 2023. DOI: https://doi.org/10.1126/science.abo5003.

ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da (ed.). **Agricultura tropical**: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/124265.

ALVES, J. E. D. A concentração de CO2 é a mais alta em milhões de anos. **EcoDebate**, 17 mar. 2021. Disponível em: https://www.ecodebate.com.br/2021/03/17/a-concentracao-de-co2-e-a-mais-alta-em-milhoes-de-anos/.

ANNAN, J. D.; HARGREAVES, J. C.; MAURITSEN, T. A new global surface temperature reconstruction for the Last Glacial Maximum. **Climate of the Past**, v. 18, n. 8, p. 1883-1896, 2022. DOI: https://doi.org/10.5194/cp-18-1883-2022. Disponível em: https://doi.org/10.5194/cp-18-1883-2022.

ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* Fires in Amazonia. In: NAGY, L.; FORSBERG, B. R.; ARTAXO, P. (ed.). **Interactions between biosphere, atmosphere and human land use in the Amazon Basin**. Berlin; Heidelberg: Springer, 2016. p. 301-329. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_13.

ARÉVALO, S. M. M. *et al.* Past and Future Responses of Soil Water to Climate Change in Tropical and Subtropical Rainforest Systems in South America. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, 755, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos14040755.

ARRUDA, D. M. *et al.* Combining climatic and soil properties better predicts covers of Brazilian biomes. **The Science of Nature**, v. 104, n. 3-4, 32, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s00114-017-1456-6.

ARRUDA, D. M. *et al.* Vegetation cover of Brazil in the last 21 ka: New insights into the Amazonian refugia and Pleistocenic arc hypotheses. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 1, p. 47-56, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/geb.12646.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire history from the tropical mountain region of Morro de Itapeva, SE Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 129, n. 3-4, p. 407-422, 1997. DOI: https://doi.org/10.1016/s0031-0182(97)88177-1.

BEHLING, H. South and southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 177, n. 1-2, p. 19-27, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/s0031-0182(01)00349-2.

BEHLING, H. *et al.* Late Quaternary Araucaria forest, grassland (Campos), fire and climate dynamics, studied by high-resolution pollen, charcoal and multivariate analysis of the Cambará do Sul core in southern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 203, n. 3-4, p. 277-297, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/s0031-0182(03)00687-4.

BLAUS, A. *et al.* Climate, vegetation, and fire, during the last deglaciation in northwestern Amazonia. **Quaternary Science Reviews**, v. 332, 108662, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2024.108662.

BOND, W. J.; MIDGLEY, G. F.; WOODWARD, F. I. The importance of low atmospheric CO2 and fire in promoting the spread of grasslands and savannas. **Global Change Biology**, v. 9, n. 7, p. 973-982, 2003. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00577.

BOTTINO, M. J. *et al.* Amazon savannization and climate change are projected to increase dry season length and temperature extremes over Brazil. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 5131, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-55176-5.

BRACONNOT, P. *et al.* Evaluation of climate models using palaeoclimatic data. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 6, p. 417-424, 2012. DOI: https://doi.org/10.1038/nclimate1456.

BRITO, A. P. de *et al.* Análise do índice de Anomalia de Chuva e Tendência de Precipitação para Estações Pluviométricas na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 1, p. 19-30, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-778637014521.

CAMACAM, B. L. M.; MESSIAS, C. M. B. de O. Potencial alimentar de frutas e plantas da caatinga: revisão integrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, e39911931997, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31997.

CERNUSAK, L. A. *et al.* Robust Response of Terrestrial Plants to Rising CO2. **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 7, p. 578-586, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.04.003.

CHUVIECO, E.; GIGLIO, L.; JUSTICE, C. Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. **Global Change Biology**, v. 14, n. 7, p. 1488-1502, 2008. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585.

CLAUSSEN, M. *et al.* Impact of CO2 and climate on Last Glacial maximum vegetation - a factor separation. **Biogeosciences**, v. 10, n. 6, p. 3593-3604, 2013. DOI: https://doi.org/10.5194/bg-10-3593-2013.

COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. **Global Change Biology**, v. 15, n. 3, p. 601-612, 2009. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01786.

COWLING, S. A. Simulated effects of low atmospheric CO2 on structure and composition of North American vegetation at the Last Glacial Maximum. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 2, p. 81-93, 1999. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.00136.

COWLING, S. A.; MASLIN, M. A.; SYKES, M. T. Paleovegetation Simulations of Lowland Amazonia and Implications for Neotropical Allopatry and Speciation. **Quaternary Research**, v. 55, n. 2, p. 140-149, 2001. DOI: https://doi.org/10.1006/qres.2000.2197.

DELGADO, R. C. *et al.* Assessment of a New Fire Risk Index for the Atlantic Forest, Brazil. **Forests**, v. 13, n. 11, 1844, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/f13111844.

ESPINOZA, J. C. *et al.* The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 8107, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5.

FEARNSIDE, P. M. Brazil's evolving proposal to control deforestation: Amazon still at risk. **Environmental Conservation**, v. 36, n. 3, p. 177-179, 2009. DOI: https://doi.org/10.1017/s0376892909990294.

GUIMARÃES, J. T. F. *et al.* Lake sedimentary processes and vegetation changes over the last 45k cal a bp in the uplands of south-eastern Amazonia. **Journal of Quaternary Science**, v. 36, n. 2, p. 255-272, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/jqs.3268.

HARRISON, S. P.; SANCHEZ GOÑI, M. F. Global patterns of vegetation response to millennial-scale variability and rapid climate change during the last glacial period. **Quaternary Science Reviews**, v. 29, n. 21-22, p. 2957-2980, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.07.016.

HOPCROFT, P. O.; VALDES, P. J. Last glacial maximum constraints on the Earth System model HadGEM2-ES. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 5-6, p. 1657-1672, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-014-2421-0.

KELLEY, D. I. *et al.* Niche-dependent forest and savanna fragmentation in Tropical South America during the Last Glacial Maximum. **NPJ Biodiversity**, v. 3, n. 1, 23, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s44185-024-00056-4.

KRAWCHUK, M. A. *et al.* Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. **PLoS ONE**, v. 4, n. 4, e5102, 2009. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005102.

LAPOLA, D. M. **Conseqüências das mudanças climáticas globais nos biomas da América do Sul**: um modelo de vegetação potencial incluindo ciclo de carbono. 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.25.18.15.

LIU, Y.; GOODRICK, S.; HEILMAN, W. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire-climate interactions. **Forest Ecology and Management**, v. 317, p. 80-96, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.020.

LUNT, D. J. *et al.* Paleoclimate data provide constraints on climate models' large-scale response to past CO2 changes. **Communications Earth & Environment**, v. 5, n. 1, 419, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s43247-024-01531-3.

MAEZUMI, S. Y. *et al.* Fire-human-climate interactions in the Bolivian Amazon rainforest ecotone from the Last Glacial Maximum to late Holocene. **Frontiers in Environmental Archaeology**, v. 2, 1208985, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fearc.2023.1208985.

MAHOWALD, N. M. *et al.* Climate response and radiative forcing from mineral aerosols during the last glacial maximum, pre-industrial, current and doubled-carbon dioxide climates. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 20, L20705, 2006. DOI: https://doi.org/10.1029/2006gl026126.

MORAES, J. B. de *et al.* Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural Hazards**, v. 116, p. 1463-1483, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11069-022-05724.

MORTON, D. C. *et al.* Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, 20120163, 2013. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0163.

NATH, D.; NATH, R.; CHEN, W. Faster dieback of rainforests altering tropical carbon sinks under climate change. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 7, n. 1, 235, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41612-024-00793-0.

OSMAN, M. B. *et al.* Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. **Nature**, v. 599, n. 7884, p. 239-244, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4.

PASSOS, L. de O. *et al.* Predicting climate change impacts on the distribution of vereda wetland plant species in the Brazilian Cerrado. **Annals of Botany**, mcaf120, 2025. DOI: https://doi.org/10.1093/aob/mcaf120.

PEREIRA, G.; CHÁVEZ, E. S.; SILVA, M. E. S. O estudo das unidades de paisagem do bioma Pantanal. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 7, n. 1, p. 89-103, 2012. DOI: https://doi.org/10.4136/ambi-agua.826.

PEREZ-QUEZADA, J. F. *et al.* Comparison of carbon and water fluxes and the drivers of ecosystem water use efficiency in a temperate rainforest and a peatland in southern South America. **Biogeosciences**, v. 21, n. 5, p. 1371-1389, 2024. DOI: https://doi.org/10.5194/bg-21-1371-2024.

PRANCE, G. T. The origin and evolution of the Amazon flora. **Interciencia**, v. 3, n. 4, p. 207-222, 1978.

PRENTICE, I. C. *et al.* Modeling fire and the terrestrial carbon balance. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 25, n. 3, GB3005, 2011. DOI: https://doi.org/10.1029/2010gb003906.

QUIJADA-MASCAREÑAS, A. J. *et al.* Phylogeographic patterns of trans-Amazonian vicariants and Amazonian biogeography: the Neotropical rattlesnake (Crotalus durissus complex) as an example. **Journal of Biogeography**, v. 34, n. 8, p. 1296-1312, 2007. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01707.x.

RAY, D.; NEPSTAD, D.; MOUTINHO, P. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. **Ecological Applications**, v. 15, n. 5, p. 1664-1678, 2005. DOI: https://doi.org/10.1890/05-0404.

RIVAS, C. A.; NAVARRO-CERRILLO, R. M. Forest fragmentation and connectivity in South American dry forests. **Biodiversity and Conservation**, v. 33, n. 11, p. 3015-3037, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10531-024-02894-x.

SANTOS, J. A. de S. *et al.* The longest multiannual drought in Northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 143, 104976, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104976.

SATO, H. *et al.* Dry corridors opened by fire and low CO2 in Amazonian rainforest during the Last Glacial Maximum. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 8, p. 578-585, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41561-021-00777-2.

SUN, W. *et al.* Hydroclimate changes since the last glacial maximum from sedimentary biomarkers in a crater lake in the Great Khingan Mountains, Northeast China. **Quaternary Science Reviews**, v. 312, 108175, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108175.

TAKEMURA, T. *et al.* Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D2, D02202, 2005. DOI: https://doi.org/10.1029/2004jd005029.

TIERNEY, J. E. *et al.* Glacial cooling and climate sensitivity revisited. **Nature**, v. 584, n. 7822, p. 569-573, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-020-2617-x.

TRENTIN, C. B. *et al.* Características da vegetação dos biomas Pampa e Cerrado monitorados por NDVI. **Revista Geoaraguaia**, v. 11, p. 69-84, 2021. Número especial: Geotecnologias.

UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, Fire Susceptibility, and Potential Tree Responses to Fire in the Eastern Amazon. **Ecology**, v. 71, n. 2, p. 437-449, 1990. DOI: https://doi.org/10.2307/1940299.

UTIDA, G. *et al.* Climate changes in Northeastern Brazil from deglacial to Meghalayan periods and related environmental impacts. **Quaternary Science Reviews**, v. 250, 106655, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106655.

VALE, M. M. *et al.* Climate Change and Biodiversity in the Atlantic Forest: Best Climatic Models, Predicted Changes and Impacts, and Adaptation Options. In: MARQUES, M. C. M.; GRELLE, C. E. V. (ed.). **The Atlantic Forest**. Cham: Springer, 2021. p. 253-267. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7_12.

WILLIAMS, J. W. Variations in tree cover in North America since the last glacial maximum. **Global and Planetary Change**, v. 35, n. 1-2, p. 1-23, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/s0921-8181(02)00088-7.

WU, H. *et al.* Climatic changes in Eurasia and Africa at the last glacial maximum and mid-Holocene: reconstruction from pollen data using inverse vegetation modelling. **Climate Dynamics**, v. 29, n. 2-3, p. 211-229, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-007-0231-3.

WÜSTER, W. *et al.* Tracing an invasion: landbridges, refugia, and the phylogeography of the Neotropical rattlesnake (Serpentes: Viperidae: Crotalus durissus). **Molecular Ecology**, v. 14, n. 4, p. 1095-1108, 2005. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2005.02471.x.