

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Impactos da variabilidade climática e do uso da terra no regime de fogo e
serviços ecossistêmicos de Unidades de Conservação federais**

Elaine Gonçalves da Costa
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

ELAINE GONÇALVES DA COSTA

Impactos da variabilidade climática e do uso da terra no regime de fogo e serviços ecossistêmicos de Unidades de Conservação federais

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Flavio Barbosa Justino

Coorientador: Jackson Martins Rodrigues

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C837i
2026
Costa, Elaine Gonçalves da, 1981-
Impactos da variabilidade climática e do uso da terra no
regime de fogo e serviços ecossistêmicos de Unidades de
Conservação federais / Elaine Gonçalves da Costa. – Viçosa,
MG, 2026.

1 tese eletrônica (146 f.): il. (algumas color.).

Texto em português e inglês.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.494>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Incêndios florestais - Brasil - Efeito das mudanças
climáticas. 2. Incêndios florestais - Amazônia. 3. Cerrados.
4. Caatinga. I. Justino, Flávio Barbosa, 1971-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada.
III. Título.

CDD 22. ed. 634.96180981

ELAINE GONÇALVES DA COSTA

Impactos da variabilidade climática e do uso da terra no regime de fogo e serviços ecossistêmicos de Unidades de Conservação federais

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de maio de 2026.

Assentimento:

Elaine Gonçalves da Costa
Autora

Flavio Barbosa Justino
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 25/08/2026 às 20:11:38 e pelo orientador em 25/08/2026 às 20:16:08. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **6IFW.RSMZ.RMTD** e clique no botão 'Validar documento'.

*A Deus e aos meus guias espirituais,
que não me deixam fraquejar na fé.
Aos meus pais e à minha filha, Cecília.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Ulisses, principal incentivador dos meus sonhos. Sua presença constante e a certeza de que "tudo daria certo" foram o alicerce que impediu minha desistência.

À minha mãe, cujas preces e preocupação com meu bem-estar foram meu refúgio e equilíbrio nos dias mais exaustivos.

À minha filha, Cecília, agradeço por sua sensatez precoce, por acreditar em meus ideais e por me fazer repensar a vida com seu carinho e palavras de incentivo.

Ao meu irmão, por ser meu interlocutor mais honesto e incentivador incansável.

A André, cuja presença se fez notar no momento mais decisivo desta trajetória. Um alento inesperado na reta final, trazendo leveza aos meus dias.

Ao meu orientador, professor Flávio Justino, pela presença constante desde o mestrado. Expresso minha profunda gratidão por suas orientações precisas, pela atenção desprendida, pela compreensão nos momentos difíceis e por me incentivar a transpor horizontes acadêmicos.

Ao professor Jackson Rodrigues, coorientador, pelo suporte técnico, pelas sugestões pertinentes e pela generosidade com que auxiliou na condução deste caminho.

Ao professor Fernando Lemos, cujo incentivo durante o mestrado foi o catalisador para o meu ingresso no doutorado na UFV.

Aos professores Ênio e Douglas, gratidão pelas valiosas contribuições e pela disponibilidade em participar da banca; e ao professor Paulo Hamakwa, pelas enriquecedoras interlocuções técnicas, acadêmicas, psicológicas e filosóficas.

À Graça, pelo apoio "maternal" e pela dedicação durante todo o período de estudos; gratidão pela atenção, presteza e carinho. Do início ao final se fazendo presente. Você é excepcional!

À madrinha, Dalva, pelas orações e pelo incentivo.

Aos amigos que o doutorado me presenteou: Bruna, Santiago, Josielton, Mirele, Estevão, Angélica, Pablo, Pedro Tiago, Juliete, Youlia, Humberto e Pedro Arthur.

A Lormido, pela fraternidade transcultural; a Akyla, Bruna Rosiele e, em especial, ao Darlan, pela amizade e auxílio mútuo.

Às amigas Letícia e Thais, pela convivência na república “Meteoro da Paixão”. À Thais, pela paciência em me introduzir ao universo QGIS, RStudio, CDO e Python, e por me auxiliar com dados e escuta atenta. À Letícia, pela ajuda desde as primeiras disciplinas, pelos abraços, sorrisos e apoio incondicional. Vocês duas se tornaram família.

À Josiéle e aos irmãos messiânicos, pelo acolhimento.

A Dom Mauro (*in memoriam*) e ao Padre Dênis, pelo exemplo de luta pela justiça socioambiental, cujos diálogos foram fundamentais para minha formação humanística.

À equipe da Sigas Engenharia, em especial Bárbara, Fabiana, Isabella, Janaina e Lauren, não tenho palavras para expressar minha gratidão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro indispensável à viabilização desta pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

O sal da terra

*Anda, quero te dizer nenhum segredo
Falo desse chão da nossa casa
Vem que tá na hora de arrumar
Tempo, quero viver mais duzentos anos
Quero não ferir meu semelhante
Nem por isso quero me ferir
Vamos precisar de todo mundo
Pra banir do mundo a opressão
Para construir a vida nova
Vamos precisar de muito amor
A felicidade mora ao lado
E quem não é tolo pode ver
A paz na terra, amor
O pé na terra
A paz na terra, amor
O sal da terra
És o mais bonito dos planetas
"Tão te maltratando por dinheiro"
Tu que és a nave, nossa irmã
Canta, leva tua vida em harmonia
E nos alimenta com seus frutos
Tu que és do homem, a maçã
"Vamos precisar de todo mundo
Um mais um é sempre mais que dois"
Para melhor juntar as nossas forças
É só repartir melhor o pão
Recrutar o paraíso agora
Para merecer quem vem depois
Deixa nascer o amor
Deixa fluir o amor
Deixa crescer o amor
Deixa viver o amor
O sal da terra.
(Beto Guedes, Ronaldo Bastos)*

*"Senhor, fazei de mim instrumento de Vossa Paz".
(São Francisco de Assis)*

RESUMO

COSTA, Elaine Gonçalves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2026. **Impactos da variabilidade climática e do uso da terra no regime de fogo e serviços ecossistêmicos de Unidades de Conservação federais.** Orientador: Flavio Barbosa Justino. Coorientador: Jackson Martins Rodrigues.

O estudo analisa os impactos da variabilidade climática, dos extremos climáticos e das mudanças no uso e cobertura da terra sobre o regime de fogo e na disponibilidade de serviços ecossistêmicos em Unidades de Conservação Federais brasileiras. A pesquisa concentra-se no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Parque Nacional Grande Sertão Veredas e na Floresta Nacional do Jamanxim, áreas inseridas em diferentes contextos biogeográficos, climáticos, territoriais e de manejo. A pesquisa integra dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas, variáveis climáticas das bases Xavier e ERA5-Land, índices de extremos climáticos, focos de calor do FIRMS/NASA e áreas queimadas do MapBiomas Fogo, abrangendo séries históricas entre 1980/1985 e 2023, conforme a disponibilidade de cada base. A análise avalia tendências climáticas, padrões de conversão da vegetação natural, frequência e sazonalidade do fogo, recorrência de áreas queimadas e perda potencial de serviços ecossistêmicos associada à conversão da cobertura natural. Os resultados demonstram que as Unidades de Conservação mantêm papel estratégico na conservação da biodiversidade, na regulação climática e na proteção dos recursos hídricos, mas sua efetividade diminui quando pressões climáticas e antrópicas atuam de forma combinada. Nos Parques Nacionais da Chapada Diamantina e Grande Sertão Veredas, a expansão agropecuária nos buffers intensifica a fragmentação da paisagem, reduz a capacidade de amortecimento climático e amplia a vulnerabilidade a secas, extremos de precipitação, térmicos e incêndios florestais. Na Floresta Nacional do Jamanxim, a interação entre aquecimento, irregularidade hidroclimática, desmatamento, efeito de borda, expansão agropecuária e influência da BR-163 configura o cenário mais crítico de degradação florestal e perda potencial de serviços ecossistêmicos. A análise comparativa indica que o fogo não responde isoladamente às fases do ENOS, mas resulta da interação entre sazonalidade climática, disponibilidade de combustível, tipo de vegetação, fontes antrópicas de ignição e estrutura da paisagem. O estudo conclui que a conservação das Unidades de Conservação Federais exige estratégias integradas de monitoramento climático, controle da conversão da vegetação nativa, proteção dos buffers, manejo integrado do fogo, restauração ecológica e valoração

dos serviços ecossistêmicos como instrumentos de adaptação às mudanças climáticas e fortalecimento da resiliência ambiental.

Palavras-chave: Amazônia; caatinga; cerrado; extremos climáticos; incêndios florestais; queimadas; mudanças climáticas

ABSTRACT

COSTA, Elaine Gonçalves da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2026. **Impacts of climate variability and land use on fire regimes and ecosystem services in federal Conservation Units.** Adviser: Flavio Barbosa Justino. Co-adviser: Jackson Martins Rodrigues.

This study analyzes the impacts of climate variability, climate extremes, and land use and land cover changes on fire regimes and ecosystem services in Brazilian federal Protected Areas. The research focuses on the Chapada Diamantina National Park, the Grande Sertão Veredas National Park, and the Jamanxim National Forest areas situated within diverse biogeographical, climatic, territorial, and management contexts. The study integrates land use and land cover data from MapBiomas, climate variables from the Xavier and ERA5-Land datasets, extreme climate indices, active fires from FIRMS/NASA, and burned areas from MapBiomas Fogo, spanning historical series from 1980/1985 to 2023, depending on data availability for each source. The analysis assesses climate trends, patterns of natural vegetation conversion, fire frequency and seasonality, burned area recurrence, and the potential loss of ecosystem services associated with the conversion of natural cover. The results demonstrate that Protected Areas maintain a strategic role in biodiversity conservation, climate regulation, and water resource protection; however, their effectiveness decreases when climatic and anthropogenic pressures act concurrently. In the Chapada Diamantina and Grande Sertão Veredas National Parks, agricultural expansion within buffers intensifies landscape fragmentation, reduces climate buffering capacity, and increases vulnerability to droughts, thermal extremes, and wildfires. In the Jamanxim National Forest, the interaction among warming, hydroclimatic irregularity, deforestation, edge effects, agricultural expansion, and the influence of the BR-163 highway creates the most critical scenario of forest degradation and potential loss of ecosystem services. The comparative analysis indicates that fire does not respond solely to ENSO phases, but results from the interaction between climate seasonality, fuel availability, vegetation type, anthropogenic ignition sources, and landscape structure. The study concludes that the conservation of federal Protected Areas requires integrated strategies for climate monitoring, native vegetation conversion control, buffer zone protection, integrated fire management, ecological restoration, and the valuation of ecosystem services as tools for climate change adaptation and environmental resilience enhancement.

Keywords: Amazon; caatinga; cerrado; climate extremes; wildfires ; burned areas;
climate change

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
Referências.....	18
ARTIGO 1 – Land-use change amplifies climate extremes and ecosystem vulnerability in Brazilian conservation units	20
1 Introduction	20
2 Materials and methods.....	22
2.1 Study region.....	22
2.2 Data used.....	23
2.2.1 Land use and occupation data.....	23
2.2.2 Climatic data.....	24
2.2.3 Climate trends.....	24
2.2.4 Extreme climatic indices for precipitation and temperature.....	25
3 Results and discussion	27
3.1 Land use and land cover	27
3.1.1 Chapada da Diamantina National Park (CDNP).....	27
3.1.2 Grande Sertão Veredas National Park (GSVNP)	29
3.2 Climate trends and changes in LULC of conservation units	31
3.2.1 Grande Sertão Veredas National Park	32
3.2.1.1 Significant trends in climate extremes indices for precipitation and temperature in the Chapada Diamantina National Park	34
3.2.1.2 Significant trends in precipitation and temperature climate extremes indices for the Grande Sertão Veredas National Park.....	39
3.3 Effects of land use and land cover on temperature and precipitation patterns and potential impacts on extreme events in the study areas	43
4 Final considerations.....	48
5 Acknowledgements.....	49
6 References.....	49
7 Supplementary material.....	55
ARTIGO 2 - Sinergia entre extremos climáticos e mudanças no uso da terra impulsiona a degradação resiliente na Floresta Nacional do Jamanxim, Amazônia	67
1 Introdução	68
2 Materiais e métodos.....	70
2.1 Caracterização da área de estudo	70
2.2 Dados de uso e cobertura da terra	71
2.3 Dados de precipitação e temperatura	72

2.3.1 Tendências da variabilidade climática e índices de extremos climáticos	73
2.4 Análise da frequência de queima e identificação de <i>hotspots</i> de degradação.....	74
3 Resultados e discussão	75
3.1 Uso e ocupação da terra Floresta Nacional do Jamanxim	75
3.2 Climatologia da Floresta Nacional do Jamanxim	77
3.3 Índices extremos climáticos.....	81
3.4 Área queimada na Floresta Nacional do Jamanxim.....	85
3.5 Impactos na biodiversidade da Floresta Nacional do Jamanxim em decorrência das mudanças climáticas, dinâmica do fogo e interações biosfera-atmosfera e uso da terra.....	88
4 Considerações finais	90
5 ReferênciasLL.....	91
ARTIGO 3 – Dinâmica do fogo, conversão da cobertura natural e perda potencial de serviços ecossistêmicos em Unidades de Conservação federais brasileiras.....	96
1 Introdução	97
2 Metodologia.....	102
2.1 Área de estudo	103
2.3 Valoração da perda potencial de serviços ecossistêmicos por conversão da cobertura natural	106
2.4 Dados de uso e cobertura da terra, temperatura, precipitação e extremos climáticos .	107
3 Resultados e discussão	108
3.1 Análise espaço-temporal da dinâmica do fogo no Parque Nacional da Chapada Diamantina.....	108
3.2 Análise espaço-temporal da dinâmica do fogo no Parque Nacional Grande Sertão Veredas	112
3.3 Análise espaço-temporal da dinâmica do fogo na Floresta Nacional do Jamanxim....	117
3.4 Frequência do fogo, uso da terra e sazonalidade da queima nos Parques Nacionais da Chapada Diamantina, Grande Sertão Veredas e na Floresta Nacional do Jamanxim	121
3.5 Estimativa do valor potencial dos serviços ecossistêmicos por classe de uso e cobertura da terra	127
4 Considerações finais	132
5 Referências	134
6 Materiais suplementares	138
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144

INTRODUÇÃO GERAL

As Unidades de Conservação (UCs) constituem instrumentos fundamentais para a preservação e a conservação dos recursos naturais, da biodiversidade e dos processos ecológicos nos biomas brasileiros. Em especial, os ecossistemas tropicais abrigam uma parcela significativa da biodiversidade global, reunindo elevada diversidade de fauna, flora e comunidades ecológicas. Esses ecossistemas desempenham funções essenciais à manutenção da vida no planeta, por meio da provisão de serviços ecossistêmicos, como o sequestro e a troca de carbono, regulação dos ciclos biogeoquímicos, purificação da água, dispersão de sementes, polinização e conservação dos solos.

No Brasil, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) administra 336 Unidades de Conservação federais, correspondentes a porções territoriais e seus respectivos recursos naturais legalmente protegidos pelo poder público em razão de sua relevância ecológica, ambiental e socioeconômica. De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), essas áreas são organizadas em dois grandes grupos: Unidades de Conservação de Proteção Integral e Unidades de Conservação de Uso Sustentável.

Os biomas brasileiros abrigam uma das maiores diversidades biológicas do planeta, distribuída em diferentes formações ecológicas e composta por elevada riqueza de espécies da fauna e flora, incluindo espécies endêmicas e ameaçadas de extinção. Essa biodiversidade sustenta processos ecológicos essenciais e serviços ecossistêmicos fundamentais à manutenção da vida, como regulação climática, ciclagem de nutrientes, conservação dos solos, polinização, provisão de água e manutenção de habitats.

Entretanto, a intensificação das atividades antrópicas especialmente mudanças no uso e cobertura da terra, exploração direta dos recursos naturais, fragmentação de habitats e mudanças climáticas, tem ampliado a degradação dos ecossistemas e aumentado o risco de perda de espécies relevantes para a funcionalidade ecológica dos biomas brasileiros (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019; Jaureguiberry et al., 2022; MapBiomas, 2024).

No âmbito das Unidades de Conservação federais, os Parques Nacionais (Parnas) integram o grupo das Unidades de Proteção Integral e constituem uma das categorias mais tradicionais de conservação no Brasil. De acordo com o SNUC, os Parques Nacionais têm como objetivo básico a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, possibilitando a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades

de educação e interpretação ambiental, recreação em contato com a natureza e turismo ecológico (Brasil, 2000).

Nessa categoria, a visitação pública está condicionada às normas e restrições estabelecidas no Plano de Manejo da unidade, instrumento técnico que define o zoneamento, as diretrizes de uso e as estratégias de gestão necessárias à conservação dos atributos naturais protegidos (Brasil, 2000; Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade [ICMBio], 2020).

As Florestas Nacionais (Flonas), por sua vez, pertencem ao grupo das Unidades de Conservação de Uso Sustentável e são constituídas por áreas com cobertura florestal predominantemente nativa. Diferentemente dos Parques Nacionais, cujo objetivo central é a preservação dos ecossistemas com mínima interferência humana, as Flonas buscam conciliar a conservação da biodiversidade com o uso múltiplo e sustentável dos recursos florestais. Nessa categoria, são incentivadas atividades de pesquisa científica, manejo florestal sustentável, educação ambiental e visitação pública, desde que compatíveis com os objetivos da unidade e regulamentadas pelo respectivo plano de manejo (Brasil, 2000; ICMBio, 2024).

A seleção das áreas de estudo desta tese considerou a diversidade de fitofisionomias, ecossistemas e categorias de manejo das Unidades de Conservação, bem como sua inserção territorial em relação a áreas urbanas, frentes de ocupação agropecuária e diferentes padrões de uso e cobertura da terra. Essa abordagem permite analisar, de forma integrada, como características ecossistêmicas, climatológicas e antrópicas condicionam a qualidade ambiental das áreas protegidas e de seus entornos.

Nesse contexto, a comparação entre Unidades de Proteção Integral e de Uso Sustentável torna-se relevante para compreender como distintos objetivos de conservação e manejo podem influenciar a exposição dos ecossistemas a pressões ambientais, especialmente aquelas associadas às mudanças no uso da terra, à intensificação de eventos climáticos extremos e à ocorrência de incêndios florestais.

A dinâmica atmosférica regional e os mecanismos de teleconexão climática exercem influência direta sobre os regimes de temperatura e precipitação, condicionando a disponibilidade hídrica, a umidade da vegetação e a sazonalidade dos ecossistemas. No Brasil, sistemas sinóticos como frentes frias, massas de ar, zonas de convergência, bloqueios atmosféricos e sistemas convectivos modulam a variabilidade climática em diferentes escalas temporais.

A incursão de sistemas frontais de médias latitudes na América do Sul, por exemplo, ocorre ao longo de todo o ano, com efeitos mais expressivos sobre a precipitação durante o

verão e sobre a temperatura durante o inverno (Andrade et al., 2012). Nas Unidades de Conservação, tais processos atmosféricos podem afetar a conservação dos ecossistemas ao modificar padrões de chuva, umidade relativa do ar, temperatura e déficit hídrico, variáveis diretamente associadas à ocorrência de secas, ondas de calor e aumento da inflamabilidade da vegetação.

As mudanças climáticas vêm intensificando riscos ambientais, sociais e econômicos em escala global, sobretudo em ecossistemas sensíveis e áreas com elevada vulnerabilidade socioambiental. O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC destaca que o aumento das emissões de gases de efeito estufa tem provocado aquecimento generalizado do sistema climático, ampliando a frequência e a intensidade de eventos extremos, como ondas de calor, secas, precipitações intensas e incêndios associados a condições meteorológicas críticas (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021, 2022, 2023).

Esses impactos afetam diretamente a biodiversidade, os serviços ecossistêmicos, a produção agrícola, os recursos hídricos e os meios de subsistência, tornando urgente a adoção de estratégias de adaptação e manejo capazes de ampliar a resiliência ecológica e social.

Entre os eventos extremos associados ao aquecimento global, as ondas de calor destacam-se pela persistência de temperaturas elevadas durante vários dias consecutivos e por seus efeitos sobre a saúde humana, os ecossistemas e os regimes de fogo. A literatura apresenta diferentes critérios para sua definição, considerando apenas temperaturas máximas ou a combinação entre máximas e mínimas; neste estudo, ambas as variáveis serão consideradas para caracterizar episódios de calor extremo (Perkins, 2015; Perkins-Kirkpatrick; Lewis, 2020).

A inclusão das temperaturas mínimas é particularmente relevante, pois noites anormalmente quentes reduzem a recuperação térmica dos ecossistemas, intensificam o estresse hídrico e podem contribuir para a redução da umidade dos combustíveis vegetais.

Nos biomas brasileiros, os efeitos das mudanças climáticas interagem com pressões antrópicas históricas e contemporâneas, como desmatamento, fragmentação de habitats, expansão agropecuária, mineração, exploração madeireira e transformação do uso da terra. Essa interação pode reduzir a capacidade de resiliência dos ecossistemas, intensificar processos de degradação ambiental e aumentar a vulnerabilidade de espécies endêmicas e ameaçadas. Mesmo em cenários intermediários de aquecimento, projeções climáticas indicam aumento da exposição dos ecossistemas tropicais a extremos de temperatura e precipitação, com impactos potenciais sobre a composição da vegetação, a disponibilidade hídrica, a produtividade primária e a estabilidade dos serviços ecossistêmicos (IPCC, 2022, 2023). Assim, a avaliação da capacidade de regeneração das áreas protegidas deve considerar as especificidades de cada

ecossistema, suas fitofisionomias, seu histórico de perturbação e sua exposição a pressões climáticas e antrópicas.

Nesse contexto, o fogo emerge como um componente central para a compreensão das mudanças ambientais em Unidades de Conservação. A dinâmica do fogo é condicionada pela interação entre clima, vegetação, relevo, disponibilidade de combustível, práticas de manejo e padrões de uso da terra. Em determinadas formações savânicas e campestres, o fogo pode integrar processos ecológicos naturais ou historicamente recorrentes; entretanto, alterações em sua frequência, intensidade, sazonalidade e extensão podem transformar regimes de fogo e provocar impactos negativos sobre a biodiversidade, os estoques de carbono, os solos e os serviços ecossistêmicos.

Estudos recentes demonstram que mudanças no uso da terra e extremos climáticos, especialmente secas prolongadas e temperaturas elevadas, têm alterado os regimes de fogo em regiões tropicais e nas zonas de transição Cerrado-Amazônia, aumentando a vulnerabilidade de paisagens submetidas à fragmentação e à expansão agropecuária (Ribeiro et al., 2024; Segura-Garcia et al., 2025).

Dessa forma, a análise integrada entre o uso e cobertura da terra, a climatologia e os eventos climáticos extremos permitem compreender como diferentes pressões ambientais modulam a ocorrência e a propagação dos incêndios florestais nas áreas protegidas. No caso das Unidades de Conservação brasileiras, os incêndios podem resultar tanto de práticas antrópicas, como do uso do fogo na limpeza de áreas e expansão agropecuária, e ainda da intensificação de condições meteorológicas favoráveis à combustão, como baixa umidade relativa do ar, déficit hídrico, altas temperaturas e ventos persistentes.

O monitoramento das áreas queimadas, da frequência do fogo e do período de recorrência torna-se, portanto, essencial para avaliar a vulnerabilidade das unidades selecionadas, subsidiar estratégias de prevenção e manejo integrado do fogo e compreender os efeitos combinados das mudanças climáticas e do uso da terra sobre a conservação dos ecossistemas (MapBiomias, 2024; IPCC, 2022; Ribeiro et al., 2024).

Diante desse contexto, esta tese teve como objetivo geral analisar a variabilidade climática, a distribuição sazonal da precipitação e da temperatura, a ocorrência de eventos climáticos extremos e sua relação com as mudanças no uso e cobertura da terra em Unidades de Conservação federais brasileiras. A análise concentrou-se nos Parques Nacionais da Chapada Diamantina e Grande Sertão Veredas, bem como na Floresta Nacional do Jamanxim, considerando suas especificidades ecossistêmicas, climáticas, territoriais e de manejo.

O estudo buscou compreender de que forma os padrões climáticos, a intensificação de extremos de temperatura e precipitação e os processos de antropização no interior e no entorno dessas áreas protegidas podem influenciar a qualidade ambiental, a vulnerabilidade dos ecossistemas e a dinâmica do fogo.

Para isso, foram utilizados dados climáticos do ERA5-*Land* e Xavier *et al.* (2022), com o objetivo de caracterizar a variabilidade espaço-temporal da precipitação e da temperatura nas Unidades de Conservação e em áreas antropizadas adjacentes. A integração desses dados com informações de uso e cobertura da terra e registros de fogo permitiu avaliar como as alterações da paisagem, associadas a condições climáticas extremas, podem modificar a exposição dos ecossistemas protegidos a incêndios florestais e outros processos de degradação ambiental.

A presente pesquisa justifica-se pela crescente frequência e intensidade de eventos climáticos extremos e por seus impactos ambientais, sociais e econômicos, especialmente em ecossistemas tropicais sujeitos à expansão agropecuária, à fragmentação da paisagem, ao desmatamento e à recorrência do fogo.

As Unidades de Conservação desempenham papel estratégico na proteção da biodiversidade, na manutenção dos serviços ecossistêmicos, na regulação climática e na conservação dos recursos hídricos; entretanto, sua efetividade pode ser comprometida quando pressões climáticas e antrópicas atuam de forma combinada. Assim, compreender as relações entre clima, uso da terra e fogo em diferentes categorias de manejo: Proteção Integral e Uso Sustentável, é fundamental para subsidiar estratégias de conservação, planejamento territorial, prevenção de incêndios florestais e adaptação às mudanças climáticas.

A tese está estruturada em três capítulos, organizados em formato de artigos científicos. O primeiro analisa a variabilidade climática, a sazonalidade da precipitação e da temperatura, os índices de extremos climáticos e as mudanças no uso e cobertura da terra nos Parques Nacionais da Chapada Diamantina e Grande Sertão Veredas. Esse capítulo busca compreender como a interação entre variabilidade climática, eventos extremos e processos de antropização no entorno influenciam a vulnerabilidade ambiental dessas Unidades de Conservação de Proteção Integral.

O segundo capítulo concentra-se na Floresta Nacional do Jamanxim, Unidade de Conservação de Uso Sustentável localizada no Arco do Desmatamento da Amazônia Oriental. Nesse capítulo, são investigadas, de forma integrada, a variabilidade climática, os extremos climáticos, as mudanças no uso e cobertura da terra e o regime de fogo, com ênfase nos efeitos sinérgicos entre aquecimento, déficit hídrico, degradação florestal, expansão agropecuária e recorrência de incêndios.

O terceiro capítulo amplia a análise para uma abordagem comparativa entre as três Unidades de Conservação estudadas, investigando a dinâmica espaço-temporal do fogo, a recorrência das áreas queimadas, a sazonalidade dos incêndios e sua relação com os padrões climáticos, eventos extremos e mudanças no uso da terra. Além disso, esse capítulo avalia os principais serviços ecossistêmicos potencialmente impactados pela ocorrência e recorrência do fogo, como conservação da biodiversidade, estoque e sequestro de carbono, regulação climática, proteção dos recursos hídricos, conservação dos solos e manutenção da conectividade ecológica. Dessa forma, o capítulo final integra os resultados anteriores e contribui para compreender como diferentes categorias de manejo respondem à interação entre clima, uso da terra e fogo.

Referências

- Andrade, K. M., Müller, G. V., Cavalcanti, I. F. A., Long, M. E. F., Bidegain, M., & Berri, G. (2012). Avaliação de mudanças na frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul em projeções do clima futuro. *Meteorológica*, 37(1), 15-26.
https://ri.agro.uba.ar/files/download/articulo/2012andrademartins.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Brasil. (2000). **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. (2024). *Planos de manejo*.
<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/planos-de-manejo>
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Bonn, Germany: IPBES.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The physical science basis*. Cambridge: IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
<https://www.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jaureguiberry, P., Titeux, N., Wiemers, M., Bowler, D., Coscieme, L., Golden, A. S., ..., & Purvis, A. (2022). The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science Advances*, 8(45), eabm9982. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9982>

MapBiomass. (2024, agosto). *Cobertura e uso da terra*.

[https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-15.127303%2C-51.419045%2C3&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams\[terri](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-15.127303%2C-51.419045%2C3&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)

Perkins, S. E. (2015). A review on the scientific understanding of heatwaves: their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, 164-165, 242-267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>

Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11, 3357. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>

Ribeiro, A. F. S., Santos, L., Randerson, J. T., Uribe, M. R., Alencar, A. A. C., Macedo, M. N., ..., & Brando, P. M. (2024). The time since land-use transition drives changes in fire regimes at the Cerrado-Amazon agricultural frontier. *Communications Earth & Environment*, 5, 96. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01248-3>

Segura-Garcia, C., Alencar, A., Arruda, V. L. S., Bauman, D., Silva, W., Conciani, D. E., & Menor, I. O. (2025). The fire regimes of the Cerrado and their changes through time. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 380(1924), 20230460. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0460>

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C., & Alves, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961-2020). *International Journal of Climatology*, 42(16), 8390-8404. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>

ARTIGO 1 – LAND-USE CHANGE AMPLIFIES CLIMATE EXTREMES AND ECOSYSTEM VULNERABILITY IN BRAZILIAN CONSERVATION UNITS¹

Abstract: Federal Conservation Units (FCUs) in Brazil are essential for biodiversity conservation and ecosystem services but are increasingly exposed to the combined effects of climate change and land-use transformation. This study provides an integrated assessment of ecosystem vulnerability in two representative conservation units, the Chapada Diamantina National Park (Caatinga) and the Grande Sertão Veredas National Park (Cerrado), over 1980 - 2023. Land use and land cover (LULC) data from MapBiomas were combined with gridded observations (Xavier dataset) and ERA5-Land reanalysis. Trends were evaluated using the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator, and extremes were quantified using ETCCDI indices. Results indicate a consistent intensification of thermal extremes, with significant increases in maximum temperatures and warm-event frequency, alongside longer dry spells. In the Cerrado, precipitation shows a significant decline (up to ~ -118 mm decade⁻¹), while in the Caatinga rainfall trends are non-significant but increasingly intermittent, with fewer wet days and stronger extreme events. These changes are closely linked to LULC dynamics in buffer zones, where agricultural expansion reduces evapotranspiration and moisture recycling, amplifying drought and heat stress. Although vegetation within FCUs remains relatively stable, degradation in surrounding areas weakens their climatic buffering capacity, increasing ecosystem vulnerability. These findings highlight the need for integrated, climate-informed management strategies to enhance the resilience of tropical protected areas.

Keywords: Climatology, Climate Change, Caatinga, Cerrado, Ecosystem Resilience.

1 Introduction

Climate change, driven by increasing greenhouse gas (GHG) emissions, has intensified pressures on ecosystems worldwide, leading to widespread degradation and biodiversity loss. These impacts are particularly critical in tropical regions, where ecosystems exhibit high biodiversity but limited adaptive capacity to rapid environmental changes (Marengo & Souza Junior, 2018; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). In these environments, species with narrow thermal niches and low phenotypic plasticity are especially vulnerable to shifts in temperature and precipitation regimes, increasing the risk of local extinction.

In addition to gradual climatic changes, the growing frequency and intensity of extreme events, such as droughts, heatwaves, and intense precipitation, have emerged as key drivers of ecosystem disruption (Zscheischler et al., 2018; Zhai et al., 2023). These events amplify hydroclimatic variability, often exceeding historical thresholds and accelerating environmental degradation. Recent observations indicate that global temperatures have already approached

¹ Artigo submetido ao periódico Science of the Total Environment.

1.5°C above pre-industrial levels, with a corresponding intensification of compound and successive extremes (IPCC, 2023). Such changes challenge ecosystem resilience and compromise essential ecosystem services (Damasceno & Fidelis, 2020; Pinho et al., 2020).

Anthropogenic pressures further exacerbate these impacts. Land use and land cover (LULC) changes, particularly deforestation and agricultural expansion, alter surface-atmosphere interactions, disrupt hydrological cycles, and reduce ecosystem resilience. In Brazil, these processes are especially relevant across biomes such as the Caatinga and Cerrado, where climate variability interacts with land-use dynamics to intensify degradation and desertification processes despite their protected status. Federal Conservation Units (FCUs) are increasingly exposed to these combined pressures (Pinho et al., 2020; Leite et al., 2019; Silva et al., 2020). These areas play a fundamental role in biodiversity conservation and climate regulation; however, their effectiveness depends on their capacity to withstand both climatic and anthropogenic disturbances. Previous studies have highlighted regional vulnerabilities and the intensification of extreme events, yet an integrated assessment linking LULC dynamics, climate variability, and extremes in conservation units remains limited.

This gap is critical in the Cerrado and Caatinga, biomes characterized by rapid land conversion and increasing vulnerability to aridity (Nobre et al., 2016). Native vegetation suppression, coupled with climate variability, intensifies fire risks and reduces water discharge in strategic basins (Marengo et al., 2021). Furthermore, severe multi-year droughts, exacerbated by climate change (IPCC, 2023), challenge the resilience of Conservation Units as biological refugia. Thus, integrating historical landscape changes with climate anomalies is fundamental to supporting adaptive management and the maintenance of ecosystem services (Zemp et al., 2017).

In this context, this study investigates the ecosystem vulnerability of two fundamental Brazilian conservation units: the Chapada da Diamantina National Park and the Grande Sertão Veredas National Park. The research analyzes the interactions between land use and land cover dynamics, climate variability, and the occurrence of extreme events over the 1980 - 2023 temporal horizon. To achieve this, LULC data from the MapBiomas platform were integrated with climatic time series from the Xavier and ERA5-Land datasets. Trend detection and the magnitude of changes were assessed through the application of Kendall statistical tests and Sen's slope estimator, complemented by standardized climate indices. By associating land use change vectors with climatic drivers, this work offers new perspectives on the mechanisms controlling ecosystem vulnerability in protected areas. The results presented herein aim to support the refinement of adaptive environmental management strategies and broaden the

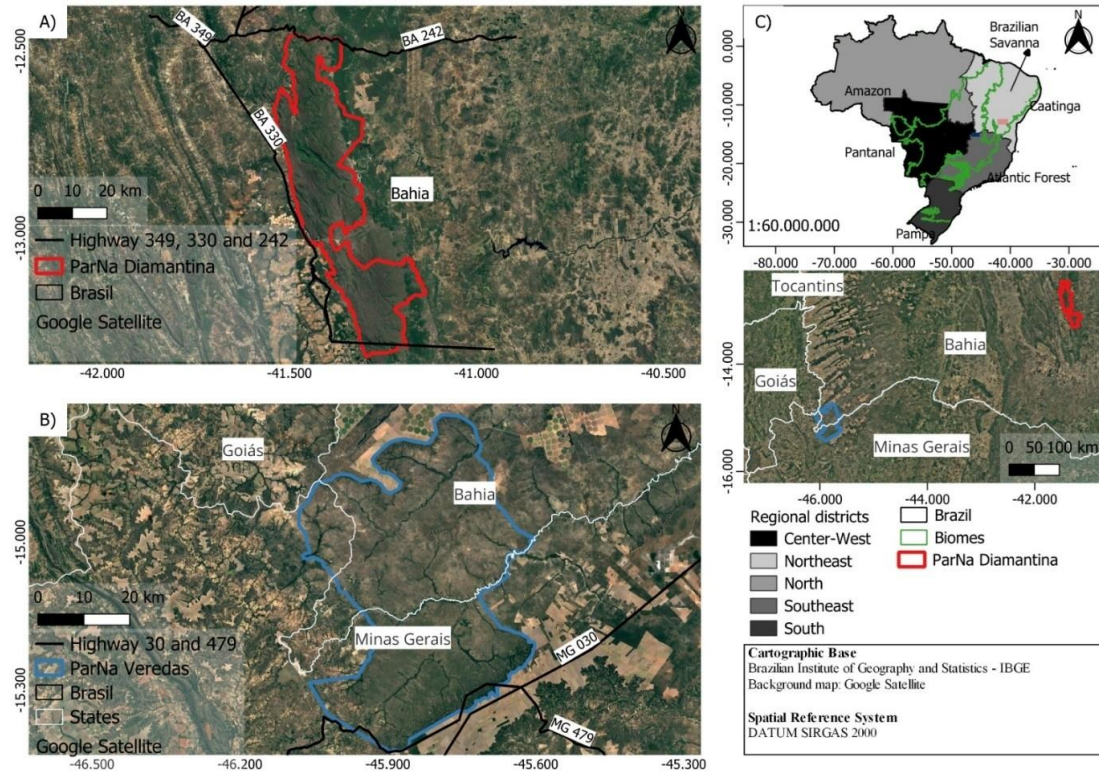
understanding of ecosystem resilience in the face of ongoing anthropogenic environmental changes.

2 Materials and methods

2.1 Study region

This study focuses on two Federal Conservation Units (FCUs) representing the Caatinga and Cerrado biomes: the Chapada Diamantina National Park (CDNP) (Fig. 1a) and the Grande Sertão Veredas National Park (GSVNP) (Fig. 1b). These areas were selected due to their ecological relevance, integral protection status, and exposure to significant anthropogenic pressures, particularly deforestation and agricultural expansion. The selected FCUs encompass distinct climatic, ecological, and geomorphological conditions, allowing a comparative assessment of ecosystem responses to climate variability and land-use change.

Fig. 1. Location of conservation units



The CDNP is located in central Bahia, northeastern Brazil, between coordinates $-41^{\circ} 35'$ West Longitude and $-12^{\circ} 25'$ South Latitude, covering approximately 152,000 ha within the

Paraguaçu River basin (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade [ICMBio], 2024). The region is characterized by plateau topography with elevations above 800 m, which promotes strong spatial variability in climate and vegetation (Oliveira Junior & Santos, 2025; Instituto Socioambiental, 2024). The park is predominantly situated within the Caatinga biome, a semi-arid ecosystem with high levels of endemism and biodiversity.

The climate is marked by irregular rainfall and prolonged dry periods, with annual precipitation ranging from approximately 600 to 1,600 mm depending on elevation. Mean temperatures vary between 18°C and 26°C, with high evapotranspiration during the dry season (Leite et al., 2017). These conditions, combined with increasing anthropogenic pressures, contribute to high susceptibility to drought and wildfire occurrence (Regoto et al., 2021; Pinho et al., 2020).

The GSVNP is located on the border between Minas Gerais and Bahia coordinates -45° 81' West Longitude and -15° 06' South Latitude, covering approximately 231,000 ha within the São Francisco River basin. The park is entirely situated in the Cerrado biome and plays a key role in regional hydrology as a watershed divide. The region exhibits typical Cerrado climatic conditions, with a marked wet and dry season. Mean annual temperatures are around 23°C, with maximum temperatures ranging from 23°C to 29°C and minimum temperatures between 13°C and 20°C. Annual precipitation ranges from 700 to 1,600 mm (Xavier, 2022; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis [IBAMA], 2003; ICMBio 2024).

The landscape is dominated by sandy plateaus and diverse vegetation types, including cerrado sensu stricto, veredas, and gallery forests. Seasonal drought and low humidity conditions contribute to ecosystem vulnerability, particularly in relation to fire dynamics (ICMBio, 2023).

2.2 Data used

2.2.1 Land use and occupation data

Land use and occupation data for the period 1985 to 2023 were obtained from MapBiomas Collection 10. MapBiomas is a collaborative network comprising Non-Governmental Organization (NGO), universities, and technology startups. Data processing was conducted through a partnership with Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). The MapBiomas project results from the intersectoral work of remote sensing specialists, aiming to produce a continuous historical series on land cover and use evolution in Brazilian territory,

utilizing Artificial Intelligence and processing Landsat imagery from the North American Space Agency (NASA). The mapping is based on a pixel-by-pixel classification of images with a 30m resolution (Souza et al., 2020).

MapBiomass Collection 10 provides annual land cover and use maps and data for Brazil, covering the period from 1985 to 2023. The platform offers information regarding accuracy, methodology, and the algorithm's theoretical basis document (ATBD) (MapBiomass, 2024).

To analyze changes in land use and cover, the main land use classes, according to MapBiomass classification (Forest; Herbaceous and Shrubby Vegetation; Agriculture and Livestock; Non-vegetated Area; and Water Bodies), were identified by territorial extension. The temporal analysis, based on annual data, considered five years intervals to investigate the relationship between the dynamics of natural areas and deforestation, as well as the conversion of natural areas into agricultural and pastoral areas.

The spatial analysis was delineated by the territorial boundaries of the FCUs and by a 20 km buffer zone surrounding them. The methodological objective of this expansion was to assess land use dynamics and the potential influence of the edge effect on local climatology; climatic extremes; and, consequently, the ecological integrity and sustained viability of the Conservation Units.

2.2.2 Climatic data

Daily precipitation and temperature data were obtained from two datasets for the period 1980-2023: (i) observed gridded data from Xavier (2022), and (ii) ERA5-Land reanalysis data. The Xavier dataset (Brazilian Daily Weather Gridded Data – BR-DWGD) provides daily precipitation (mm) and temperature (°C) at a spatial resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. These data are derived from the interpolation of observations from 11,473 rain gauges and 1,252 meteorological stations, covering the period 1961-2024 (Xavier, 2022). The ERA5-Land dataset, produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), provides hourly land surface variables at a spatial resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. The dataset integrates observations and land surface modeling through the ECMWF land surface scheme and is available via the Copernicus Climate Data Store. Daily values were derived from the hourly fields (Antonino et al., 2022).

2.2.3 Climate trends

Climatic variability was assessed using monthly and annual time series of precipitation and temperatures minimum and maximum. Trends over the period 1980-2023 were evaluated using the non-parametric Mann-Kendall (MK) test (Mann, 1945; Kendall, 1975). and their magnitudes were estimated using Sen's slope estimator (Rubim et al., 2024). The MK test is widely used in climatological studies due to its robustness to non-normal data distributions and its suitability for detecting monotonic trends. Statistical significance was assessed at the 95% confidence level ($p < 0.05$) (Eq. 1):

$$S_{mk} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

The Kendall rank correlation coefficient was used to quantify the strength of monotonic relationships between variables. This non-parametric metric is suitable for both continuous and ordinal data and provides a robust measure of association in the presence of non-linear relationships. All analyses were performed in R (R Core Team, 2024), using the *Kendall* package.

2.2.4 Extreme climatic indices for precipitation and temperature

Climate extreme indices were computed using daily precipitation and temperatures minimum and maximum data from the Xavier dataset and ERA5-Land reanalysis for the period 1980-2023. A total of nine precipitation and seven temperature indices were calculated (Table 1), following the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) framework (Tank et al., 2009).

These indices quantify the frequency, intensity, and duration of extreme events, including metrics related to heavy precipitation, drought conditions, and temperature extremes. Calculations were performed using Climate Data Operators (CDO version 2.2.0) and Python-based routines (version 3.10) executed within the Google Colab environment (Bisong, 2019; Van Rossum & Drake, 2009).

Table 1. Extreme precipitation and temperature indices

Extreme precipitation indices			
Indicative	Index	Definition	Unit
Intensity	PRCTOT	Annual total precipitation on wet days ($PRCTOT \geq 1 \text{ mm}$)	mm
	SDII	Relationship between total annual precipitation and the number of rainy days mm/day.	mm
	Rx1 day	Annual maximum precipitation in 1 day	mm
	Rx 5day	Annual maximum precipitation in 5 consecutive days	mm
	R1mm	Number of days with precipitation $\geq 1 \text{ mm}$	Days
Frequency	R10 mm	Number of days in a year when precipitation was $\geq 10 \text{ mm}$	Days
	R20 mm	Number of days in a year when precipitation was $\geq 20 \text{ mm}$	Days
Duration	CDD	Maximum number of consecutive dry days ($PRCP < 1 \text{ mm}$)	Days
	CDW	Maximum number of consecutive wet days ($PRCP \geq 1 \text{ mm}$)	Days
Extreme Temperature Indices			
Index	Definition		Unit
TNn	Minimum monthly value of daily minimum temperature		$^{\circ}\text{C}$
TNx	Maximum monthly value of daily minimum temperature		$^{\circ}\text{C}$
TXn	Minimum monthly value of daily maximum temperature		$^{\circ}\text{C}$
TXx	Maximum monthly value of daily maximum temperature		$^{\circ}\text{C}$
TR20	Number of tropical nights. Annual count of days when daily minimum temperature $> 20^{\circ}\text{C}$		D
SU	Annual count of days when $TX > 25^{\circ}\text{C}$		D
DTR	Mean difference between TX and TN. Thermal amplitude		$^{\circ}\text{C}$

Source: Adapted Expert Team on Climate Change Detection and Indices [ETCCDI], 2024.

Precipitation indices characterize intensity, frequency, and duration of rainfall events, while temperature indices describe variations in maximum and minimum temperatures, allowing the identification of extreme warming and cooling events. These indices follow the standardized definitions of the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) (Tank et al., 2009). The selected indices include metrics associated with heavy precipitation (e.g., RX1day, RX5day), dry conditions (e.g., CDD), and temperature extremes (e.g., TXx, TXn), enabling a comprehensive assessment of hydroclimatic variability and extremes across the study regions (Silva & Nascimento, 2024; World Meteorological Organization [WMO], 2024).

3 Results and discussion

3.1 Land use and land cover

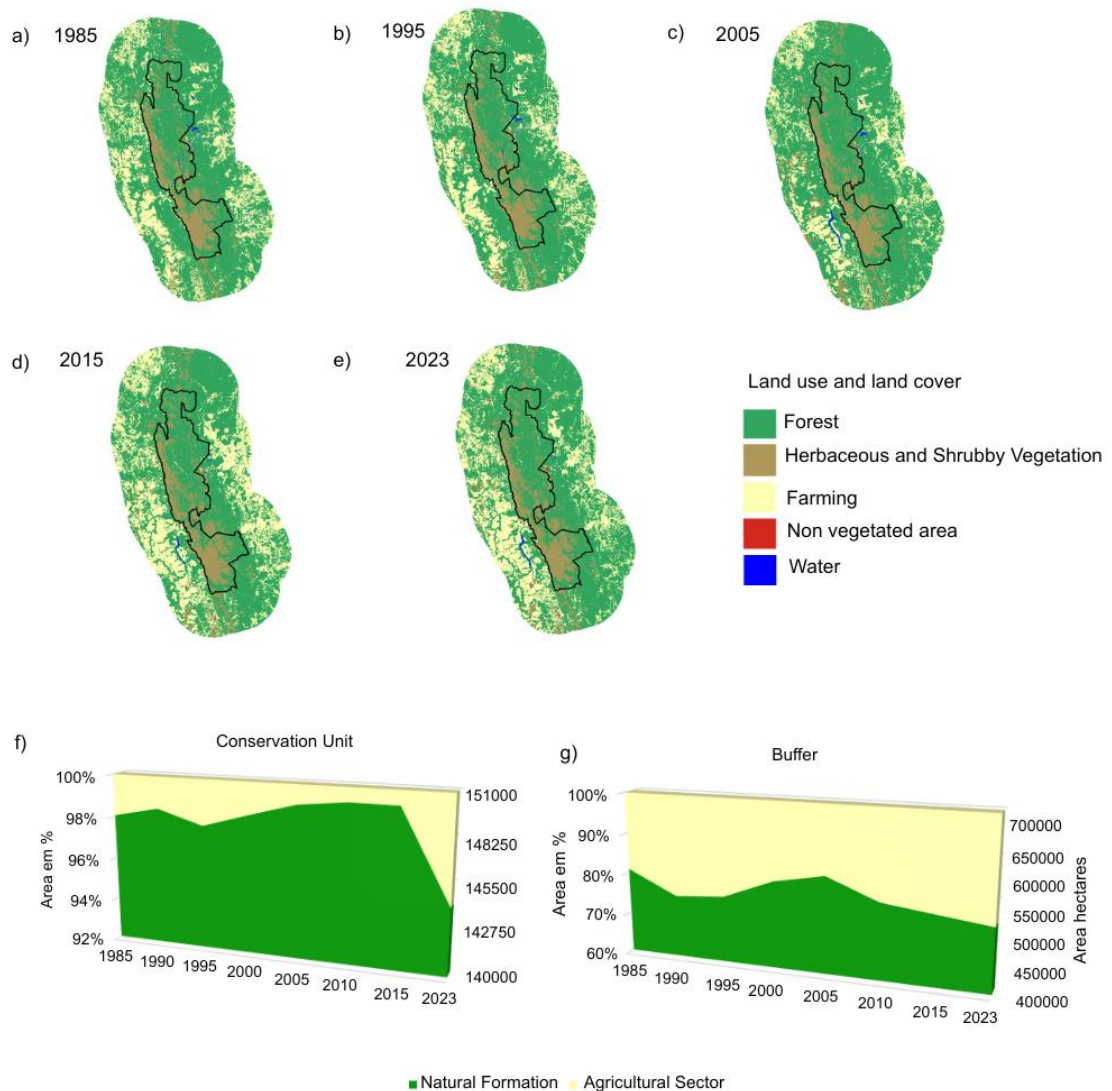
The ecological integrity of conservation units, alongside the protection of biodiversity and natural resources is intrinsically vulnerable to land use dynamics in surrounding areas. Consequently, comprehensive understanding of proximal anthropic pressure is essential for proactive environmental management, facilitating the formulation of impact mitigation strategies and the preservation of functional landscape connectivity.

3.1.1 Chapada da Diamantina National Park (CDNP)

The multitemporal analysis of land use and land cover (LULC) within the Chapada Diamantina National Park (CDNP) and its 20-km buffer zone reveals a clear trend of increasing anthropogenic pressure between 1985 and 2023. The expansion of agricultural activities has led to the progressive loss and fragmentation of native vegetation, as evidenced by MapBiomass data (Fig. 2a, b). LULC dynamics indicate a transition from predominantly natural landscapes to anthropogenic systems, particularly along the western portion of the buffer zone. This shift is primarily driven by the expansion of mechanized agriculture, characterized by the conversion of native vegetation into temporary croplands dominated by soybean (*Glycine max* L.) monocultures (Zanata et al., 2019). As a result, a spatial gradient of increasing anthropogenic pressure is established, reducing ecosystem connectivity and compromising ecological integrity.

Since creation in 1989, the Chapada da Diamantina National Park (CDNP) initially comprised approximately 147,276 ha of natural cover, including grassland, forest, and savanna formations, representing 96.8% of its total area. However, spatio-temporal analyses reveal a gradual decline in native phytophysionomies. By 2023, natural vegetation decreased to ~145,000ha (94.5% of the total area). Between 2015 and 2023, a 6,780ha were converted to agricultural land, corresponding to ~5% of the protected area (Fig. 2f).

Fig. 2. Land use and cover of Chapada da Diamantina National Park and adjacent areas, period from 1985 to 2023



Historical land use and land cover dynamics further indicate a significant expansion of anthropic activities within the park boundaries, where agricultural areas increased from ~3,000 ha in 1985 to 7,384 ha in 2023. This trajectory represents a net conversion of ~4,500 ha from natural formations to agricultural uses (Fig. 2f), corresponding to a 152.1% increase in converted natural land over the evaluated period. Simultaneously, within the surrounding buffer zone (619,880 ha), natural formations declined by 8% between 1985 and 2023. This reflects a total loss of 35,489 ha of native vegetation, primarily driven by the expansion of pastures, agricultural mosaics, and intensive crop systems.

In contrast, western and southwestern sectors of the buffer zone are primarily influenced by cattle ranching, which has driven a substantial expansion of agriculture. This is evidenced

by a growth from 117,384 ha (18% of the total area) in 1985 to 151,197 ha (24% of the buffer's total area) in 2023, representing an increase of 33,813 ha (Fig. 2g). Latrubesse et al. (2019) these changes enhance edge effects and contribute to habitat fragmentation, with potential implications for hydrological processes and ecosystem resilience.

On the other hand, despite the intense anthropogenic pressure observed in the southwestern and western sectors, natural formations exhibit relative stability across the central and northeastern regions. This resilience is supported by a governance framework that integrates conservation units from multiple administrative levels, thereby promoting systemic landscape protection (ICMBio, 2024).

The expansion of areas designated for agricultural activities primarily included pastures, agricultural mosaics, coffee plantations, and perennial and temporary crops (MapBiomass, 2024). This intensification of land use for agricultural purposes suggests an increase in anthropogenic pressure on the natural ecosystems adjacent to the Conservation Unit, with potential negative impacts on biodiversity, ecosystem services, and regional climatology.

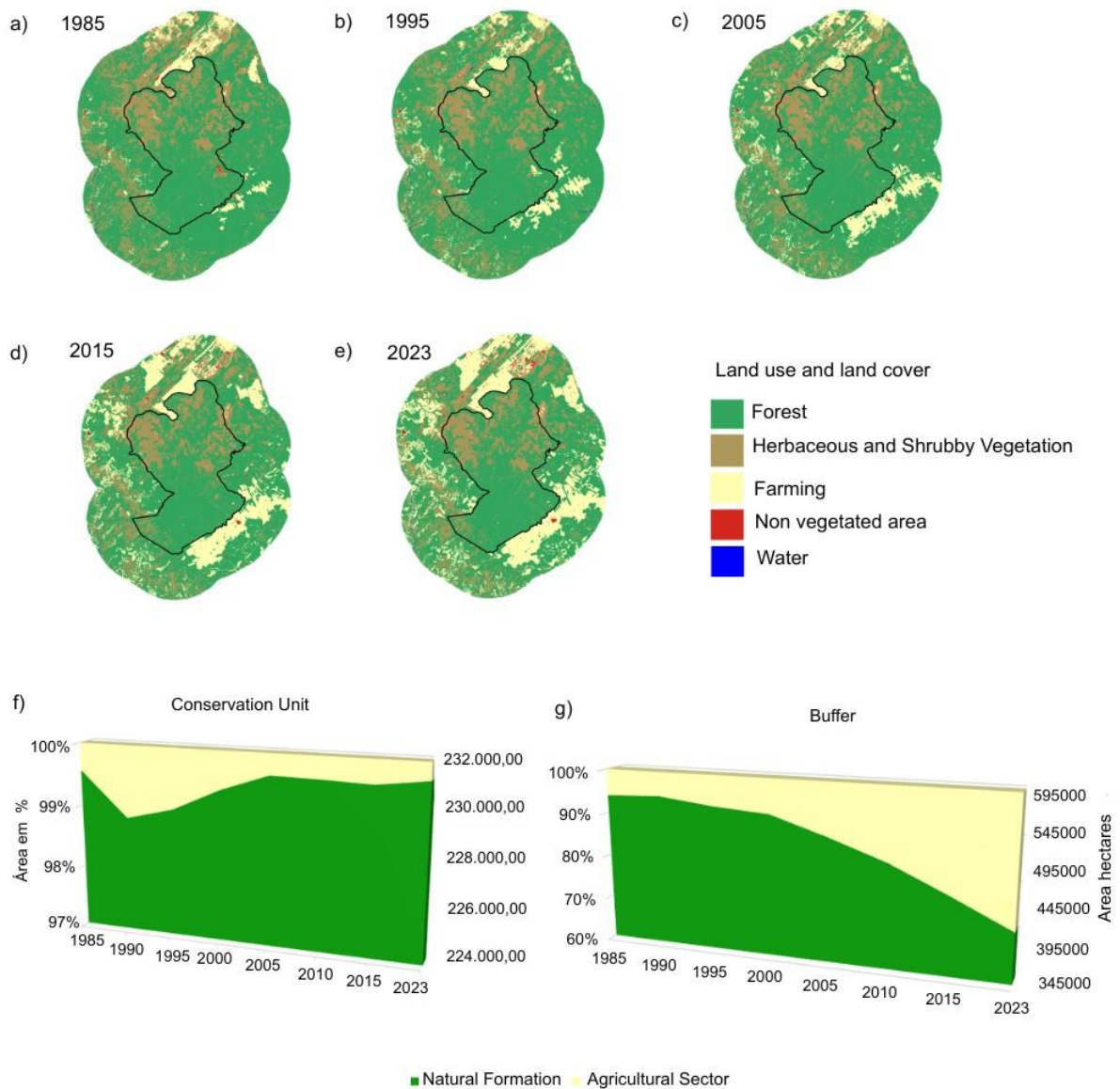
3.1.2 Grande Sertão Veredas National Park (GSVNP)

Land-use and land-cover dynamics within the GSVNP and its 20 km buffer zone demonstrate a persistent expansion of anthropic activities, primarily driven by temporary crops and pasturelands (Fig. 3).

In 1985, natural formations encompassed 229,321 ha within the protected area. During the initial quinquennium, approximately 1,700 ha of native vegetation were converted to agricultural use, representing a 4% reduction in natural cover. Notably, this trajectory was reversed after 2000, as subsequent spatial analyses indicate a trend towards ecological succession and the gradual recovery of natural vegetation within the conservation unit's boundaries (Fig. 3f).

This recovery highlights the effectiveness of the conservation unit in maintaining ecological integrity despite external pressures. Notably, previously degraded areas were restored mainly to grassland formations, while some savanna areas showed limited recovery from agricultural mosaics. In contrast, the buffer zone experienced a substantial decline in natural formations, from 95% (537,464 ha) in 1985 to 70% (404,920 ha) in 2023, corresponding to a loss of 132,543 ha (Fig. 3g) (Zanata et al., 2019). This conversion, largely driven by pasture expansion and soybean cultivation, represents a significant increase in anthropogenic pressure.

Fig. 3. Land use and cover of Grande Sertão Veredas National Park and adjacent areas, period from 1985 to 2023



The presence of veredas (wetland ecosystems) is particularly critical in this region. These systems play a key role in aquifer recharge, hydrological regulation, biodiversity conservation, and climate stability. However, inadequate land-use practices in adjacent areas may compromise these functions. Brazilian environmental legislation (Forest Code, Law nº 12.651/2012) establishes protection guidelines for Permanent Preservation Areas (APPs), including veredas. Therefore, careful delineation of buffer zones, environmental impact assessments, and implementation of mitigation strategies are essential to reconcile socioeconomic development with environmental conservation (Fig. 3e).

3.2 Climate trends and changes in LULC of conservation units

In the Chapada Diamantina National Park and its surrounding buffer zone, the Mann-Kendall analysis reveals a relative stability in the rainfall regime, contrasting with clear signals of thermal warming. Unlike other regions within the Brazilian semi-arid domain, precipitation shows no statistically significant trends ($p > 0.05$) in either dataset, as evidenced by the near-neutral trend lines in (Table 2). However, the behavior of minimum temperatures indicates a robust shift in the local climatic profile; the Xavier dataset points to a significant increase in nocturnal temperatures both within the conservation unit ($p = 0.002$; $\tau = 0.108$) and its surroundings ($p = 0.006$; $\tau = 0.101$). This persistent warming signal in minimum temperatures suggests a reduction in the diurnal temperature range, which may have profound ecological implications for the park's sensitive biota.

Table 2. Mann-Kendall climate trends – precipitation, maximum temperature and minimum temperature Chapada Diamantina National Park and Grande Sertão Veredas National Park

Chapada da Diamantina National Park		Xavier		ERA5-Land	
		p-value	tau	p-value	tau
Precipitation	UC	-0,045	0,124	0,188	-0,038
	Buffer	-0,046	0,114	0,189	-0,038
Minimum Temperature	UC	0,002	0,108	0,526	-0,018
	Buffer	0,006	0,101	-0,016	0,581
Maximum Temperature	UC	0,154	0,119	0,624	0,142
	Buffer	0,151	0,384	0,013	0,634

Regarding maximum temperatures, the results highlight an important methodological divergence between the datasets, with warning signs concentrated in the buffer zone. Although the Xavier dataset records positive tau values (0.119 in the FCU and 0.384 in the buffer), the lack of statistical significance ($p > 0.15$) precludes the confirmation of a long-term trend in this specific base. In contrast, ERA5-Land identifies a sharp and statistically relevant warming trend specifically within the buffer zone ($p = 0.013$; $\tau = 0.624$), suggesting that the areas peripheral to the park may be experiencing more intense thermal pressures than the preserved core. This asymmetry between the interior of the unit and its surroundings underscores the importance of

buffer zones in mitigating climate stress and highlights the need for continuous monitoring given the vulnerability of the Chapada's high-altitude ecosystems.

In contrast, precipitation exhibits a weak decreasing tendency, characterized by negative Tau values, although these trends are not statistically significant ($p\text{-value} > 0.05$). Despite the lack of significance, such tendencies may still have critical ecological implications when coupled with the significant warming trends observed across Brazil. These thermo-pluviometric changes marked by an increase in warm extremes and a higher frequency of consecutive dry days (CDD) adversely affect biodiversity conservation within the park by intensifying evapotranspiration rates and environmental water stress (Avila-Diaz et al., 2020). Although located within the Brazilian semi-arid domain, the Chapada Diamantina presents a highly irregular rainfall regime, strongly modulated by large-scale atmospheric circulation and synoptic systems that govern moisture transport over the region.

Notwithstanding, the intensification and westward displacement of the South Atlantic Subtropical High (SASH) induces large-scale atmospheric subsidence, suppressing deep convective activity and inhibiting cloud formation. This synoptic configuration effectively alters the trajectory of cold fronts and disrupts the convergence of moisture transport, thereby hindering the establishment of the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) and promoting prolonged dry spells. The interplay among these synoptic-scale mechanisms, modulated by regional topography and land surface characteristics, governs the spatiotemporal variability of precipitation, with critical implications for water availability and ecosystem stability (Cavalcanti et al., 2009).

3.2.1 Grande Sertão Veredas National Park

The Mann-Kendall analysis for the Grande Sertão Veredas National Park (GSVNP) and its buffer zone indicates a statistically significant decline in precipitation ($p\text{-value} < 0.05$), with negative tau values ($p = 0.020$ within the conservation unit and $p = 0.018$ in the buffer (Table 3).

Regarding precipitation, both datasets confirm a statistically significant decline ($p < 0.05$). The Xavier dataset yields Kendall's tau values of -0.061 for both the Conservation Unit ($p = 0.036$) and the buffer zone ($p = 0.033$). The ERA5-Land dataset indicates a more pronounced downward trend, with tau values of -0.068 ($p = 0.020$) in the FCU and -0.069 ($p = 0.018$) in the buffer zone.

Both datasets consistently indicate a warming trend for maximum temperatures, characterized by significant positive tendencies. Moderate increases were recorded with tau values of 0.061 and 0.068 for the Xavier dataset, and 0.159 and 0.159 for ERA5-Land (within the FCU and buffer zone, respectively), as evidenced by the positive slopes in (Table 3).

Table 3. Mann-Kendall trends in precipitation, maximum temperature, and minimum temperature in the Grande Sertão Veredas National Park.

Parque Nacional Grande Sertão Veredas		Xavier		ERA5-Land	
		p-value	tau	p-value	tau
Precipitation	UC	0,036	-0,061	0,020	-0,068
	Buffer	0,033	-0,061	0,018	-0,069
Minimum Temperature	UC	0,000	0,191	0,022	-0,066
	Buffer	0,000	0,193	0,025	-0,065
Maximum Temperature	UC	0,033	0,061	0,000	0,159
	Buffer	0,018	0,068	0,000	0,159

In contrast, minimum temperature trends exhibit dataset-dependent behavior. The Xavier dataset indicates a substantial and significant increase, recording the highest tau values in this study (0.191 for the FCU and 0.193 for the buffer zone), suggesting a shift toward warmer nights. Conversely, ERA5-Land records a significant decrease ($p = 0.025$), with negative tau values (-0.066 in the FCU and -0.065 in the buffer zone) (Table 3).

Rainfall variability in this region is primarily controlled by the interaction between the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) and frontal systems, which are key drivers of precipitation in southeastern Brazil (Clemente et al., 2017). In contrast, prolonged drought conditions are associated with the strengthening of the South Atlantic Subtropical High. When intensified and displaced westward, this high-pressure system suppresses convection, inhibits cloud formation, and blocks frontal incursions. These conditions promote persistent atmospheric stability, leading to reduced precipitation, increased evapotranspiration, and declining soil moisture, thereby exacerbating drought conditions (Carpenedo & Ambrizzi, 2020; Reboita et al., 2010; Quadro et al., 2012).

Additionally, interactions between frontal systems and stationary cold fronts over the adjacent ocean can favor SACZ formation during summer. Extreme rainfall events in southeastern Brazil are frequently linked to this configuration, underscoring the complexity of atmospheric controls on regional hydroclimate (Quadro et al., 2012). These results suggest that land-use changes and large-scale atmospheric dynamics jointly modulate regional

hydroclimate, reinforcing the vulnerability of conservation units to both climatic and anthropogenic pressures.

In the specific context of the Grande Sertão Veredas National Park (GSVNP), the seasonal dynamics of the SASH act as the primary driver of the marked dry season typical of the Cerrado biome. During the austral autumn and winter, the expansion and establishment of the SASH over central Brazil induce strong atmospheric subsidence in the lower and middle troposphere. This process creates a persistent atmospheric blocking that prevents the convergence of moisture from the Amazon basin and the advance of frontal systems, thereby consolidating the severity of the dry season, elevating the water deficit, and exacerbating the park's vulnerability to wildfires (Cavalcanti et al., 2009).

3.2.1.1 Significant trends in climate extremes indices for precipitation and temperature in the Chapada Diamantina National Park

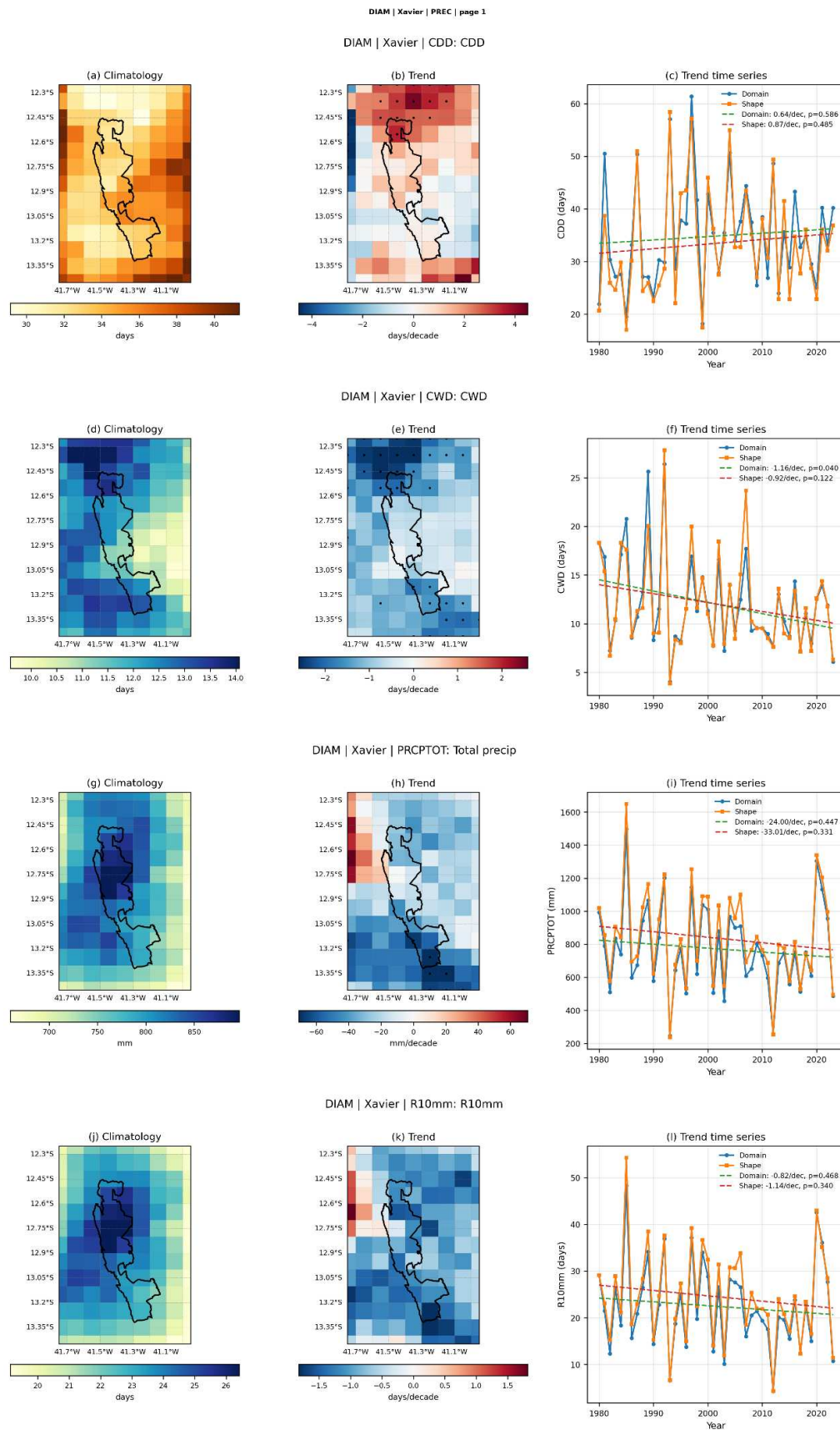
Fig. 4 illustrates the spatial distribution and temporal trends of extreme precipitation indices in the Chapada Diamantina National Park and its buffer zone, using indices derived from the Xavier observational dataset.

The historical climatology of the region is consistently captured by both the Xavier (Fig. 4a, d, g, j; Supplementary 1m, p, s) and ERA5-Land (Supplementary 2a, d, g, j and 3l, m, p, s) models, which highlight the Chapada Diamantina National Park as an orographic core of higher moisture and persistent rainfall in its central and southern portions. However, the datasets diverge in absolute magnitude, with the observational baseline (Xavier) recording substantially more severe consecutive dry days (CDD).

Time series indicate a reduction in total precipitation (PRCPTOT) of approximately 30 mm decade⁻¹, driven by a decreased frequency of wet days (CWD, R10mm, R20mm). Paradoxically, absolute precipitation extremes (RX1day and RX5day) exhibit positive trends, while the maximum number of consecutive dry days (CDD) significantly increased (up to 11.56 days decade⁻¹, $p=0.005$), signaling a shift toward an intermittent and extreme rainfall regime.

Spatially, the most robust and statistically significant changes show this intermittency affecting critical areas. The accelerated expansion of dry spells (CDD) (Fig. 4b) and the intensification of torrential rains (RX1day) (Supplementary 1q), captured by Xavier, are highly concentrated in the western and northwestern borders. Conversely, ERA5-Land (Supplementary 2b and 3q) projects more pronounced rainfall reductions in the eastern and northern sectors.

Fig. 4. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based Xavier



The vulnerability imposed by these climate extremes is severely amplified by local Land Use and Land Cover dynamics. Landscape analysis (Fig. 2) reveals a stark territorial contrast: while the CDNP interior has preserved its natural cover over the decades (Fig. 2f), the buffer zone has undergone rapid vegetation suppression driven by continuous agricultural expansion (Fig. 2g).

This peripheral anthropogenic intervention transcends habitat loss, actively altering regional climatology. Replacing native vegetation with crops reduces evapotranspiration and alters surface albedo, decreasing moisture recycling in the lower troposphere. This degradation creates a positive feedback loop that exacerbates drought severity (CDD) and boosts the convective energy of torrential rains (RX1day, RX5day), ultimately compromising the conservation unit's microclimatic buffering capacity.

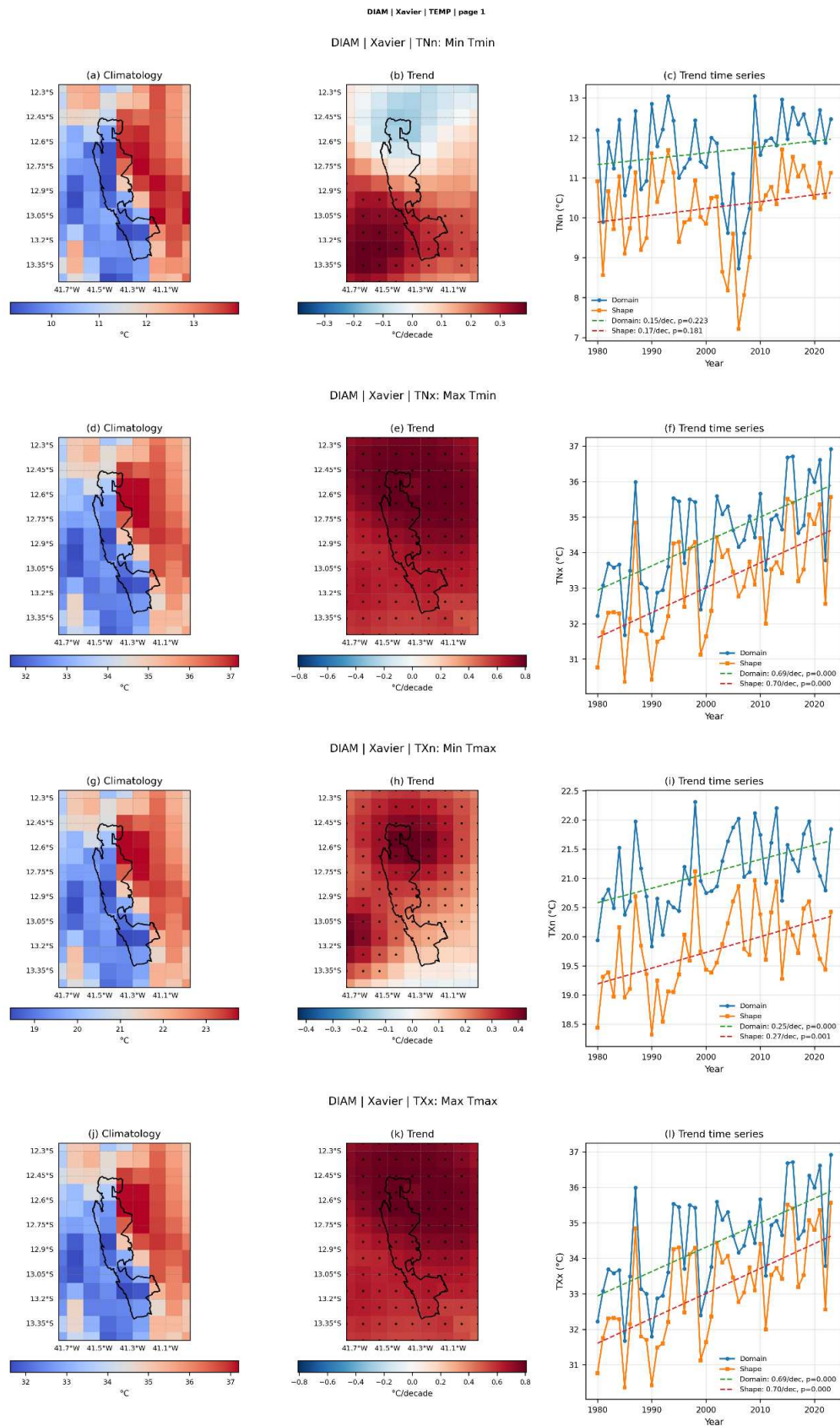
Ultimately, the rapid conversion of natural areas to agriculture in the buffer zone undermines the park's biodiversity resilience. Endemic-rich native vegetation relies on a stable, humid microclimate. Prolonged dry spells (CDD) induce severe water deficits in the flora, increasing plant mortality and dry biomass availability, which exponentially raises wildfire risk and severity. For the fauna, water stress reduces the availability of perennial water bodies and refuges, while buffer degradation prevents species migration, trapping them in a fragmented landscape. Under this scenario, when extreme and concentrated rainfall (RX1day) hits soils exposed by fire or drought, it triggers accelerated erosion rather than local aquifer recharge.

Fig. 5 presents the spatial distribution and temporal trends of the temperature extreme indices, revealing a pervasive warming signal across the entire study area.

Although both datasets indicate an intensification of thermal stress, the Xavier observational dataset captures a much stronger and statistically significant warming magnitude compared to the ERA5-Land reanalysis.

The analysis of the temperature climatology for the CDNP and its buffer zone reflects the strong influence of the region's complex orography and topography. When comparing datasets, the Xavier gridded observational model (Fig. 5; Supplementary 4) effectively demonstrates local thermal variations.

Fig. 5. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based on Xavier



The spatial distribution of mean temperatures reveals that the central and higher-altitude sectors of the Federal Conservation Unit function as islands of freshness, with minimum (TNn) and maximum (TXx) temperatures significantly lower than those observed in the adjacent lowlands (Fig. 5a, j). While the Xavier observational model captures these topographical nuances in greater detail, ERA5-Land confirms a more pronounced warming pattern in the eastern and northeastern sectors of the domain, coinciding with lower altitude areas and a greater influence of continental air masses.

Although the historical climatological regime exhibits this mild character at higher elevations, trend analysis reveals a robust ongoing warming scenario. While trends for daily minimum temperatures (TNn) are spatially mixed and lack statistical significance across much of the study area, daytime maximum temperature indices exhibit a clear warning signal. Both the lowest daytime maximums (TXn) and the highest daytime maximums (TXx) show significant increases, particularly in the Xavier dataset, with rates of $+0.25^{\circ}\text{C}$ and $+0.26^{\circ}\text{C}$ per decade ($p < 0.001$), respectively. This warming follows a south-to-north gradient, indicating that the northern portion of the park is under greater thermal stress.

Heat extremes are intensifying markedly throughout the CDNP, with visible impacts on the spatial distribution of climatic severity. The Summer Days (SU) index points to a severe expansion in the duration of hot conditions (maximums $> 25^{\circ}\text{C}$), increasing by an average of +10 days per decade. Simultaneously, the Tropical Nights (TR20) index has increased substantially, with a pronounced warming hotspot in the eastern and northeastern sectors, specifically in the Pantanal do Marimbus region. The statistically significant increase in the Diurnal Temperature Range (DTR) of $+0.23^{\circ}\text{C}$ per decade reveals that maximum temperatures are rising faster than minimums, increasing atmospheric evaporative demand and the probability of physiological drought for the native flora.

These hydroclimatic changes interact critically with LULC dynamics and the park's resilience capacity. Historical analysis (1985-2023) shows that the interior of the FCU has been effective in maintaining forest and herbaceous formations. However, the buffer zone has experienced a retraction of natural vegetation from 80% to 70%, giving way to the agricultural sector. This degradation at the edges reduces the park's climatic buffering effect, elevating the risk of wildfires and water stress. In agricultural systems, such as high-altitude coffee plantations, the increase in DTR and extreme temperatures threatens to accelerate phenological cycles and compromise productivity, demonstrating that climatic vulnerability transcends ecological limits and impacts the region's socioeconomic security.

3.2.1.2 Significant trends in precipitation and temperature climate extremes indices for the Grande Sertão Veredas National Park

Fig. 6 illustrates the comparative analysis of temporal trends in precipitation extreme indices over the Grande Sertão Veredas National Park and its buffer zone.

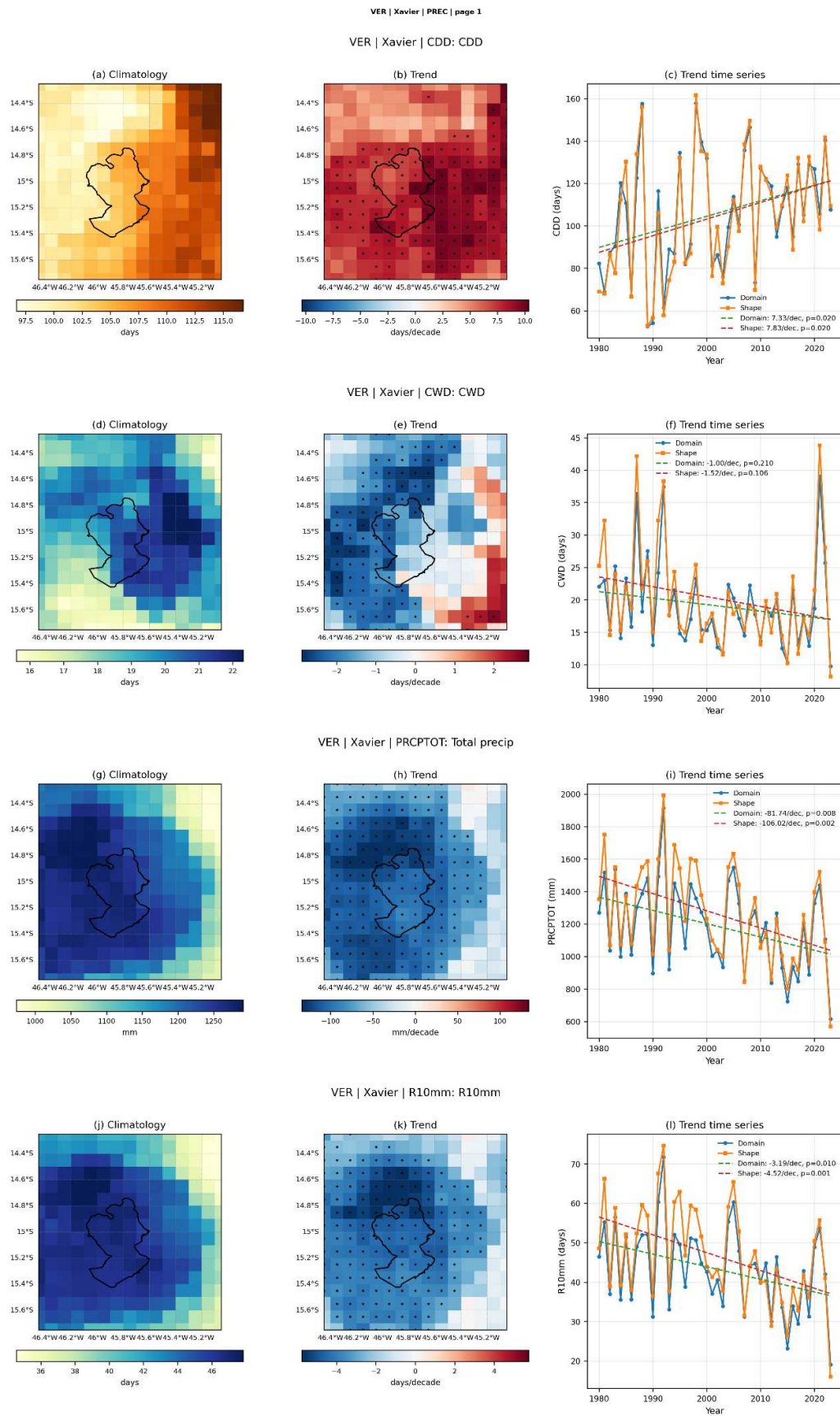
The precipitation climatology in the Grande Sertão Veredas National Park and its buffer zone is marked by a well-defined seasonal regime, characteristic of the Cerrado, yet it reveals an increasing vulnerability due to its location in the transition to the Semiarid biome. Both the Xavier gridded observational model (Fig. 6; Supplementary 7) and ERA5-Land (Supplementary 8, 9) converge in identifying a transitional climatic regime, although they present nuances in representing the severity of the phenomena.

The gridded dataset compiled by Xavier exhibits high spatial responsiveness to local climatological patterns, resolving precipitation totals and thermal gradients aligned with the complex topography of plateaus and *vereda* valleys. Conversely, the ERA5-Land reanalysis effectively captures long-term spatiotemporal trends, consistently estimating higher water deficit magnitudes across the study area.

The spatial distribution of the annual total volume (PRCPTOT) shows more significant accumulated totals in the central and southwestern portions of the domain (Fig. 6g; Supplementary 7g). However, trend analysis reveals a scenario of widespread and severe drying. The annual total precipitation index (PRCPTOT) indicates a drastic reduction across the entire domain, with magnitudes ranging from -81 mm per decade (Xavier) to -118 mm per decade (ERA5-Land). Throughout the analyzed period, this cumulative deficit approaches 400 mm, representing a considerable water loss for the maintenance of the *vereda* systems. This drying pattern is corroborated by the consistent increase in the Consecutive Dry Days (CDD) index, which grows between 7.0 and 9.7 days per decade, with a marked intensification in the southern portion of the park (Fig. 6b; Supplementary 8b).

The dysregulation of the rainfall regime is evidenced by the reduction in the frequency of moderate to heavy events. The R10mm and R20mm indices show declines of up to 5 days per decade, indicating that not only is there less total rainfall, but significant rainfall events are becoming less frequent. Additionally, the decrease in the 5-day maximum accumulated volume (RX5day) reduces infiltration capacity and aquifer recharge, which are essential for the permanence of the *buriti* palm swamps (*veredas*) that rely directly on the outcropping of the water table.

Fig. 6. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based on Xavier



This hydroclimatic vulnerability reaches a critical point when superimposed on Land Use and Land Cover (LULC) dynamics. Between 1985 and 2023, the interior of the GSVNP demonstrated remarkable resilience, maintaining approximately 99% of its natural formation intact (Fig. 3f). However, the buffer zone presents an opposite and alarming trajectory: natural vegetation receded from approximately 94% in 1985 to about 60% in 2023 (Fig. 3g), driven by the aggressive expansion of the agricultural sector.

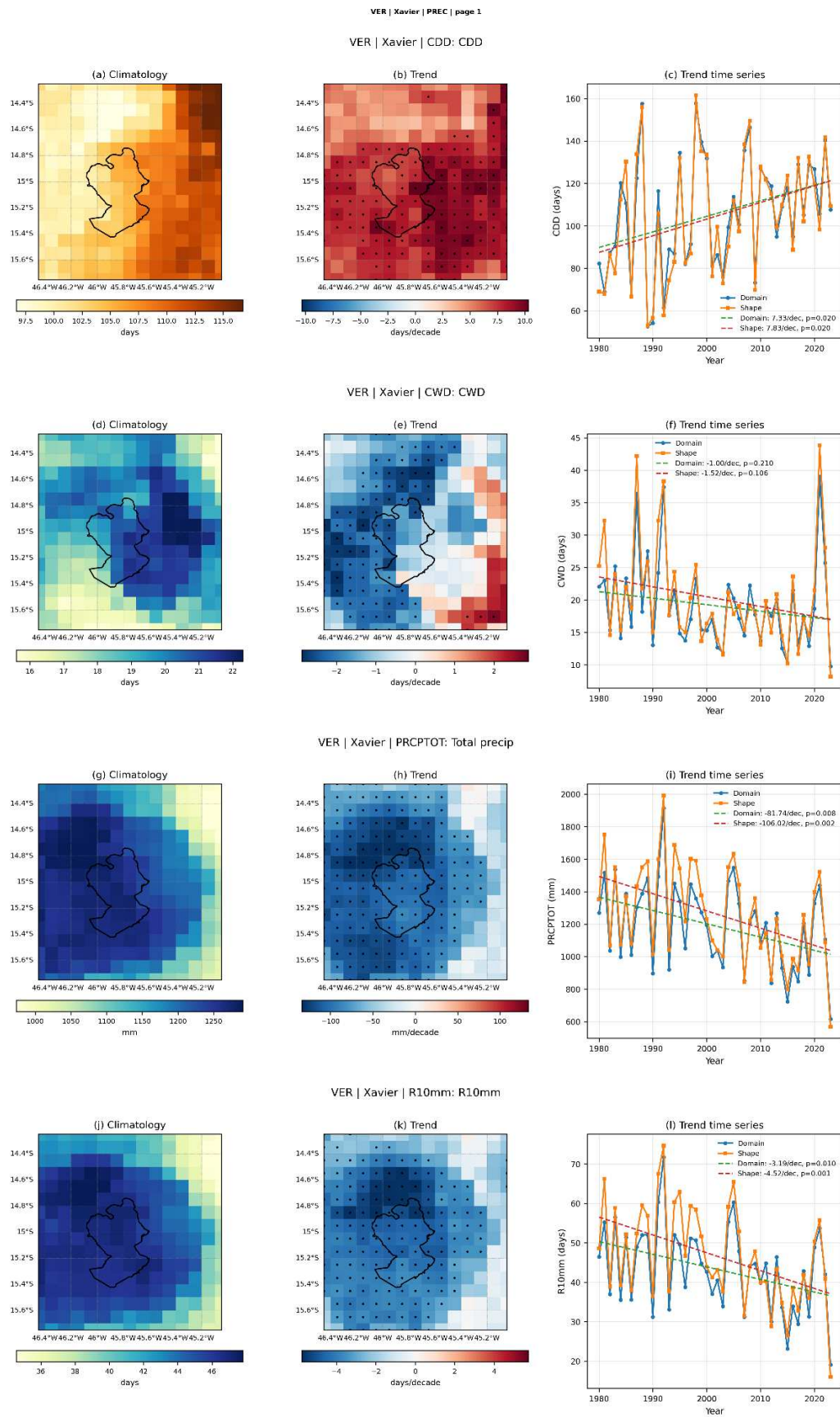
The massive conversion of native areas into pastures and mechanized monocultures in the buffer zone, visible especially in the eastern and southern portions, creates ecological isolation for the Federal Conservation Unit. The replacement of native vegetation with seasonal crops alters the regional water balance, reducing evapotranspiration and increasing surface runoff. This scenario amplifies the risk of forest fires and compromises agricultural productivity in the surrounding areas, creating a feedback loop where water scarcity threatens both biodiversity and the region's water and socioeconomic security.

Fig. 7 presents the temporal trends of extreme temperature indices in the GSVNP and its buffer zone, revealing intense, albeit dataset-dependent, warming patterns.

The analysis of temperature climatology in the GSVNP and its buffer zone reflects the transition between the Cerrado plateaus and the São Francisco depression. The Xavier gridded observational model (Fig. 7; Supplementary 10) demonstrates local thermal variations influenced by topography, highlighting the plateau areas as regional thermal regulators. However, trend analysis reveals a severe and accelerated warming process, surpassing in magnitude the patterns observed in other conservation units within the biome.

The Xavier dataset demonstrates a robust and statistically significant ($p < 0.05$) warming trend across all daily minimum (TNn, TNx) and maximum (TXn, TXx) temperature indices, with magnitudes ranging from $+0.36^{\circ}\text{C}$ to $+0.55^{\circ}\text{C}$ per decade (Fig. 7). On the other hand, the ERA5-Land reanalysis (Supplementary 11, 12) captures an even more pronounced intensification of maximum temperatures, with the highest daytime maximums (TXx) increasing by $+0.72^{\circ}\text{C}$ per decade. Although the models diverge regarding absolute minimum temperatures (TNn), both unequivocally point to a severe exacerbation of daytime heat.

Fig. 7. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based on Xavier



Frequency-based indices (TR20 and SU) reveal a critical expansion of thermal stress. The Tropical Nights index (TR20) exhibits alarming increments of 20 to 30 days per decade in the observational data. The Summer Days index (SU) confirms that prolonged heat conditions are becoming the regional norm, with ERA5-Land indicating an average increase of +18.5 days per decade ($p < 0.001$) (Supplementary 12). Consequently, the Diurnal Temperature Range (DTR) projects a highly significant positive trend (+0.61°C per decade in ERA5-Land), confirming that maximum temperatures are rising much faster than minimums.

This widening of the thermal amplitude constitutes a severe hydroclimatic forcing. The increase in maximums amplifies the atmospheric evaporative demand which, coupled with the previously identified rainfall deficit (PRCPTOT and RX5day), intensifies the stress on the shallow aquifers that sustain the *veredas*. In terms of Land Use and Land Cover, the contrast is significant: while the interior of the FCU preserves 99% of its natural formation (Fig. 3f), the buffer zone has undergone a retraction of native vegetation, falling from 94% to 60% (Fig. 3g).

The massive conversion of the surrounding landscape into agricultural areas exposes the park to climatic isolation. The replacement of deep-rooted vegetation with seasonal crops reduces evaporative cooling, exacerbating warming trends and threatening the irreversible desiccation of the *veredas'* organic soils. This scenario compromises agricultural viability in the buffer zone and regional water security, demanding urgent climate adaptation measures.

3.3 Effects of land use and land cover on temperature and precipitation patterns and potential impacts on extreme events in the study areas

The conversion of native vegetation into pasture and cropland within the Chapada Diamantina and Grande Sertão Veredas national parks transcends mere landscape alteration, acting as a significant local climate forcing. The disruption of the water balance, evidenced by reduced evapotranspiration, correlates directly with intensified dry spells (*veranicos*) and rising maximum temperatures. These patterns indicate heightened vulnerability to extreme events, such as multi-year droughts and high-magnitude wildfires, jeopardizing ecosystem resilience.

The ecological integrity of the PNCD faces increasing vulnerability due to the convergence of anthropogenic pressure and adverse climate trends. Temporal analysis (1985-2023) reveals persistent native vegetation loss within the buffer zone, driven by agricultural expansion (Fig. 3), which compromises the connectivity of ecosystems dependent on surface runoff. This pressure is exacerbated by regional warming, evidenced by significant increases in temperature extremes (TXx, TNx) and the frequency of tropical nights (TR20) and hot days

(SU) (Fig. 8). Simultaneously, while total precipitation (PRCPTOT) shows high variability, the increase in rainfall intensity (RX1Day, RX5Day) and the frequency of heavy precipitation days (R10mm) (Fig. 7) suggest a rise in erosive energy. In soils already impacted by agricultural conversion, this dynamic accelerates sediment delivery to valley floors, leading to the siltation of water bodies and reduced water detention times.

Comparative analysis reveals analogous patterns of ecosystem transition and hydric vulnerability, conditioned by distinct geomorphological domains. In the PNCD, environmental heterogeneity ranges from high-altitude *campos rupestres* (rupestrian grasslands) to seasonal forests and the Marimbus floodplain. The *campos rupestres* exhibit limited resilience to prolonged droughts due to the low water-retention capacity of the substrate, making endemic flora dependent on regular rainfall and fog interception.

Rising global temperatures have reduced fog frequency, intensified hydric stress and triggered the loss of specialized niches (Fernandes et al., 2021). Conversely, slope degradation compromises self-regulation processes, as vegetation removal alters infiltration rates and water detention times.

This instability triggers a cascade effect, degrading the physical and geochemical integrity of the plains through accelerated erosion under extreme rainfall scenarios (Souza et al., 2020). Water extraction for irrigation in shallow soil areas further reduces river baseflow. During prolonged droughts, ecosystems fail to maintain minimum functions, leading to the desiccation of formerly perennial wetlands (Althoff & Rodrigues, 2019). High fuel loads and low soil moisture convert controlled burns into catastrophic wildfires, altering soil chemical composition and biological viability (Durigan et al., 2022).

Recent studies corroborate that intensified groundwater use for irrigation has caused baseflow declines exceeding 50% in Cerrado basins during severe droughts (Althoff & Rodrigues, 2019). Hydrological modeling indicates that water extraction in shallow soils accelerates the depletion of superficial aquifers, eliminating connectivity between the water table and wetlands.

Consequently, a critical transition from perennial to intermittent hydric regimes is observed. Historically resilient areas lose biotic maintenance capacity, resulting in the irreversible desiccation of peatlands and the loss of organic carbon stocks, pushing these systems beyond their ecological recovery threshold (Durigan et al., 2022). In the Marimbus Pantanal, biotic stability relies on lateral fluvial connectivity, thus, drainage or damming of tributaries for irrigation compromises the floodplain's functional integrity. In contrast, *veredas*

resilience is predominantly vertical, depending on water table stability. In both systems, the conversion of land use in buffer zones limits ecological connectivity (Fig. 3 and 4).

The suppression of native vegetation and soil compaction in recharge zones reduce infiltration rates, lowering the water table upon which baseflow depends (Sales et al., 2023). Furthermore, nutrient and pesticide runoff alters the pH and oligotrophic nature of histosols (peaty soils), destabilizing nutrient cycling (Oliveira et al., 2024). Reduced soil moisture compromises *Mauritia flexuosa* recruitment, leading to biodiversity loss and xerophytic encroachment, characterized as savannization (Nunes et al., 2022).

The synergy between organic matter oxidation, thermal stress, and land degradation may drive these conservation units toward an ecological tipping point, where permanent desiccation overcomes biotic self-regeneration capacity (Pivello et al., 2021; Sales et al., 2023).

Research on the local fauna reveals the presence of endemic species, underscoring the importance of the Wetlands for biodiversity conservation. Among the identified species are the fish *Moenkhausia diamantina* (Benine et al., 2007), the armored catfish *Parotocinclus adamanteus* (Pereira et al., 2019), and the lambari *Astyanax lorién* (Zanata et al., 2019). The occurrence of a subfamily of *Copionodontinae* and other specimens exhibiting characteristics distinct from those found in other regions further reinforces the singular evolutionary nature of the local ecosystem and the critical need for its preservation.

The dominant vegetation in the PNCD is classified as “Montane Vegetational Refuge” (MapBiomias, 2024). This category comprises shrubland and herbaceous formations typical of montane environments, including mountain ranges, plateaus, and highland plains. The predominant physiognomies are “Montane Shrubland and Grassland” and “High Montane Shrubland and Grassland” which differ in altitude and specific vegetative characteristics.

The “Montane Vegetational Refuge” stands out for its ecological significance due to the high degree of endemism in both fauna and flora, in addition to its remarkable landscape value. Highland grasslands, in particular, play a crucial role in regulating the hydrological cycle by contributing to aquifer recharge and controlling spring discharge in mountainous regions.

Lowland areas with hydromorphic soil contribute to carbon sequestration, acting as significant terrestrial carbon reservoirs. Guedes and Shaffer (2009) emphasize that environmental degradation of these habitats caused by anthropogenic activities may lead to the release of stored soil carbon, thereby intensifying the greenhouse effect and climate change.

The vulnerability of high-altitude grasslands to anthropogenic pressure is well documented. The vegetation structure across the park shows physiognomic variation: (i) in the northern part of the conservation unit, forested savanna predominates; (ii) in the central portion,

certain areas feature wooded savanna, with a notable absence of riparian forest; and (iii) the northwestern and southwestern regions exhibit pioneer formations with fluvial or lacustrine influence, characterized mainly by shrub vegetation (Oliveira et al., 2024).

The establishment of the National Park has driven the development of ecotourism, integrating former mining areas and landscapes altered by mining activities into the sustainable tourism dynamic. However, the region faces ongoing pressure from prospecting and the expansion of mining operations near the boundaries of the PNCD (Oliveira identify mining activity as one of the main sources of conflict between environmental conservation and economic development in the region).

The municipalities of Lençóis, Abaíra, and Seabra record socioenvironmental conflicts stemming from mining activities, as detailed by data from the National Mining Agency (ANM). Quilombola communities are among the groups most affected by these conflicts, alongside riparian communities and Indigenous Peoples (Antonino et al., 2022).

Anthropogenic activities represent one of the main drivers of environmental degradation in the PNCD. Oliveira Junior and Santos (2025) observed that the expansion of human settlement in the region is predominantly occurring within the park's buffer zone, leading to the suppression of natural areas and their conversion to agricultural use.

The Caatinga biome, an endemic and exclusive plant formation of the Brazilian territory, is characterized by its high biological relevance but figures among the least protected biomes in the country. Environmental degradation in the Caatinga, evidenced by the advancement of desertification and the intensification of soil degradation in forest remnants, compromises the ecological integrity and resilience of this biome. This results in biodiversity loss even within Conservation Units (Freire et al., 2018) and imposes critical challenges upon protected area managing agencies.

The Grande Sertão Veredas National Park, with its characteristic landscape of *veredas* and chapadões (high plateaus) of the Cerrado, offers a suitable habitat for hiking and shelters several endangered species, such as the maned wolf (*Chrysocyon brachyurus*), hyacinth macaw (*Anodorhynchus hyacinthinus*), marsh deer (*Blastocerus dichotomus*), red-legged seriema (*Cariama cristata*), greater rhea (*Rhea americana*), giant armadillo (*Priodontes maximus*), three-banded armadillo (*Tolypeutes tricinctus*), bare-faced curassow (*Crax fasciolata*), and cougar (*Puma concolor*) (Instituto Socioambiental, 2024). Within the context of the Cerrado biome, this park represents a territory of great significance not only due to its scenic beauty but also for the ecological importance of its biodiversity, water resources, and associated cultural aspects.

The park plays a crucial role in the conservation of representative samples of the Cerrado biome, including vegetation formations such as gallery forests, palm swamps (*veredas*), shrublands (*carrascos*), typical savannas, and ecotones, all established over the sandy soils of the Espinhaço Range of the São Francisco River Basin.

The area's importance for the conservation of representative samples of the Cerrado biome is highlighted, including vegetation formations such as gallery forests (*matas*), palm swamps (*veredas*), shrublands (*carrascos*), savannas (*cerrados*), and associated ecotones, established on sandy soils of the Espigão Mestre of the São Francisco River (Ávila et al., 2021).

The PNGSV constitutes a refuge of high relevance for Brazilian biodiversity, given its location in an ecotonal transition zone. Research conducted within the Park underscores its importance in maintaining sensitive and endemic taxa. For example, research on opilionid fauna (Arachnida) in the Cerrado (Rubim et al., 2024) evidences the urgent need for conservation of protected areas like the PNGSV, particularly in the face of continuous habitat loss that threatens wild fauna.

Additionally, the expressive richness and composition of social wasp communities (Hymenoptera: Vespidae) observed in the PNGSV, when compared to other surveys in the Cerrado, reinforce the unit's role in the conservation not only of taxonomic diversity but also of the ecosystem services provided by these insects (Francisco et al., 2023).

The phytophysiognomic variability, cited by Sartori Neto et al. (2001), is a key factor that provides greater diversity of ecological niches for these taxa. Furthermore, the reptile taxocenosis demonstrates the area's uniqueness, recording the occurrence of endemic Caatinga lizard species with distribution extending into the Cerrado (Recoder & Nogueira, 2007).

In particular, the Carrasco phytophysiognomy harbors lizard species with distribution restricted to the region, which evidences the critical importance of conserving this vegetation formation for the maintenance of regional endemism. The conservation of faunal and floristic diversity, supported by these data, reinforces the demand for public investment in the maintenance and sustainable management of the PNGSV, an imperative for ecosystem stability and the maintenance of regional natural resources.

4 Final considerations

The results presented in this study highlight the complex and interdependent relationships among climate change, extreme events, and ecosystem resilience across Brazilian conservation units. Evidence from both the Chapada Diamantina and Grande Sertão Veredas National Parks indicates a coherent shift toward warmer and increasingly water-limited conditions, characterized by rising temperatures, declining precipitation, and the intensification of hydroclimatic extremes.

These changes are not isolated. Instead, they reflect a broader reorganization of regional climate regimes, where reduced rainfall frequency, longer dry spells, and enhanced thermal stress act synergistically to amplify ecosystem vulnerability. In this context, conservation units, traditionally viewed as buffers against environmental degradation, are themselves becoming increasingly exposed to external climatic and anthropogenic pressures.

The resilience of these systems is therefore not solely determined by intrinsic ecological properties, such as biodiversity and ecosystem structure, but also by external drivers, including land-use change, fire regimes, and large-scale atmospheric variability. The convergence of warming and drying trends suggests a transition toward a water-limited regime, in which evapotranspiration increasingly exceeds precipitation inputs, constraining ecosystem recovery and stability.

Importantly, the findings underscore that resilience is neither static nor guaranteed. In semi-arid and ecotonal regions, such as those analyzed here, the intensification of aridization processes may push ecosystems beyond their adaptive thresholds, potentially leading to biome shifts, biodiversity loss, and degradation of ecosystem services.

These results have direct implications for environmental management and policy. Strengthening the resilience of conservation units requires an integrated and forward-looking approach that combines climate monitoring, land-use regulation, ecological restoration, and adaptive management strategies. In particular, the incorporation of climate projections and extreme event dynamics into conservation planning is essential to anticipate future risks and reduce vulnerability.

Moreover, the effectiveness of adaptation and mitigation strategies depends on interdisciplinary collaboration and the integration of scientific knowledge with local and traditional practices. Conservation units must therefore be understood not only as protected spaces, but as dynamic socioecological systems embedded within broader climatic and human landscapes.

Ultimately, this study reinforces the strategic role of protected areas as key components of climate change adaptation and mitigation. However, their capacity to fulfill this role will depend on the extent to which management practices evolve to address the accelerating pace of environmental change. Ensuring the long-term stability of these ecosystems is not only a matter of biodiversity conservation, but a critical requirement for sustaining water resources, food security, and climate regulation in vulnerable regions.

5 Acknowledgements

The authors want to thank the funding support of FAPEMIG funding APQ-02107-22. EC, FJ, JR designed the study, performed data processing, and plotting; EG wrote large portion of the manuscript. FJ and JR contributed with the code.

The authors want to thank Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001, for the doctoral scholarship awarded to the first author.

This research was supported by the National Council for Scientific and Technological Development – CNPq (Grants nº 140741/2020-8, 404451/2024-1 and 406737/2025-8).

6 References

- Althoff, D., & Rodrigues, L. N. (2019). The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. *Irriga*, 1(1), 56-61. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v1n1p56-61>
- Antonino, Z. A., Sousa, V. S. R., & Germani, G. I. (2022). Mapeamento dos conflitos da mineração na Bahia no contexto do neoextrativismo. *Ambientes*, 4(1), 201-234. <https://doi.org/10.48075/amb.v4i1.28230>
- Ávila, M. A., Mota, N. M., Souza, S. R., Santos, R. M., & Nunes, Y. R. F. (2021). Diversity and structure of natural regeneration in Swamp Forests in Southeastern Brazil. *Floresta Ambient.*, 28(1), e20190110, 2-7. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2019-0110>
- Avila-Diaz, A., Benezoli, V., Justino, F., Torres, R., & Wilson, A. (2020). Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dyn.*, 55(5), 1403-1426. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- Benine, R. C., Castro, R. M. C., & Santos, A. C. A. (2007). A new *Moenkhausia* Eigenmann, 1903 (Ostariophysi: Characiformes) from Chapada Diamantina, Rio Paraguaçu basin, Bahia, Northeastern Brazil. *Neotrop. Ichthyol.*, 5(3), 259-262. <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/7ba7125e-8eaf-4f91-91d4-77d793a2cf70/content>

- Bisong, E. (2019). Google collaboratory. In *Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform* (pp. 59-64). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4842-4470-8>
- Carpenedo, C. B., & Ambrizzi, T. (2020). Anticiclone subtropical do Atlântico Sul associado ao modo anular sul e impactos climáticos no Brasil. *Rev. Bras. Meteorol.*, 35(4), 605-613. <https://doi.org/10.1590/0102-77863540066>
- Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Silva, M. G. A. J., & Dias, M. A. F. S. (2009). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo, SP: Oficina de Textos.
- Clemente, S. S., Oliveira Júnior, J. F., & Louzada, M. A. P. (2017). Focos de calor na Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro. *Rev. Bras. Meteorol.*, 32(4), 669-677. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324014>
- Damasceno, G., & Fidelis, A. (2020). Abundance of invasive grasses is dependent on fire regime and climatic conditions in tropical savannas. *J. Environ. Manag.*, 271, 111016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111016>
- Expert Team on Climate Change Detection and Indices. (2024). *Climate change indices: Definitions and methodology*. http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- Fernandes, A. F., Oki, Y., Fernandes, G.W., & Moreira, B. (2021). The effect of fire on seed germination of campo rupestre species in the South American Cerrado. *Plant. Ecol.*, 222, 45-55. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01086-1>
- Francisco, S. C. C., Gouvêa, T. P., Rubim, L. G. T., Jacques, G. C., & Souza, M. M. (2023). Social wasps (Vespidae: Polistinae) in Cerrado and Caatinga conservation units, Minas Gerais, Brazil. *Biota Neotrop.*, 23(4), e20231563. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2023-1563>
- Freire, N. C. F., Moura, D. C., Silva, J. B., Moura, A. S. S., Melo, J. I. M., & Pacheco, A. P. (2018). *Atlas das caatingas: o único bioma exclusivamente brasileiro*. Recife: Fundação Joaquim Nabuco. <https://ecocidio.com.br/atlas-das-caatingas-livro-completo-e-atualizado-sobre-o-bioma-caatinga/>
- Durigan, G., Munhoz, C. B., Zakia, M. J. B., Oliveira, R. S., Natashi, A. L., Pilon, R. S. T. V., Walter, B. M. T., Honda, E. A., & Pott, A. (2022). Cerrado wetlands: multiple ecosystems deserving legal protection as a unique and irreplaceable treasure. *Pecon*, 20(3), 185-196. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2022.06.002>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guedes, F. B., & Shaffer, W. B. (2009). *Análise e sugestão de emendas à proposta de resolução sobre parâmetros básicos para identificação e análise de vegetação primária e dos estágios sucessionais da vegetação secundária nos campos de altitude associados ou abrangidos pela Mata Atlântica*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. (2003). *Plano de manejo: Parque Nacional Grande Sertão Veredas*. Brasília: IBAMA.

https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/cerrado/lista-de-ucs/parna-grande-sertao-veredas/arquivos/parna_grande_sertao_veredasplanodemanejo.pdf

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. (2023). *Plano de Manejo Integrado do Fogo: Parque Nacional Grande Sertão Veredas 2024-2027*. Brasília: ICMBio.

https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/planos-de-manejo-integrado-do-fogo/PMIF_PNGSV_FINAL_12_12_23_2_.pdf

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. (2024, 22 de maio). *Informações sobre visitação – Parna da Chapada Diamantina*. <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/caatinga/lista-de-ucs/parna-da-chapada-da-diamantina/informacoes-sobre-visitacao-parna-da-chapada-da-diamantina>

Instituto Socioambiental. (2024). *Unidades de Conservação do Brasil: Parque Nacional da Chapada Diamantina*. <https://uc.socioambiental.org/arp/978>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.

<https://www.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. New York, NY: Charles Griffin e Company.

Latrubesse, E. M., Arima, E., Ferreira, M. E., Nogueira, S. H., Wittmann, F., Dias, M. S., ..., & Bayer, M. (2019). Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. *Conserv. Sci. Pract.*, 1(9), e77. <https://doi.org/10.1111/csp2.77>

Leite, C. C. S. S., Santos, S. M. B., Rocha, W. J. S. F., Silva, A. B., & Baptista, G. M. M. (2017). Análise dos incêndios ocorridos no Parque Nacional da Chapada Diamantina-Bahia em 2008 e 2015 com suporte em índices espectrais de vegetação. *Rev. Bras. Cartografia*, 69(6), 1127-1141.

<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44315/23397>

Leite, C. C. S. S., Rocha, W. J. S. F., Anderson, L. O., Santos, S. M. B., Vivanco, T. A., & San-Miguel, J. (2019). The propagation of fire in the National Park of the Chapada Diamantina in 2008: an analysis using the influence of landscape units. *Biodiv. Bras. Rev. Cient.*, 9(1), 251. <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v9i1.1334>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://www.jstor.org/stable/1907187?origin=crossref>

MapBiomias. (2024, agosto). *Cobertura e uso da terra*.

[https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-15.127303%2C-51.419045%2C3&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams\[terri](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura?activeBaseMap=9&layersOpacity=100&activeModule=coverage&activeModuleContent=coverage%3Acoverage_main&activeYear=2022&mapPosition=-15.127303%2C-51.419045%2C3&timelineLimitsRange=1985%2C2022&baseParams[terri)

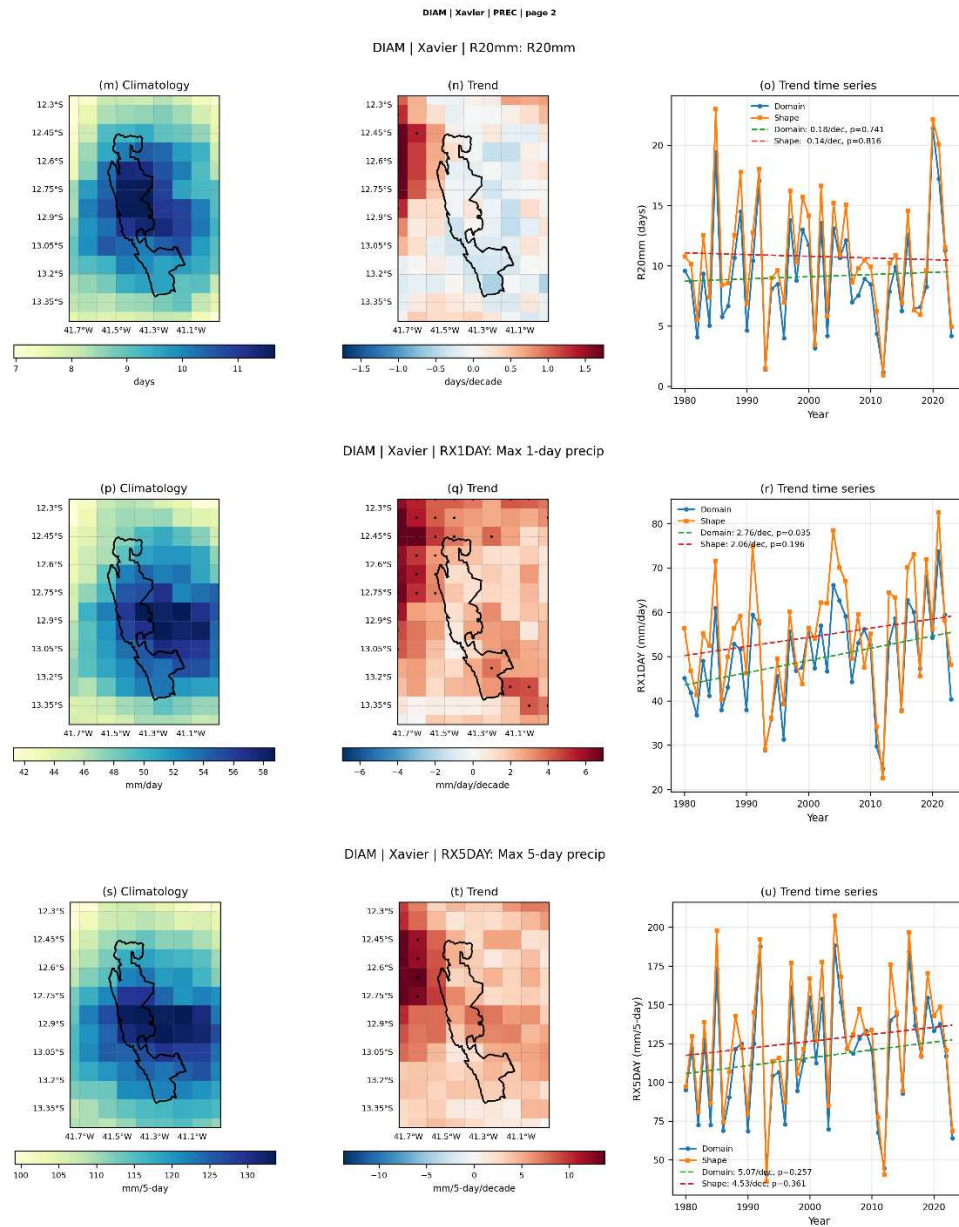
- Marengo, J. A., & Souza Junior, C. (2018). *Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia*. São Paulo, SP: USP. https://educacao.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2023/12/Relatorio_Mudancas_Climaticas-Amazonia.pdf
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Leal, K. R., Broedel, E., Seluchi, M. E., ..., & Moraes, M. A. (2021). Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2020: Characterization, causes, and impacts. *Fron. Water*, 3, 617586. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>
- Nobre, C. A., Sampaio, G., Salazar, L. S., Castanho, A. D., Cuadra, J. P., Friedlingstein, P., ... & Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *PNAS*, 113(39), 10759-10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- Nunes, Y. R. F., Souza, C. S., Azevedo, I. F. P., Oliveira, O. S., Frazão, L. A., Fonseca, R. S., ..., & Neves, W. V. (2022). Vegetation structure and edaphic factors in veredas reflect different conservation status in these threatened areas. *Forest Ecosystems*, 9, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100036>
- Oliveira, L. R. D., Frazão, L. A., Silva, S. C. O., Araújo, W. S., Nunes, Y. R. F., Fernandes, V. M., & Veloso, D. M. (2024). Nutrient cycling and soil quality in threatened veredas in two Protected Areas of the Brazilian Cerrado. *Nat. Conserv. Res.*, 9(3), 34-46. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2024.018>
- Oliveira Junior, O. C., & Santos, R. L. (2025). As geotecnologias como subsídio a análise geossistêmica no Parque Nacional da Chapada Diamantina (PNCD) – BA. *Revista GeoNordeste*, 36(1), 205-220. <https://doi.org/10.33360/RGN.2318-2695.2025.i1.p.205-220>
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rüther, R., ..., & Souza, J. G. (2019). *Atlas brasileiro de energia solar* (2. ed.). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html
- Pinho, P. F., Anjos, L. J. S., Rodrigues-Filho, S., Santos, D. V., & Toledo, P. M. (2020). Projections of Brazilian biomes resilience and socio-environmental risks to climate change. *Sustainability in Debate*, 11(3), 225-241. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33918>
- Pivello, V. R., Vieira, I., Christianini, A. V., Ribeiro, D. B., Menezes, L. S., Berlinck, C. N., ..., & Overbeck, G. E. (2021). Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Pecon*, 19(3), 233-255. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>
- Quadro, M. F. L., Dias, M. A. F. S., Herdies, D. L., & Gonçalves, L. G. G. (2012). Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. *Rev. Bras. Meteorol.*, 27, 152-162. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200004>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P., & Ambrizzi, T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Rev. Bras. Meteorol.*, 25(2), 413-445. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

- Recoder, R. S., & Nogueira, C. (2007). Composição e diversidade de répteis Squamata na região sul do Parque Nacional Grande Sertão Veredas, Brasil Central. *Biota Neotrop.*, 7(3), 267-278. <https://www.biotaneotropica.org.br/BN/article/view/356>
- Regoto, P., Dereczynski, C., Chou, S. C., & Bazzanella, A. C. (2021). Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *Int. J. Clim.*, 41(11), 5125-5142. <https://doi.org/10.1002/joc.7119>
- Rubim, L. G. T., Renne, D. G. S., Padua, T. H. R., Gouvea, T. P. G., Vilela, D. S., Jacques, G. C., ..., & Souza, M. M. (2024). Fauna de opiliões (Arachnida) em uma Unidade de Conservação no Cerrado, Parque Nacional Grande Sertão Veredas, Brasil. *Heringeriana*, 18(1), e918035. <https://doi.org/10.17648/heringeriana.v18i1.918035>
- Sales, G. B., Frazão, L. A., Fernandes, L. A., Oliveira, J. C., & Veloso, M. D. M. (2023). Efeito da degradação sobre os atributos do solo em ecossistemas de veredas no cerrado de Minas Gerais. *Pesq. Flor. Bras.*, 43, e202102190. <https://doi.org/10.4336/2023.pfb.43e202102190>
- Sartori Neto, A., Brites, R. S., Soares, V. P., & Ribeiro, J. C. (2001). *Subsídios para elaboração do plano de manejo do Parque Grande Sertão Veredas por meio de um Sistema de Informações Geográficas* [Sessão Técnica Oral]. Trabalho apresentado no X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz Iguaçu, 2001. p. 493-502.
- Silva, G. C., & Nascimento, D. T. F. (2024). Tendências de mudanças climáticas e eventos extremos de temperatura e precipitação em Goiás e no Distrito Federal (1980 a 2020). *Rev. Científica ANAP Brasil*, 17(43), 115-129. <https://doi.org/10.17271/19843240174320245131>
- Silva, C. R. M., Lima, D. S.V. R., Farias, I. F., Oliveira, L. V. C., & Fontenele, R. E. S. (2020). Are visitors willing to pay for a green park? A study in a Brazilian Ecological Park. *Int. J. Soc. Ecol. Sustain. Dev.*, 11(3), 1-15. <https://www.doi.org/10.4018/IJSESD.2020070101>
- Souza, C. M., Shimbo, J. Z., Rosa, M. R., Parente, L. L., Alencar, A. A., Rudorff, B. F. T., ..., & Azevedo, T. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735. <https://www.doi.org/10.3390/rs12172735>
- Tank, A. M. G. K., Zwiers, F. W., & Zhang, X. (2009). *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. (Climate Data and Monitoring - WCDMP, 72).
- Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
- World Meteorological Organization. (2024, 12 January). *WMO confirms that 2023 smashes global temperature record*. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>
- Xavier, A. C. (2022). *Brazilian daily weather gridded data (BR-DWGD)*. <https://sites.google.com/site/alexandrecaandidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data?authuser=0>

- Zanata, A. M., Burger, R., Vita, G., & Camelier, P. (2019). A new species of *Astyanax* (Characiformes: Characidae) from the rio de Contas basin, Bahia, Brazil. *Neotrop. Ichthyol.*, 17, n. 3, e190061, 2019. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20190061>
- Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., & Rammig, A. (2017). Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6182-6190. <https://doi.org/10.1002/2017GL072955>
- Zhai, P., Zhou, B., & Chen, Y. (2023). Changes in climate extremes under global warming. *J. Meteor. Res.*, 37(4), 461-475. <https://doi.org/10.1007/s13351-023-3058-2>
- Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, B. J. J. M., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A. J., ..., & Zhang, X. (2018). Future changes in compound issues and events. *Nat. Clim. Change*, 8(6), 469-477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>

7 Supplementary material

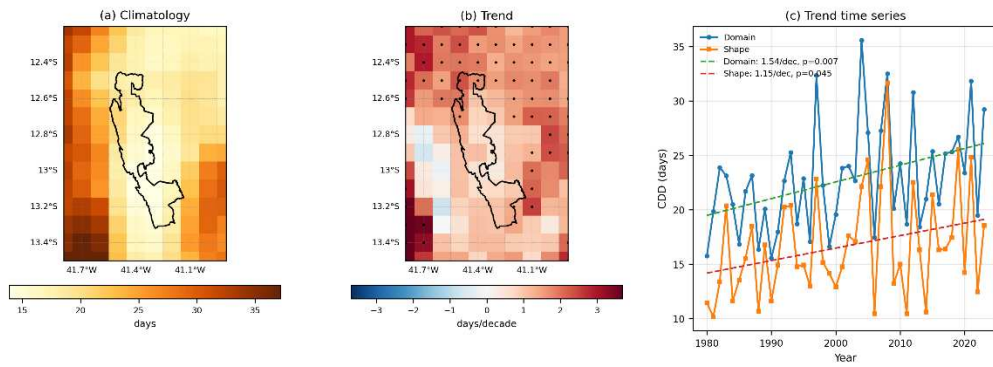
Supplementary 1. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based Xavier



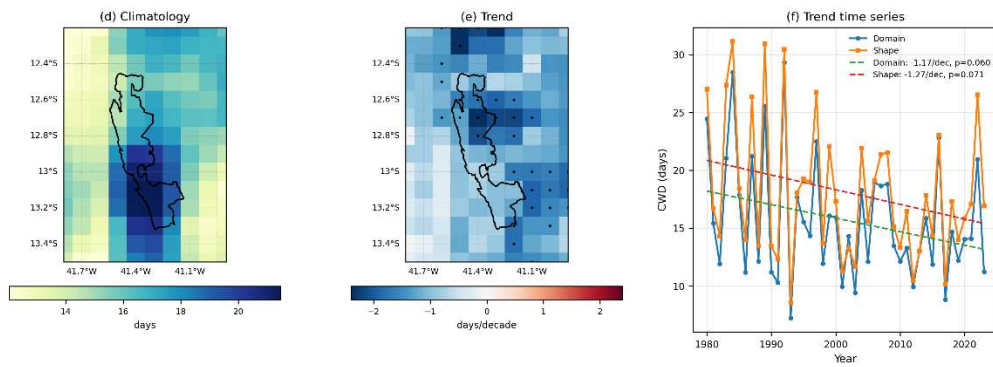
Supplementary 2. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based ERA

DIAM | ERA | PREC | page 1

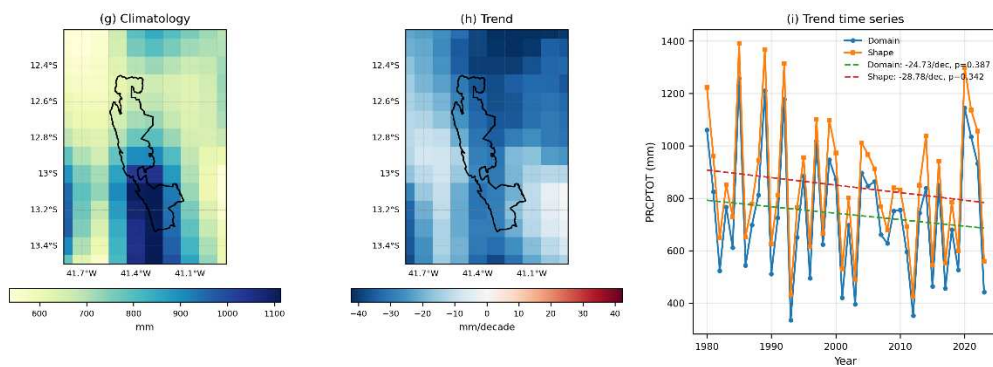
DIAM | ERA | CDD: CDD



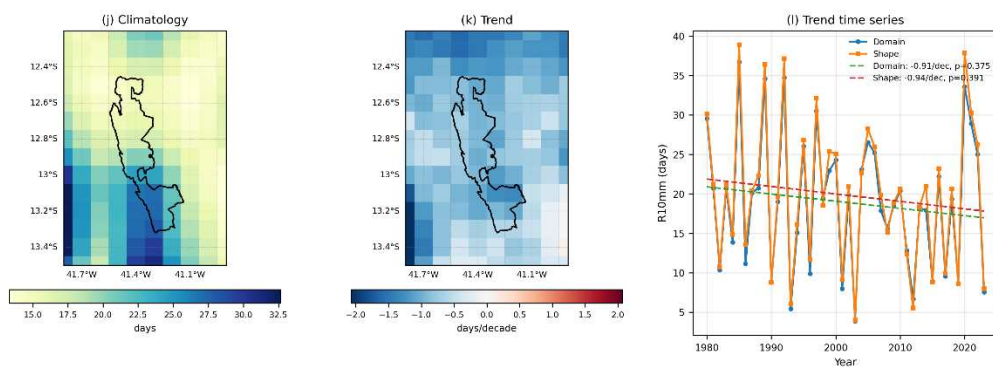
DIAM | ERA | CWD: CWD



DIAM | ERA | PRCPTOT: Total precip



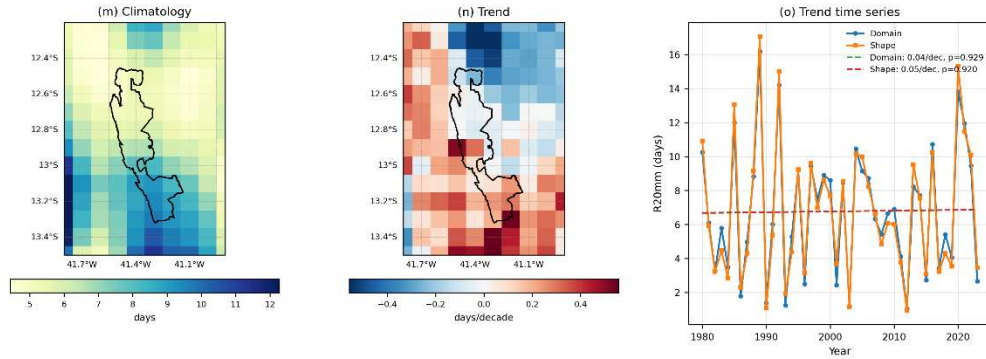
DIAM | ERA | R10mm: R10mm



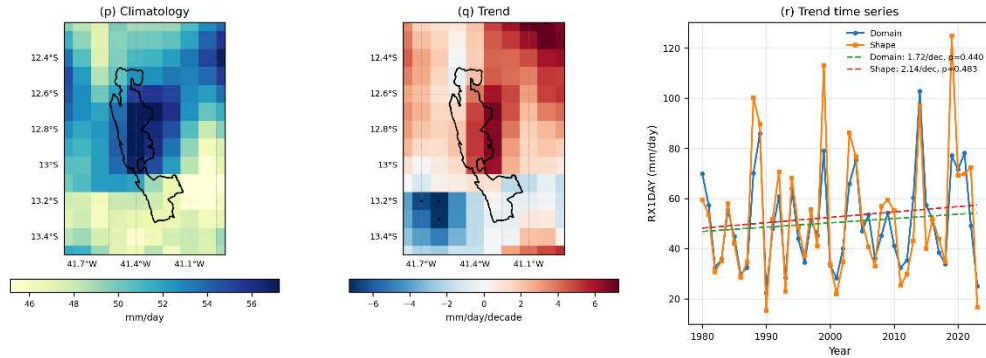
Supplementary 3. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based ERA

DIAM | ERA | PREC | page 2

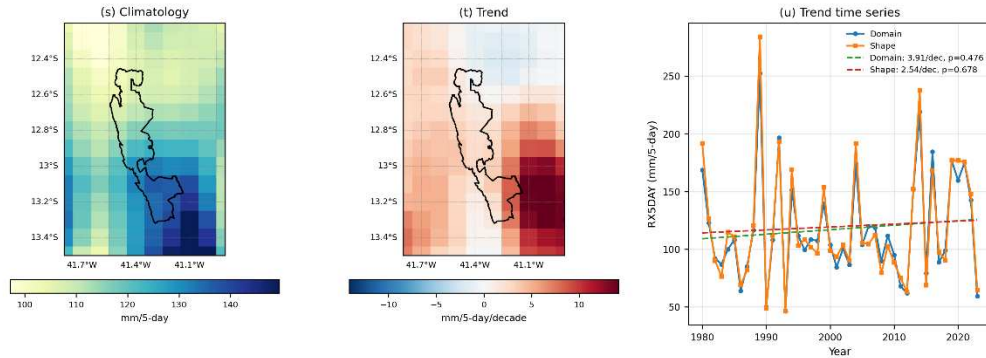
DIAM | ERA | R20mm: R20mm



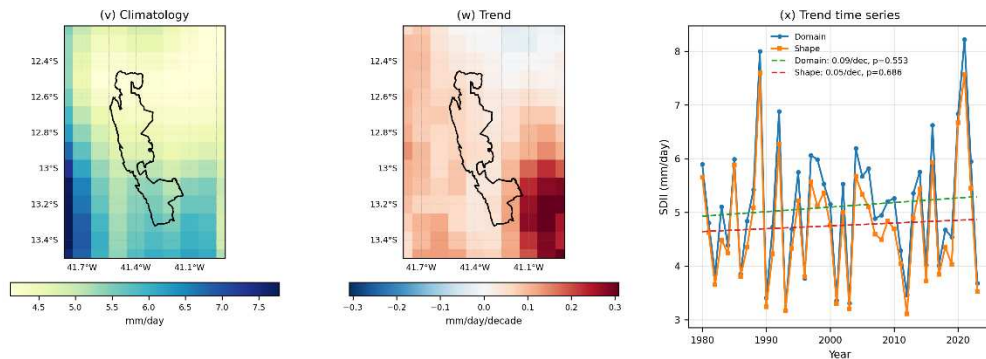
DIAM | ERA | RX1DAY: Max 1-day precip



DIAM | ERA | RX5DAY: Max 5-day precip



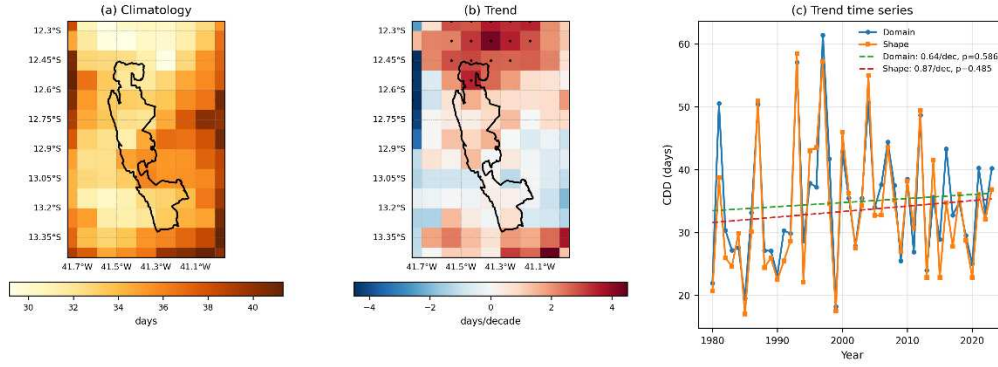
DIAM | ERA | SDII: SDII



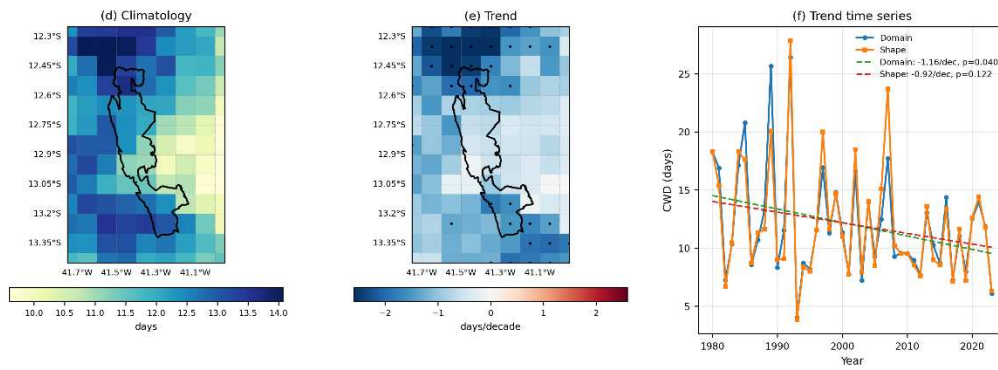
Supplementary 4. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based Xavier

DIAM | Xavier | PREC | page 1

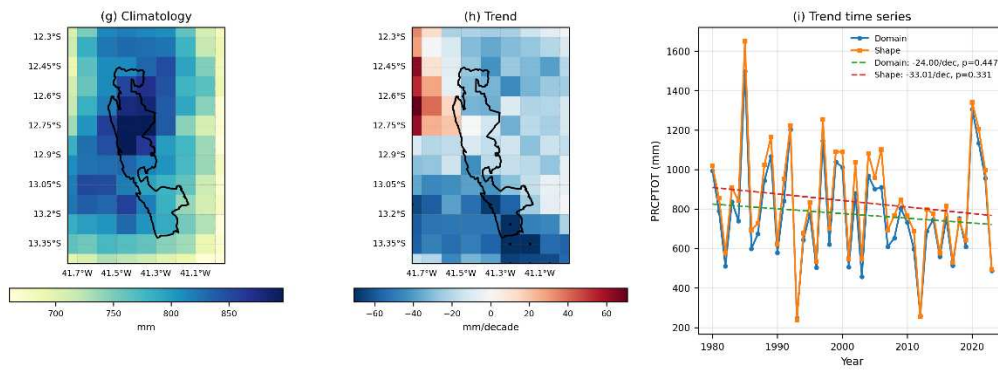
DIAM | Xavier | CDD: CDD



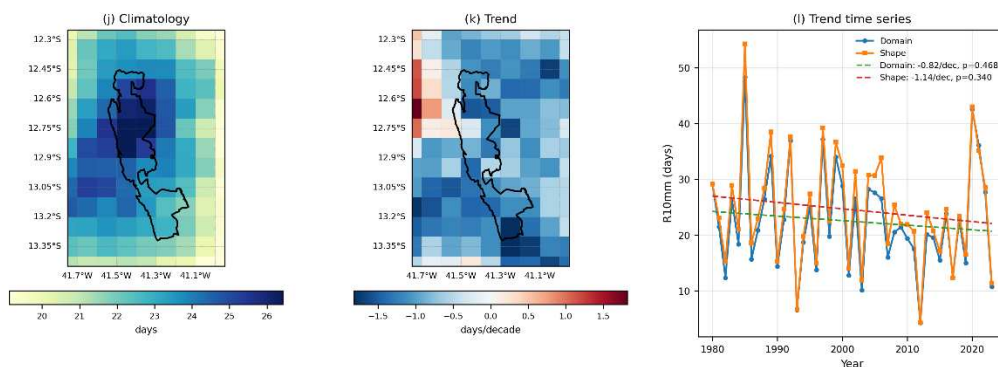
DIAM | Xavier | CWD: CWD



DIAM | Xavier | PRCPTOT: Total precip



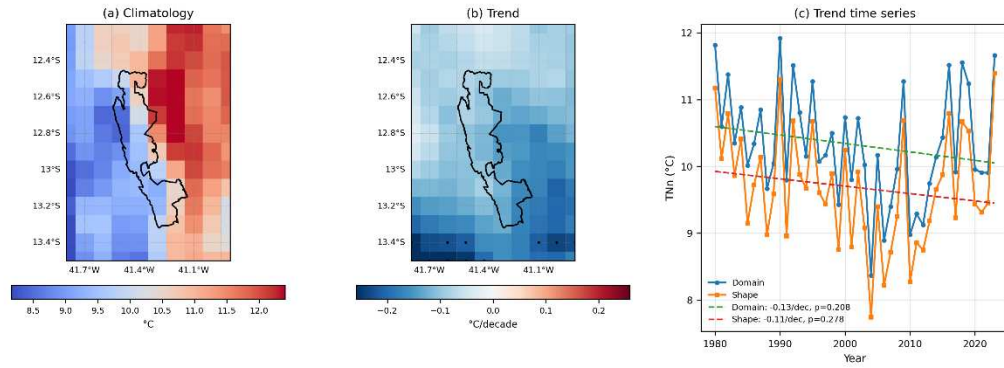
DIAM | Xavier | R10mm: R10mm



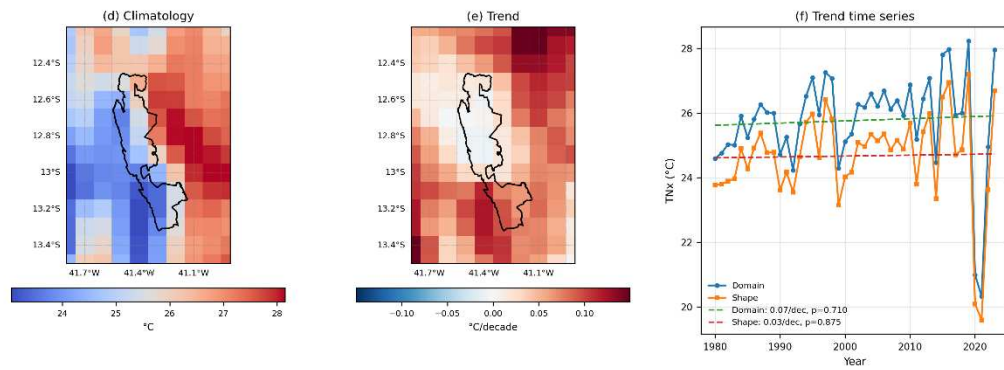
Supplementary 5. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based ERA

DIAM | ERA | TEMP | page 1

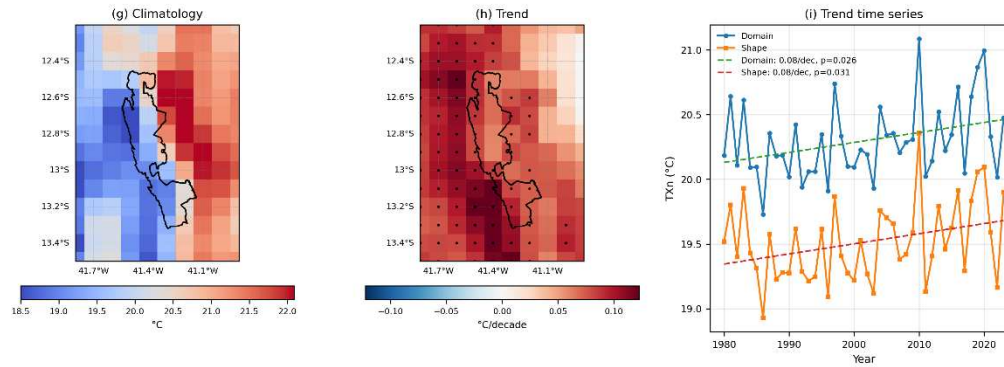
DIAM | ERA | TNn: Min Tmin



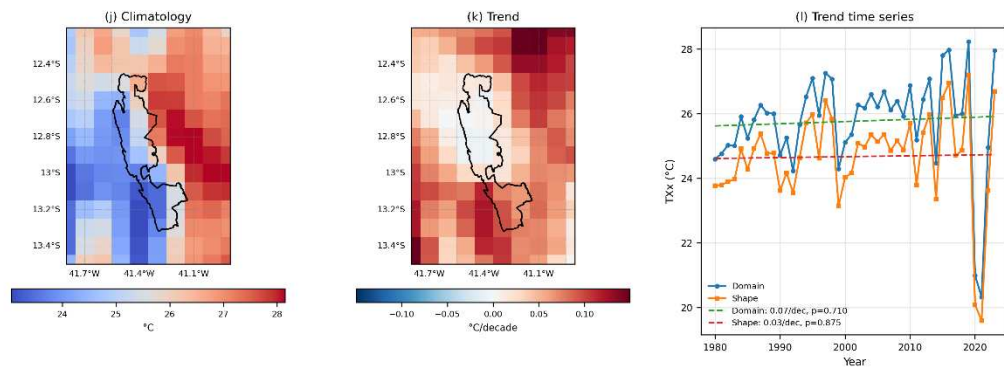
DIAM | ERA | TNx: Max Tmin



DIAM | ERA | TXn: Min Tmax



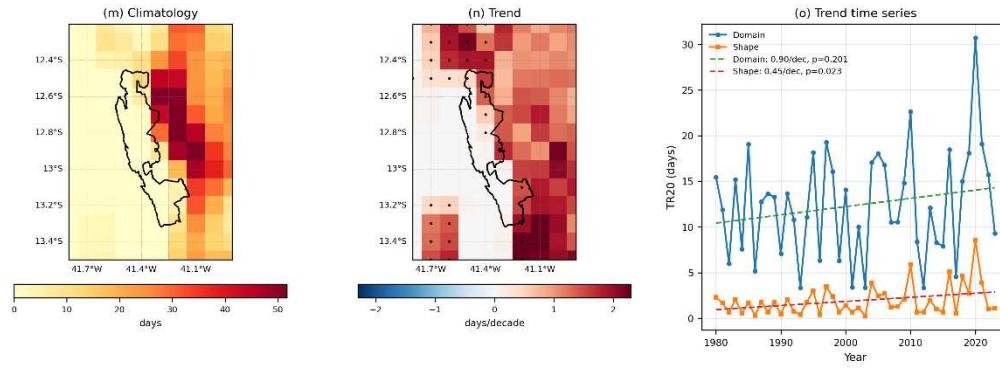
DIAM | ERA | TXx: Max Tmax



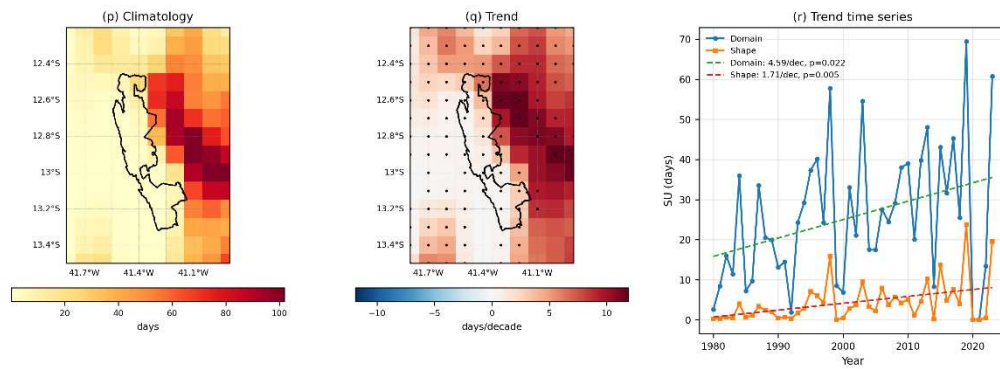
Supplementary 6. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Chapada Diamantina National Park based ERA

DIAM | ERA | TEMP | page 2

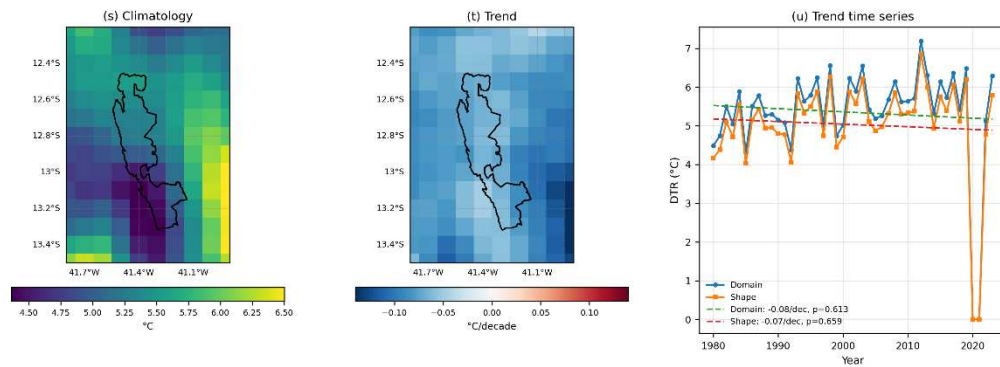
DIAM | ERA | TR20: Tropical nights



DIAM | ERA | SU: Summer days



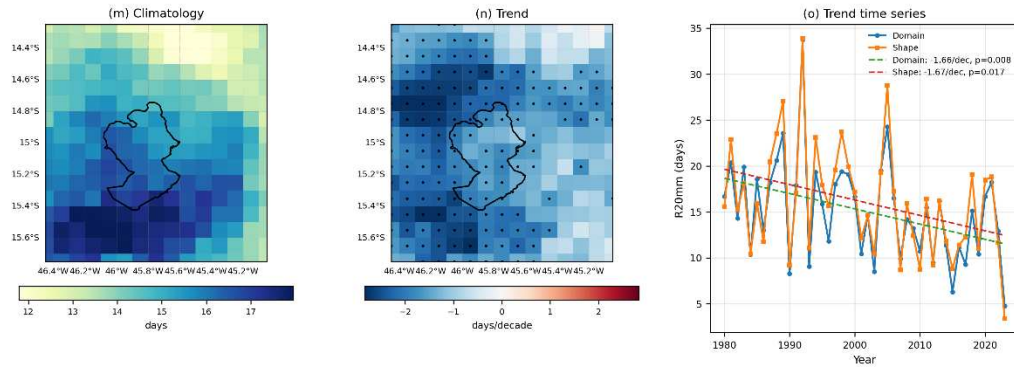
DIAM | ERA | DTR: DTR



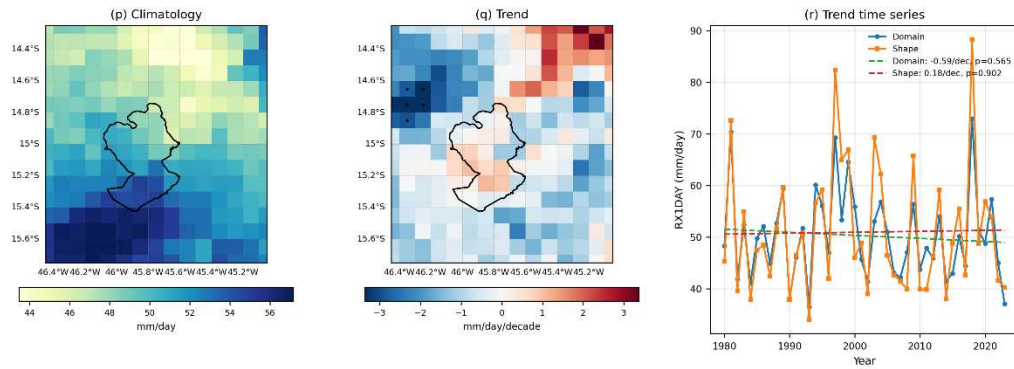
Supplementary 7. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based Xavier

VER | Xavier | PREC | page 2

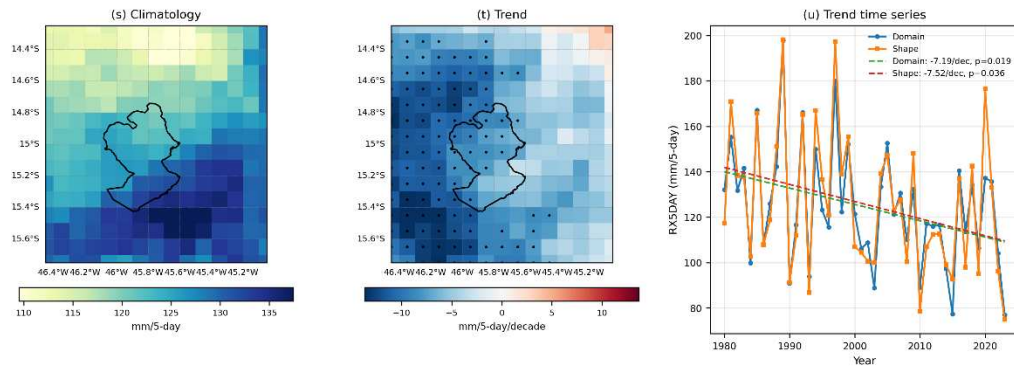
VER | Xavier | R20mm: R20mm



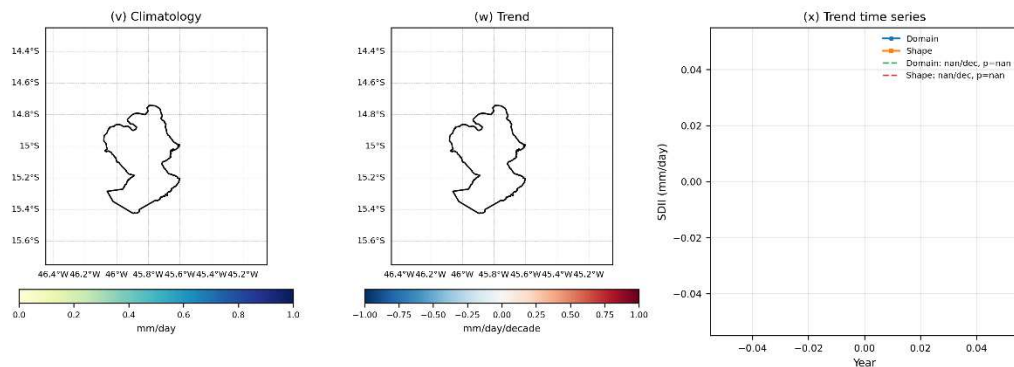
VER | Xavier | RX1DAY: Max 1-day precip



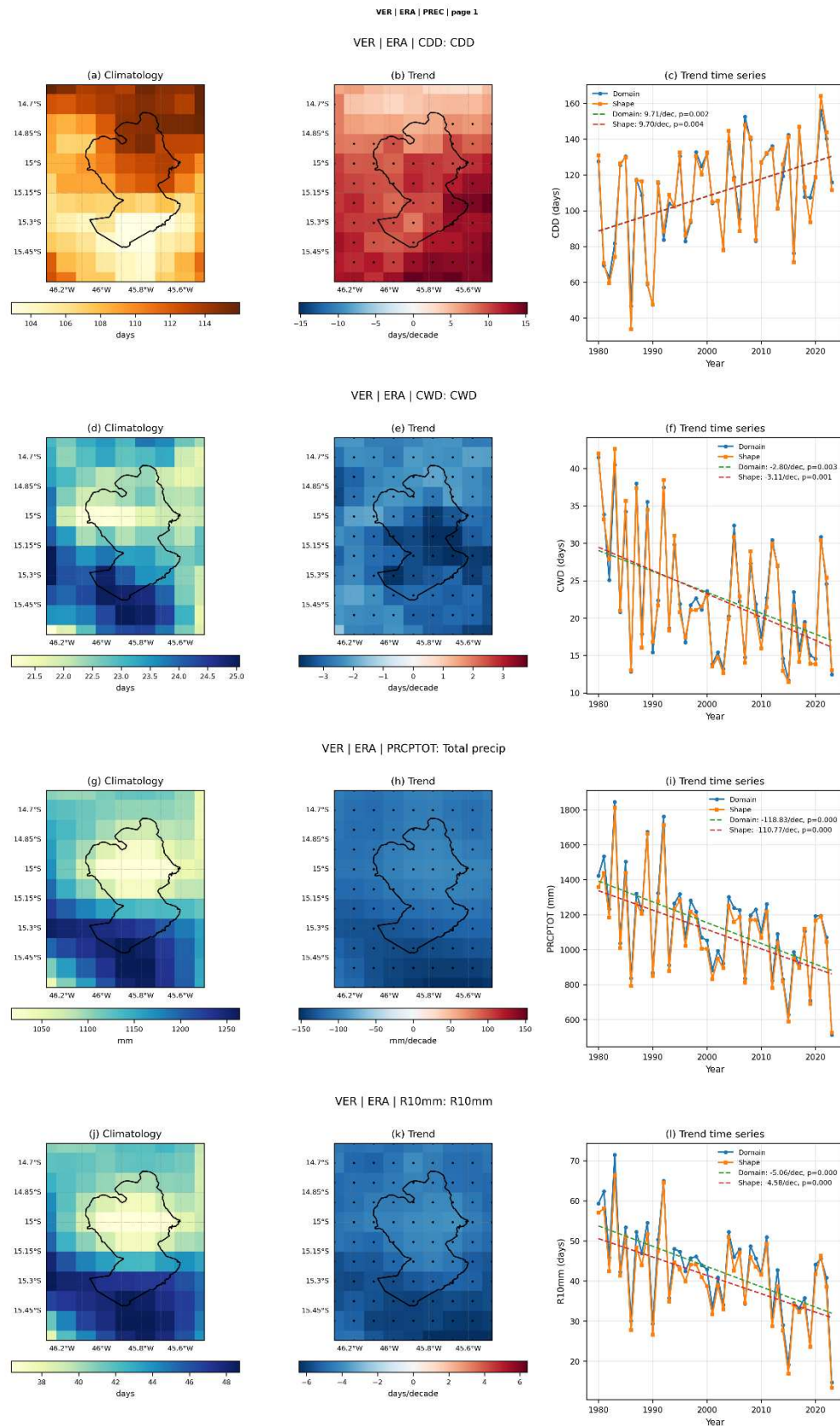
VER | Xavier | RX5DAY: Max 5-day precip



VER | Xavier | SDII: SDII



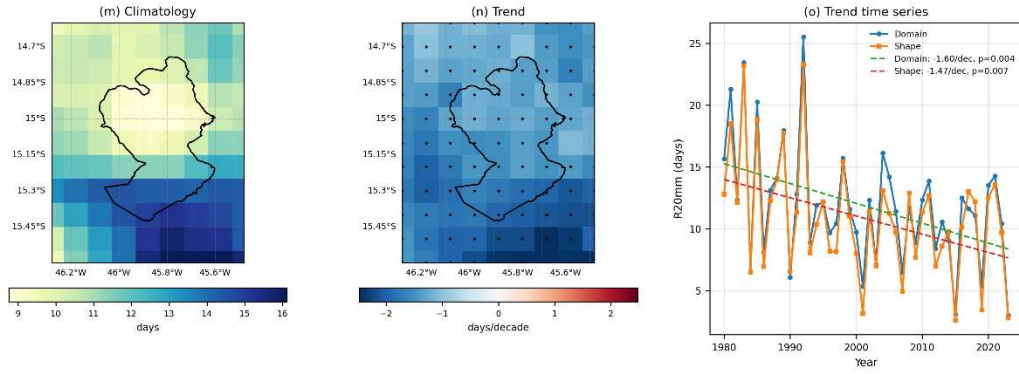
Supplementary 8. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based ERA



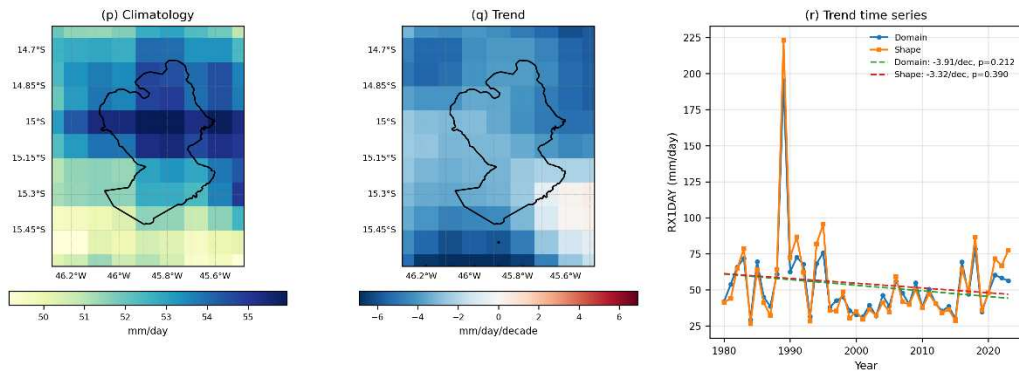
Supplementary 9. Significant trends in precipitation climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based ERA

VER | ERA | PREC | page 2

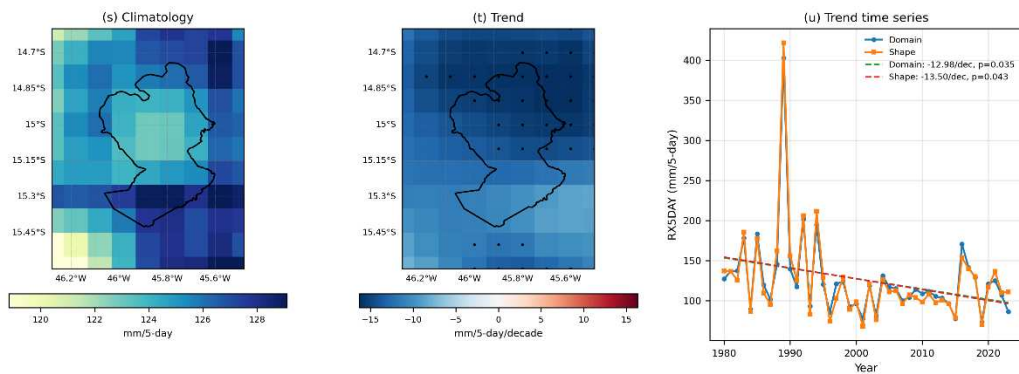
VER | ERA | R20mm: R20mm



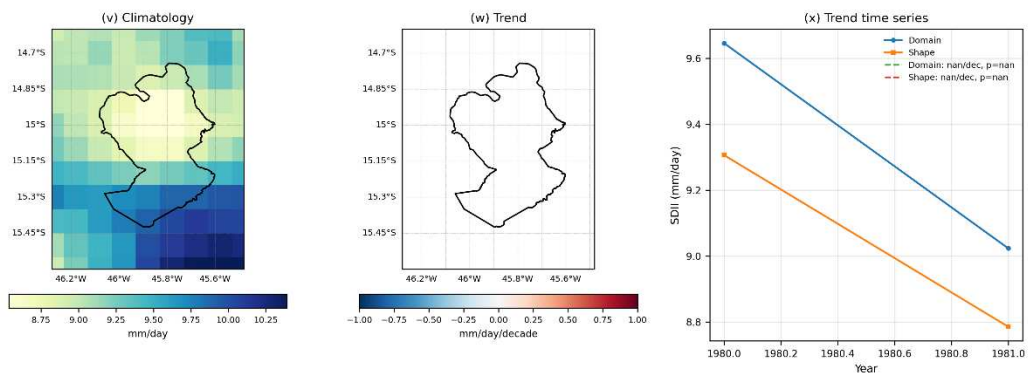
VER | ERA | RX1DAY: Max 1-day precip



VER | ERA | RX5DAY: Max 5-day precip



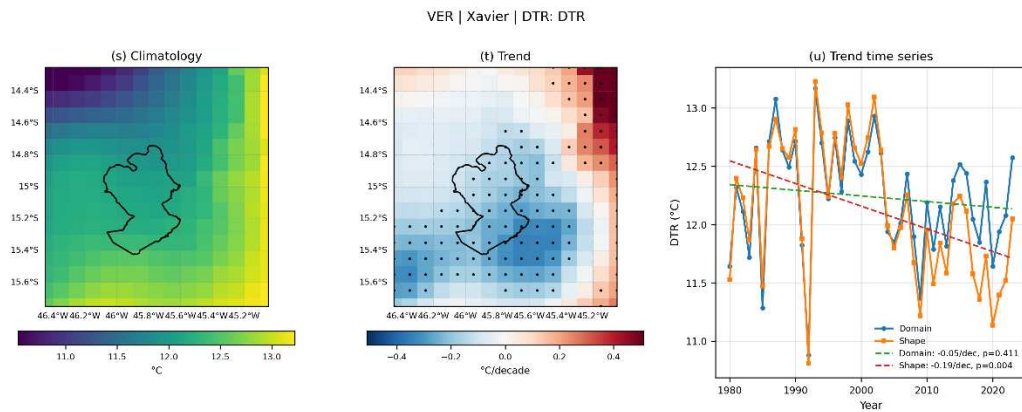
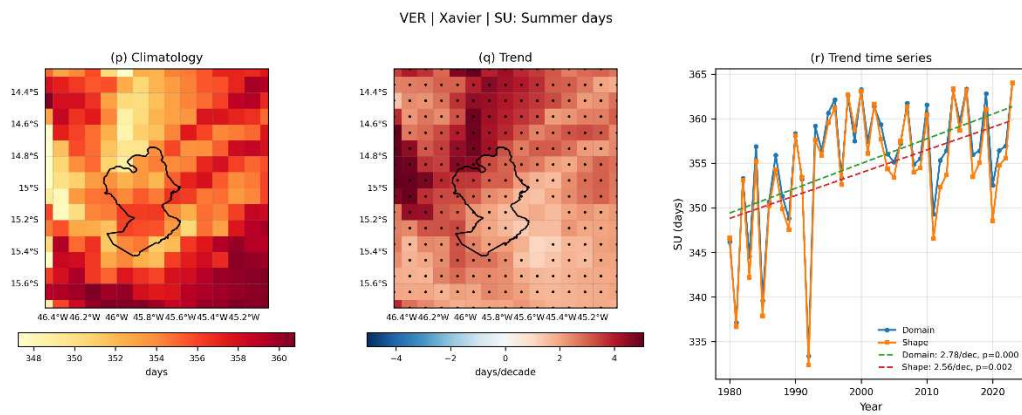
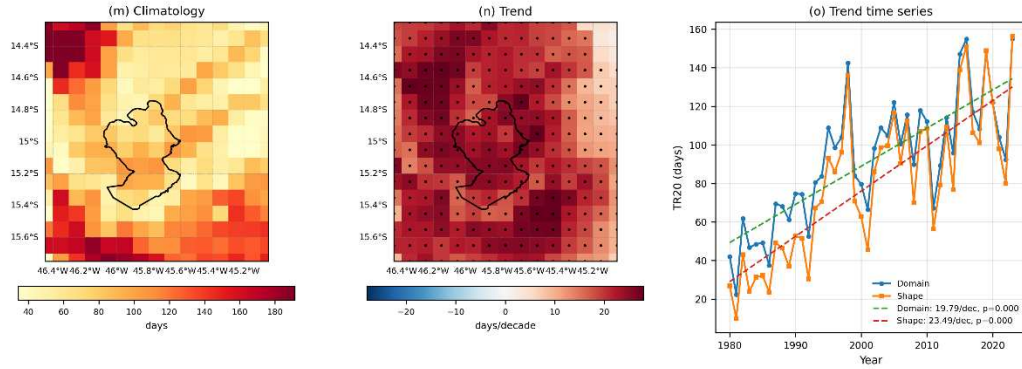
VER | ERA | SDII: SDII



Supplementary 10. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based Xavier

VER | Xavier | TEMP | page 2

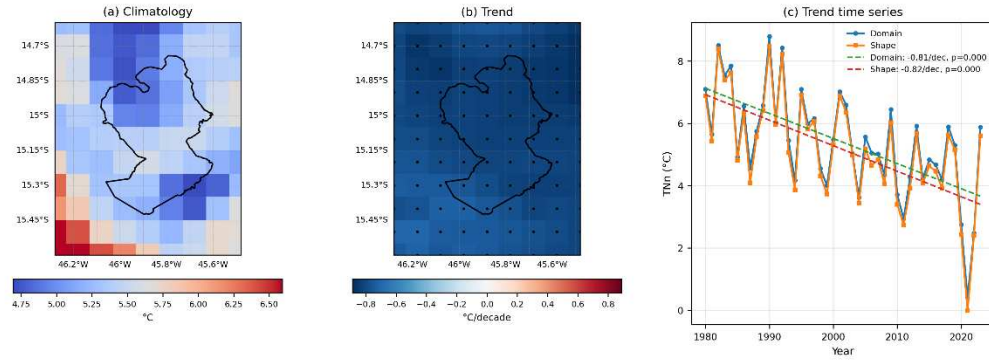
VER | Xavier | TR20: Tropical nights



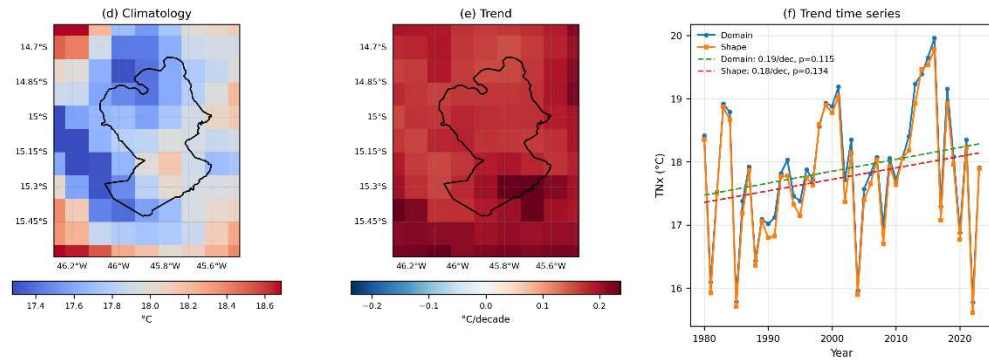
Supplementary 11. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based ERA

VER | ERA | TEMP | page 1

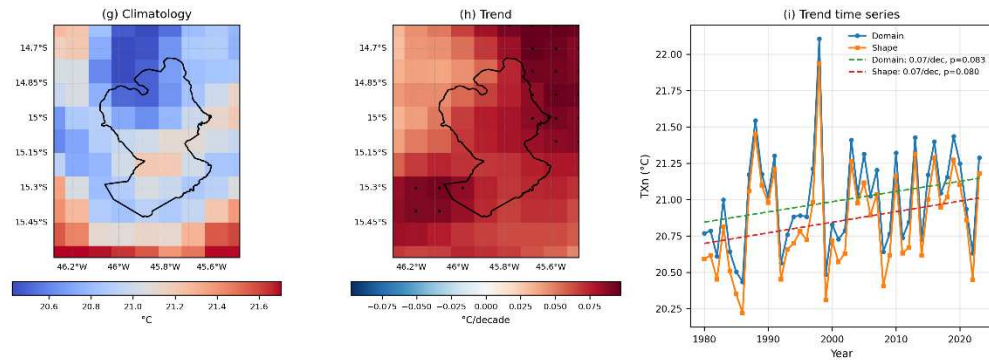
VER | ERA | TNn: Min Tmin



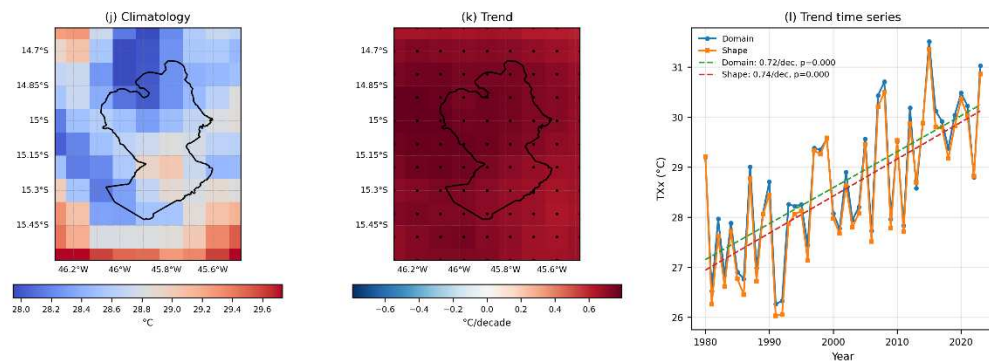
VER | ERA | TNx: Max Tmin



VER | ERA | TXn: Min Tmax



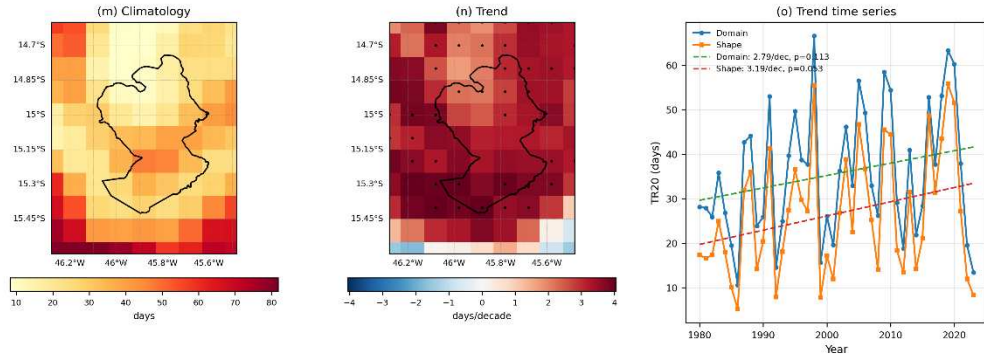
VER | ERA | TXx: Max Tmax



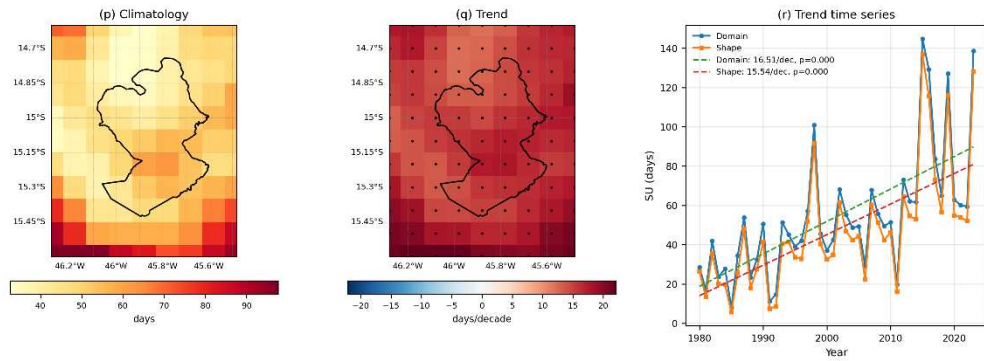
Supplementary 12. Significant trends in temperature climate extremes indices in the Grande Sertão Veredas National Park based ERA

VER | ERA | TEMP | page 2

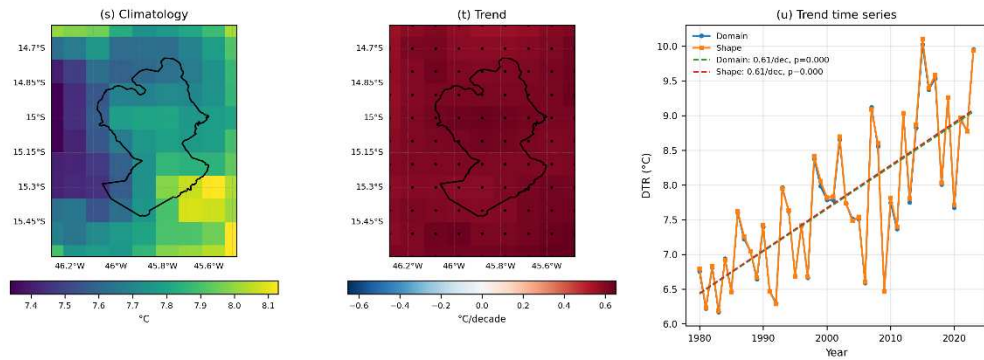
VER | ERA | TR20: Tropical nights



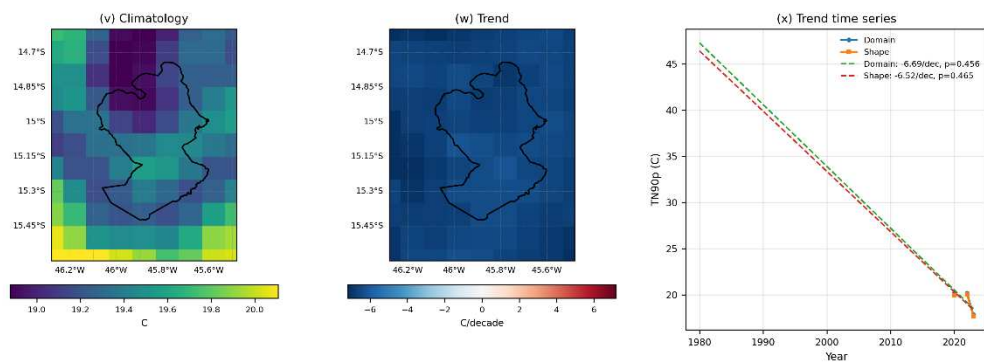
VER | ERA | SU: Summer days



VER | ERA | DTR: DTR



VER | ERA | TN90p: TN90p



ARTIGO 2 - Sinergia entre extremos climáticos e mudanças no uso da terra impulsiona a degradação resiliente na Floresta Nacional do Jamanxim, Amazônia

Resumo: A Floresta Nacional (Flona) do Jamanxim, situada no Arco do Desmatamento, na Amazônia Oriental, enfrenta pressões crescentes decorrentes da interação entre variabilidade climática e vetores antrópicos. Este estudo analisou, de forma integrada, a variabilidade climática (1980-2023), as dinâmicas de uso e cobertura da terra e o regime de fogo (1985-2023), a fim de avaliar os efeitos sinérgicos entre as mudanças do clima e as pressões antrópicas sobre a integridade ecossistêmica da unidade de conservação. Utilizaram-se dados de reanálise ERA5-Land, séries observacionais de Xavier et al. (2022) e coleções do MapBiomass, aplicando-se os testes estatísticos de Mann-Kendall e o estimador de declive de Sen para a identificação de tendências. Os resultados revelam uma trajetória crítica de degradação. A cobertura florestal nativa regrediu de 99,4% em 2010 para 77% em 2023, impulsionada pela expansão da fronteira agropecuária e pela influência da rodovia BR-163. Simultaneamente, observou-se uma tendência de aquecimento nas temperaturas máximas e um aumento significativo na duração dos períodos secos. Embora o regime pluviométrico total apresente estabilidade estatística, a intensificação do déficit hidrotérmico eleva a vulnerabilidade da biomassa. A dinâmica do fogo evidenciou uma mudança de paradigma: enquanto os picos históricos coincidem com fases quentes do *El Niño*, a persistência de extensas áreas queimadas durante o triênio *La Niña* (2020-2022), indica que as fontes de ignição antrópica e o efeito de borda tornaram-se indutores independentes da variabilidade sazonal. A identificação de *hotspots* com frequência de queima superior a 15 eventos sinaliza um processo de savanização funcional. Conclui-se que a Flona do Jamanxim ultrapassa limiares críticos de regeneração, demandando políticas de comando e controle integradas à restauração ativa, a fim de evitar o colapso ecossistêmico irreversível.

Palavras-chave: Climatologia; Mudanças climáticas; Queimadas, Incêndios florestais.

Abstract: The Jamanxim National Forest, located in the Arc of Deforestation in the Eastern Amazon, faces increasing pressures resulting from the interaction between climate variability and anthropogenic vectors. This study integrated the analysis of climate variability (1980-2023), land use and land cover dynamics, and the fire regime (1985-2023) to evaluate the synergistic effects of climate change and anthropogenic pressures on the ecosystem integrity of the conservation unit. ERA5-Land reanalysis data, observational series from Xavier et al. (2022), and MapBiomass collections were utilized, applying Mann-Kendall statistical tests and Sen's slope estimator for trend identification. The results reveal a critical degradation trajectory. Native forest cover declined from 99.4% in 2010 to 77% in 2023, driven by the expansion of the agricultural frontier and the influence of the BR-163 highway. Simultaneously, a warming trend in maximum temperatures and a significant increase in the duration of dry periods (CDD) were observed. Although the total rainfall regime presents statistical stability, the intensification of the hydrothermal deficit increases biomass vulnerability. Fire dynamics evidenced a paradigm shift: while historical peaks coincided with warm El Niño phases, the persistence of extensive burned areas during the La Niña triennium (2020-2022) indicates that anthropogenic ignition sources and edge effects have become independent drivers of seasonal variability. The identification of hotspots with a burning frequency exceeding 15 events signals a process of functional savannization. It is concluded that Flona Jamanxim exceeds critical regeneration thresholds, demanding command-and-control policies integrated with active restoration to prevent irreversible ecosystem collapse.

Keywords: Climatology; Climate change; Biomass burning; Forest fires.

1 Introdução

O estabelecimento de Unidades de Conservação (UCs) federais constitui o principal instrumento normativo do Brasil para a proteção da biodiversidade e dos recursos naturais (Brasil, 2000). No contexto tropical, o bioma amazônico representa o maior reservatório de diversidade biológica do planeta, cuja integridade funcional é determinante para a manutenção de serviços ecossistêmicos em escala global (Fearnside, 2024). Esses serviços incluem o sequestro e armazenamento de carbono, a regulação climática, a ciclagem de nutrientes, a polinização e a sustentação dos ciclos hidrológicos, elementos essenciais à estabilidade ambiental e socioeconômica (Marenzi & Longarete, 2018).

Nesse cenário, a Floresta Nacional (Flona) do Jamanxim, instituída em 2006 como unidade de conservação de uso sustentável, foi criada com o intuito de conciliar a conservação biológica ao uso racional dos recursos naturais. No entanto, seu posicionamento geográfico no sudoeste do estado do Pará, inserido no eixo do Arco do Desmatamento, impõe elevada vulnerabilidade socioambiental. Este panorama é marcado pela intensificação da conversão da cobertura vegetal e pela pressão antrópica sobre a integridade ecossistêmica da unidade.

A expansão da malha logística e a consolidação da fronteira agropecuária catalisam a conversão da cobertura vegetal, intensificando a vulnerabilidade regional ante os extremos climatológicos (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [INPE], 2023). A substituição de áreas naturais por pastagens altera o balanço de energia superficial, elevando as temperaturas e acentuando o déficit hídrico durante períodos de estiagem prolongada. Esse cenário de instabilidade climática retroalimenta a degradação ecossistêmica, demandando mecanismos de monitoramento contínuo e a implementação de políticas públicas de comando e controle integradas.

A relevância da Flona do Jamanxim transcende a proteção local da Floresta Ombrófila Densa. Ela atua como um refúgio ecológico vital que assegura a conectividade biológica e o fluxo gênico em uma paisagem fragmentada. Além disso, a biomassa florestal remanescente desempenha um papel indispensável nos ciclos biogeoquímicos, mitigando os efeitos das alterações climáticas. Contudo, a persistência de pressões antrópicas compromete a resiliência ecossistêmica desta unidade (Gama, 2023), causando impactos que ultrapassam os limites geográficos da Amazônia.

Este quadro de vulnerabilidade é agravado pelas mudanças climáticas globais. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental*

Panel Climatic Change [IPCC], 2023), mesmo em cenários de emissões moderadas (SSP2-4.5), prevê-se o aumento da frequência de eventos extremos de temperatura e déficit hídrico nos biomas brasileiros. As alterações climáticas contemporâneas acarretam impactos ambientais que comprometem a integridade da biodiversidade e a estabilidade funcional dos serviços ecossistêmicos (Marengo, 2007; Coutinho et al., 2025).

No domínio florestal, a persistência do estresse hídrico atua como um vetor de degradação que pode intensificar a vulnerabilidade dos biomas, ultrapassando os limiares críticos (*tipping points*) de regeneração natural da vegetação. Esse fenômeno resulta em rupturas na dinâmica sucessional e na estrutura fitossociológica, conduzindo ecossistemas a estados de transição irreversíveis (Steffen et al., 2018). A complexidade das projeções de mudanças climáticas demanda o uso de métricas específicas para quantificar o risco. Nesse sentido, a análise por meio de Índices de Extremos Climáticos é metodologicamente fundamental, pois transforma dados brutos de temperatura e precipitação em indicadores que refletem a frequência, a intensidade e a duração de eventos extremos (Zhang et al., 2011).

Adicionalmente, a recorrência de episódios de fogo e secas extremas acelera a mortalidade de árvores de grande porte, fundamentais para a estrutura da floresta. Esse processo desencadeia um ciclo de retroalimentação positiva: a perda de dossel aumenta a temperatura no interior da floresta e reduz a umidade relativa, tornando o ecossistema vulnerável a novos focos de calor (Silva et al., 2018).

Apesar da reconhecida vulnerabilidade do Arco do Desmatamento, a quantificação em escala local das sinergias entre as anomalias climáticas, a conversão da paisagem e o regime de fogo ainda constitui uma lacuna científica, especialmente em unidades de conservação federais submetidas a pressões crônicas de infraestrutura. Avaliar essas variáveis sob uma abordagem compartimentada tende a subestimar o risco real de colapso ecossistêmico. Justifica-se, portanto, a urgência de investigações integradas de longo prazo que cruzem dinâmicas de uso da terra com bases de dados climáticos de alta resolução.

Tal abordagem é imperativa não apenas para o avanço da modelagem ambiental preditiva, mas para fornecer subsídios quantitativos que orientem a atualização de planos de manejo, o direcionamento de políticas de comando e controle e a manutenção dos serviços ecossistêmicos no Corredor Tapajós-Xingu. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo, analisar de forma integrada a variabilidade climática, os índices de extremos climáticos, a dinâmica de uso e cobertura da terra e o regime de fogo na Floresta Nacional do Jamanxim no período de 1980 a 2023. Ao empregar bases de dados de reanálise ERA5-Land e observacionais de Xavier et al. (2022), a pesquisa visa avaliar os efeitos sinérgicos entre

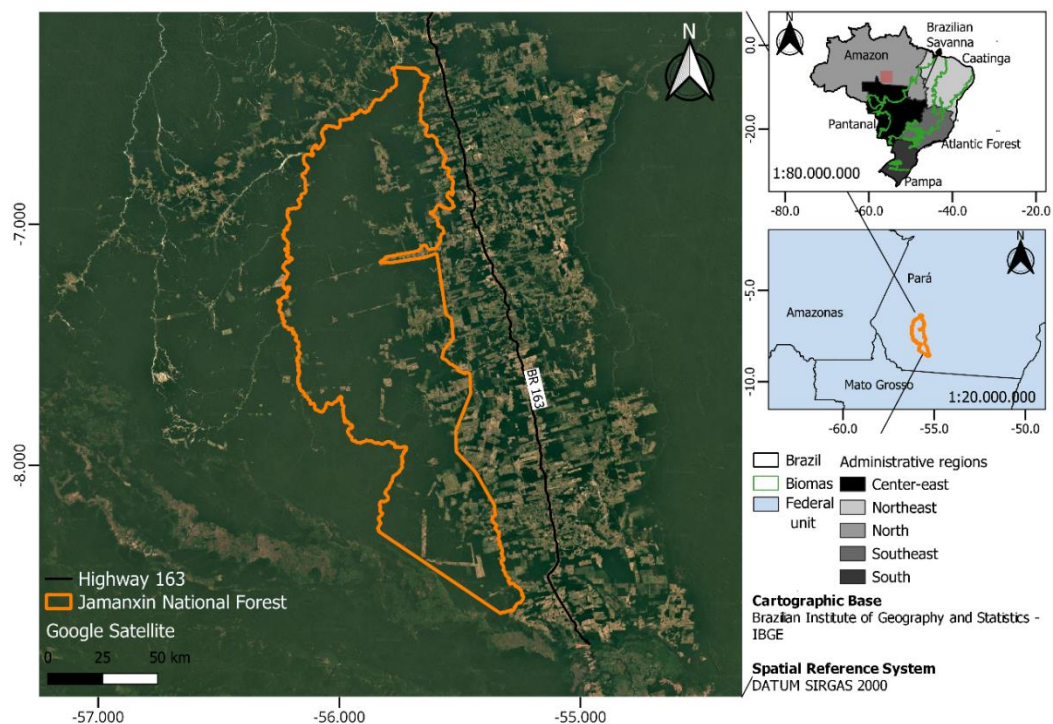
mudanças climáticas e pressões antrópicas sobre a integridade ecossistêmica da unidade de conservação.

2 Materiais e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A Floresta Nacional (Flona) do Jamanxim situa-se na Amazônia Oriental brasileira, no sudoeste do estado do Pará, sob a jurisdição do município de Novo Progresso (Figura 1). Geograficamente, a unidade é delimitada pelas coordenadas 55°11'36"W, 8°36'54"S e 56°15'23"W, 6°20'26"S, ocupando o interflúvio estratégico entre as bacias dos rios Tapajós e Xingu. Com uma extensão territorial de aproximadamente 1,3 milhão de hectares, configura-se como a terceira maior unidade de conservação de sua categoria no bioma amazônico, possuindo dimensão física superior a nações como Catar e Líbano (Brasil, 2006; World Bank, 2024). A área de estudo compreende a unidade de conservação e um *buffer* de 20 km em seu entorno, demarcado com o intuito de analisar a pressão antrópica nas áreas adjacentes.

Figura 1 – Localização da Floresta Nacional do Jamanxim



Inserida no contexto do Corredor Xingu de Diversidade Socioambiental (complexo de áreas protegidas com aproximadamente 28 milhões de hectares), a Flona do Jamanxim atua

como um elemento estratégico de conectividade estrutural. Sua preservação é determinante para a mitigação dos efeitos da fragmentação florestal decorrentes da expansão da fronteira agrícola, funcionando como um corredor biológico que assegura o fluxo gênico e a integridade de habitats contínuos (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade [ICMBio], 2010).

A cobertura vegetal é caracterizada pela predominância de Floresta Ombrófila Aberta (85,13%), seguida por fragmentos de Floresta Ombrófila Densa (14,87%) (ICMBio, 2010). Este *continuum* florestal é essencial para a manutenção da resiliência ecossistêmica frente a eventos climáticos extremos e atua como um sumidouro de carbono de relevância global (Saatchi et al., 2011).

A integridade da Flona do Jamanxim é ameaçada por vetores de infraestrutura logística de grande porte. Além da influência histórica da rodovia BR-163, o planejamento da Ferrogrão (EF-170), projeta pressões adicionais sobre a zona de amortecimento da unidade. Tais infraestruturas potencializam o efeito de borda, reduzindo custos de transporte e incentivando a conversão florestal para a pecuária extensiva e a grilagem de terras públicas (Fearnside, 2024; Gama, 2023).

2.2 Dados de uso e cobertura da terra

Compreender as mudanças na paisagem é essencial para associar as pressões antrópicas às variações climáticas regionais. Nesse sentido, este estudo investigou a evolução espaço-temporal e os processos de conversão e sucessão florestal na Flona do Jamanxim, utilizando séries históricas de uso e cobertura da terra no período de 1985 a 2023.

As dinâmicas de uso e cobertura da terra para a Flona do Jamanxim e entorno foram analisadas utilizando dados da Coleção 10 do MapBiomas (2024). O mapeamento baseia-se na classificação *pixel a pixel* de imagens *Landsat* (NASA/USGS), com resolução espacial de 30 m. O processamento foi executado via algoritmos de aprendizado de máquina (*Random Forest*) implementados na plataforma *Google Earth Engine* (GEE).

Para fins de análise de Mudança de Uso e Cobertura da Terra (LULC), a delimitação do *buffer* fundamentou-se na necessidade de monitorar a frente de expansão agropecuária e os efeitos da infraestrutura logística, que atuam como vetores de fragmentação da paisagem e degradação de habitats, exercendo pressão contínua sobre a unidade de conservação. Esta delimitação permite identificar se a matriz de uso da terra adjacente à UC compromete a resiliência ecossistêmica da unidade de conservação frente a eventos climáticos extremos.

A integração entre a dinâmica de cobertura da terra e indicadores socioeconômicos permite avaliar as pressões antrópicas sobre a integridade ecológica da Flona do Jamanxim. Sob a ótica da ecologia da paisagem em zonas de fronteira, a fragmentação do habitat e a expansão de matrizes produtivas impactam diretamente a eficácia das metas de conservação previstas no Plano de Manejo (Souza Jr. et al., 2013; Marcuartú et al., 2017).

2.3 Dados de precipitação e temperatura

Para analisar a interação entre as dinâmicas de uso e cobertura da terra e a variabilidade climática na Flona do Jamanxim, adotou-se uma abordagem multivariada abrangendo o período de 1980 a 2023. Os dados climáticos foram obtidos a partir da base de dados em grade BR-DWGD (*Brazilian Daily Weather Gridded Data*), que oferece resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (~ 11 km) e resolução temporal diária (Xavier et al., 2022).

Esta base integra dados *in situ* de 11.473 pluviômetros e 1.252 estações meteorológicas via interpolação espacial (Xavier et al., 2022). As variáveis selecionadas incluíram a precipitação acumulada (P), a temperatura máxima (Tmax) e a temperatura mínima (Tmin). A partir desta série histórica, foram calculadas as normais climatológicas, médias térmicas e acumulados sazonais, processados especificamente para a delimitação geográfica da unidade de conservação e do *buffer*.

Para fins de validação e suprimento de eventuais lacunas observacionais, utilizou-se a reanálise ERA5-Land, desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e disponibilizada pelo *Copernicus Climate Change Service* (2019). O ERA5-Land fornece estimativas de variáveis de superfície em uma grade global de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, geradas por meio de modelagem numérica que integra leis físicas da termodinâmica com a assimilação de dados observacionais globais (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* [ECMWF], 2024). A convergência entre os dados observacionais e a reanálise visa mitigar as incertezas decorrentes da baixa densidade de estações meteorológicas na Amazônia Oriental, conferindo maior confiabilidade estatística aos resultados.

2.3.1 Tendências da variabilidade climática e índices de extremos climáticos

A variabilidade climática e as tendências de temperatura e precipitação nas séries temporais de 1980 a 2023 foram avaliadas por meio do teste estatístico não paramétrico de *Mann-Kendall*, amplamente utilizado em estudos climatológicos por sua robustez na identificação de tendências monotônicas (Mann, 1945; Kendall, 1975). Complementarmente, a magnitude dessas mudanças foi quantificada por meio do estimador de inclinação de *Sen* (Sen, 1968). Este método calcula a mediana das inclinações de todos os pares de observações possíveis, fornecendo uma estimativa da taxa de variação linear (°C/década ou mm/ano). A aplicação conjunta desses modelos justifica-se pela resistência à influência de valores atípicos (*outliers*) e extremos climáticos episódicos.

A análise dos Índices de Extremos Climáticos baseou-se nas séries mensais e anuais de temperatura e precipitação. Para quantificar a frequência, intensidade e duração dos eventos extremos, foram calculados nove índices de precipitação e sete de temperatura (Tabela 1). O processamento foi realizado por meio do *Climate Data Operators* (CDO) e da linguagem *Python*.

A aplicação desses índices, fundamentada nos protocolos de *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI), permite diagnosticar vulnerabilidades socioambientais. Essas métricas fornecem subsídios para a formulação de políticas públicas de adaptação e para o refinamento de estratégias de gestão de riscos e mitigação de danos ambientais (IPCC, 2021; Marengo et al., 2021a).

Tabela 1 – Índices extremos de precipitação climáticos de precipitação e temperatura

Índices Extremos de Precipitação			
Indicativo	Índice	Definição	Unidade
Intensidade	PRCTOT	Precipitação total anual nos dias úmidos ($PRC0P \geq 1 \text{ mm}$)	mm
	SDII	Relação entre a precipitação total anual e o número de dias chuvosos mm/dia.	mm
	Rx1 day	Máximo anual de Precipitação em 1 dia	mm
	Rx 5day	Máximo anual de Precipitação em 5 dias consecutivos	mm
Frequência	R1mm	Número de dias com precipitação $\geq 1 \text{ mm}$	Dias
	R10 mm	Número de dias em um ano em que a precipitação foi $\geq 10 \text{ mm}$	Dias
	R20 mm	Número de dias em um ano em que a precipitação foi $\geq 20 \text{ mm}$	Dias
Duração	CDD	Número máximo de dias consecutivos secos ($PRCP < 1 \text{ mm}$)	Dias
	CDW	Número máximo de dias consecutivos úmidos ($PRCP \geq 1 \text{ mm}$)	Dias

Índices Extremos de Temperatura		
Índice	Definição	Unidade
TNn	Valor mínimo mensal da temperatura mínima diária	°C
TNx	Valor máximo mensal da temperatura mínima diária	°C
TXn	Valor mínimo mensal da temperatura máxima diária	°C
TXx	Valor máximo mensal da temperatura máxima diária	°C
TR20	Número de noite tropicais. Contagem anual de dias em que a temperatura mínima diária $> 20^\circ \text{ C}$	D
SU	Contagem anual de dias em que $TX > 25^\circ \text{ C}$	D
DTR	Diferença média entre TX e TN. Amplitude térmica	°C

Fonte: *Climate and Ocean Variability, Predictability and Change (CLIVAR)*, 2020.

2.4 Análise da frequência de queima e identificação de *hotspots* de degradação

Para a quantificação das cicatrizes de fogo e análise da frequência de incêndios na Flona do Jamanxim e em seu *buffer*, os dados foram processados por meio das séries temporais de imagens de satélite na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), o que permite o processamento de grandes volumes de dados geoespaciais com eficiência computacional (Gorelick et al., 2017).

As cicatrizes de fogo foram quantificadas utilizando os dados da Coleção 4.1 do MapBiomas Fogo, que disponibiliza mapas anuais de áreas queimadas com resolução de 30 metros. O conjunto de dados deriva de mosaicos multitemporais da série *Landsat*. O

processamento utiliza o algoritmo *Random Forest*, treinado para discriminar assinaturas espectrais de áreas atingidas pelo fogo (MapBiomias, 2024; Gorelick et al., 2017).

O comportamento do fogo no período de 1985 a 2023 foi analisado seguindo quatro etapas: i) recorte espacial dos polígonos UC e do *buffer*; ii) cálculo da extensão da área queimada em hectares e conversão em percentuais para comparações interanuais; iii) geração da frequência de queima pela sobreposição *pixel a pixel* dos mapas anuais, onde o valor resultante representa o número total de vezes que cada área foi detectada como queimada em 39 anos (1985-2023), identificando *hotspots* de degradação persistente; iv) correlação dos resultados com os eventos climáticos extremos e as mudanças no uso da terra identificadas na Coleção 10 do MapBiomias.

3 Resultados e discussão

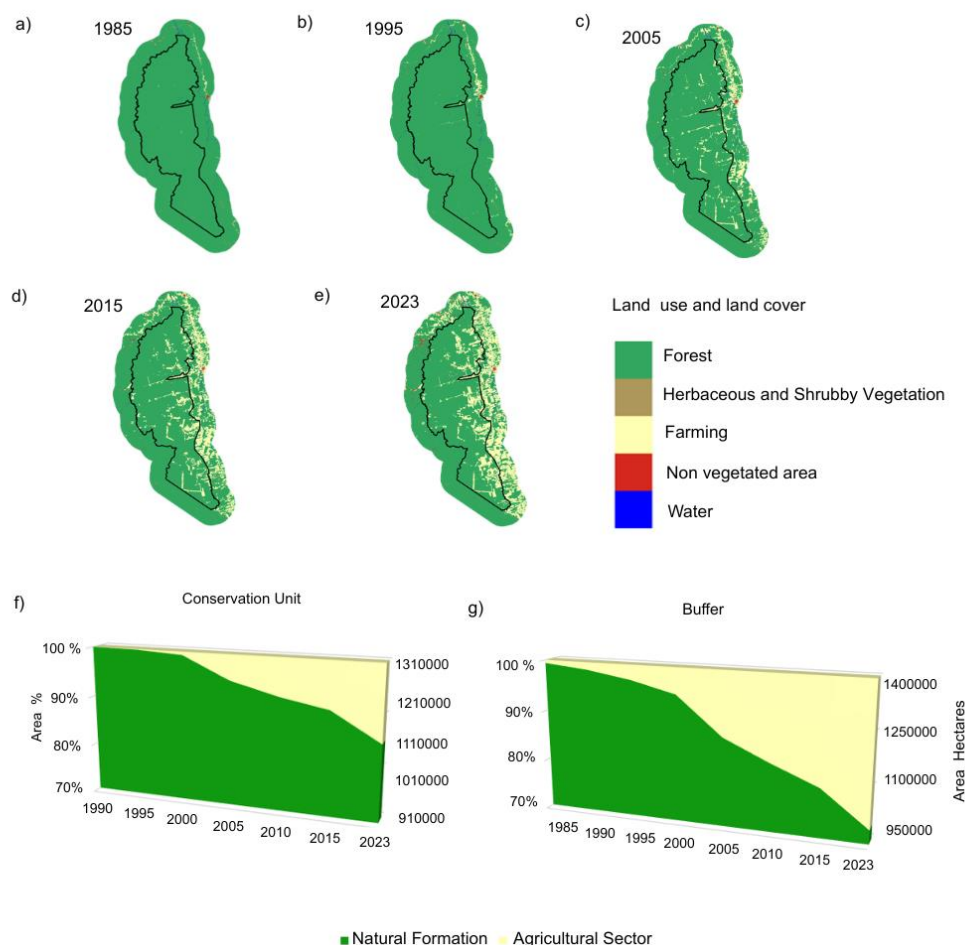
3.1 Uso e ocupação da terra Floresta Nacional do Jamanxim

A análise espaço-temporal da cobertura e uso da terra (1985-2023) na Flona do Jamanxim e entorno evidenciou uma tendência de expansão da matriz agropecuária, resultando na supressão de vegetação nativa. Esta conversão antrópica é mais intensa nas áreas limítrofes, indicando uma pressão crescente sobre a integridade ecossistêmica da unidade de conservação (Figura 2). A elevada vulnerabilidade da área é marcada pela conversão de aproximadamente 193.235 ha de floresta nativa para uso agropecuário (MapBiomias, 2024).

Entre 2010 e 2023, a cobertura de vegetação nativa regrediu de 99,4% para 77% da área total da UC. O pico histórico de desflorestamento ocorreu em 2004 (31.866 ha), área equivalente à extensão territorial das Maldivas (World Bank, 2024). No triênio 2020-2022, as perdas anuais foram de 10.155 ha, 19.100 ha e 11.150 ha, respectivamente (MapBiomias, 2024; Instituto Socioambiental [ISA], 2024).

O principal vetor de conversão é a agropecuária, especialmente a introdução de pastagens extensivas, que ocupam aproximadamente 156.000 ha da unidade de conservação (MapBiomias, 2024). Adicionalmente, identificou-se uma transição fitofisionômica de formações florestais para savânicas, o que indica processos de degradação do dossel. No *buffer* de 1.428.119 ha, o padrão é análogo: houve a supressão de aproximadamente 305.000 ha de floresta (20% da formação natural), substituídos majoritariamente por pastagens e culturas perenes (MapBiomias, 2024).

Figura 2. Uso e ocupação da terra na Floresta Nacional do Jamanxim



Os dados evidenciam que a Flona do Jamanxim enfrenta uma pressão antrópica assimétrica, na qual a matriz florestal predominante em 1985 deu lugar a uma paisagem fragmentada. A correlação inversa entre o declínio da formação natural e a expansão agropecuária no *buffer* sugere um padrão de ocupação exponencial, consolidado pela influência logística da rodovia BR-163. Brito e Castro (2018) destacam que o eixo rodoviário atua como indutor de grilagem, exploração madeireira e expansão da fronteira agrícola.

As limitações do Plano BR-163 Sustentável implantado com a finalidade de mitigar a pressão sobre a Flona do Jamanxim, são amplamente discutidas na literatura. Marcuartú et al. (2017), aponta que a recorrência de pleitos para desafetação visando à redução de limites e à priorização da regularização de posses, em detrimento de critérios ecológicos, compromete a governança territorial. Esse cenário de vulnerabilidade é evidenciado pela concentração do desmatamento nos setores Norte e Sul da unidade, em áreas caracterizadas pela elevada conectividade com o corredor logístico regional (Gama et al., 2023).

A conversão para pastagens e a degradação florestal (transição para fisionomias savânicas) afetam o balanço de carbono e a integridade ecossistêmica regional (Gusmão et al., 2024). A persistência desses índices indica a necessidade de fortalecer políticas de comando e controle, bem como instrumentos de monitoramento que assegurem o cumprimento do mandato legal de uso sustentável da unidade.

A degradação progressiva da Flona do Jamanxim não constitui apenas uma perda de biodiversidade local, mas uma interrupção crítica nos serviços ecossistêmicos, especialmente nos serviços regulatórios e hidrológicos. A conversão de formações florestais em pastagens altera significativamente a evapotranspiração real e a partição de energia superficial. Enquanto a floresta densa atua como uma ‘bomba biótica’, mantendo fluxos verticais de vapor d'água essenciais para a baixa atmosfera, a substituição por gramíneas de sistema radicular superficial, reduz a capacidade de extração de água de camadas profundas do solo (Makarieva & Gorshkov, 2007).

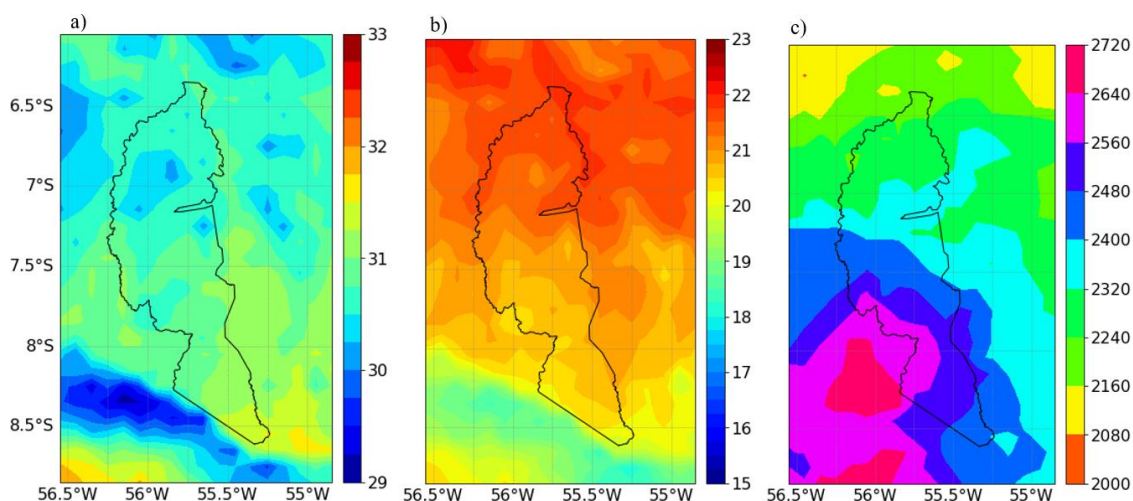
Esse processo compromete a reciclagem de umidade regional e enfraquece o transporte de vapor de água por meio dos Jatós de Baixos Níveis (JBN), conhecidos como Rios Voadores, que suprem o regime de precipitação no Centro-Sul do continente (Nobre et al., 2016; Marengo, 2014).

A redução da densidade do dossel nesta região contribui para o atraso no início da estação chuvosa. Com uma menor oferta de umidade, a quebra da massa de ar seco sobre o Brasil Central pode ser postergada, afetando o regime de chuvas no Sudeste brasileiro (Nobre et al., 2009). Os rios voadores dependem da evapotranspiração contínua da floresta para manter o fluxo de vapor que é direcionado pelos Jatós de Baixo Nível da América do Sul (JBNAS) ao longo da encosta leste dos Andes (Arraut et al., 2012; Marengo, 2021). A conversão de 156.000 ha de floresta em pastagem na Flona reduz o aporte hídrico nesse sistema, limitando a reciclagem de chuva. Como resultado, as massas de ar que alcançam o Sudeste brasileiro apresentam menor carga de umidade e temperaturas elevadas, reduzindo os índices pluviométricos abaixo das médias históricas (Fearnside, 2015; Marengo et al., 2021b).

3.2 Climatologia da Floresta Nacional do Jamanxim

Os padrões climatológicos da Floresta Nacional (Flona) do Jamanxim são detalhados nas Figuras 3 (a, b e c), ilustrando a distribuição espacial e temporal das temperaturas máximas, mínimas e o acumulado de precipitação.

Figura 3. Temperatura máxima, mínima e acumulado anual de precipitação



A Flona do Jamanxim está inserida em um domínio de clima equatorial úmido, condição biofísica essencial para a manutenção de fitofisionomias de floresta densa. A análise das normais climatológicas (1980-2023) revela um regime térmico persistentemente elevado, com temperaturas máximas (T_{max}) variando predominantemente entre 30°C e 33°C, com núcleos atingindo 33°C nas porções setentrionais (Figura 3a). As temperaturas mínimas (T_{min}) oscilam entre 18°C e 22°C, apresentando um gradiente de resfriamento em direção ao extremo sul da unidade (Figura 3b).

Quanto ao regime pluviométrico, a precipitação acumulada anual é expressiva, com volumes que variam de 2.160 mm a 2.720 mm. Observa-se que os maiores acumulados, situados no intervalo de 2.480 mm a 2.640 mm, concentram-se no setor sudoeste da Flona e do *buffer* (Figura 3c), evidenciando a robustez hídrica desta porção do território. No entanto, nota-se uma redução nos acumulados anuais nas porções sudoeste e norte em comparação ao setor oeste da unidade de conservação e seu entorno, onde se concentram os maiores volumes pluviométricos. Esta compartimentação hídrica coincide espacialmente com as áreas de formação florestal mais preservadas, reforçando a hipótese de que a integridade da cobertura vegetal é determinante para a manutenção e intensificação dos processos de evapotranspiração.

A análise das séries temporais mensais (1980-2023), baseada nos dados ERA5-Land e Xavier et al. (2022), revela padrões estatisticamente significativos de alteração térmica, em contraste com uma estabilidade relativa nos índices pluviométricos acumulados (Tabela 2). A aplicação do teste não paramétrico de *Mann-Kendall* demonstra, como resultado mais robusto e consensual entre os modelos, uma tendência monotonicamente crescente e significativa nas

temperaturas máximas, tanto na Flona quanto no *buffer*. A magnitude deste aquecimento é estimada em aproximadamente +2°C ao longo do período analisado.

A análise estatística revelou tendências de aquecimento consistentes e estatisticamente significativas ($p < 0,05$) para a T_{max} em ambos os conjuntos de dados e áreas de estudo. Os coeficientes Tau de Kendall para T_{max} situaram-se entre 0,166 e 0,179, indicando um incremento sustentado no estresse térmico regional no período 1980-2023. Essa trajetória de aquecimento diurno converge com a expansão da fronteira agropecuária e a degradação florestal identificadas na análise de LULC (*Land Use and Land Cover*), sugerindo que a perda de cobertura vegetal altera o balanço de calor sensível na superfície.

Em relação à temperatura mínima (T_{min}), observou-se uma divergência entre as bases de dados: enquanto o modelo de Xavier et al. (2022) detectou uma tendência de elevação significativa (Tau = 0,26; $p = 0,000$), os dados do ERA5-Land não apresentaram significância estatística ($p > 0,05$), embora mantenham coeficientes positivos. O incremento das temperaturas noturnas, corroborado pela base Xavier, é um fator crítico para a resiliência da Flona do Jamanxim, pois intensifica as taxas de respiração autotrófica e pode comprometer o balanço líquido de carbono do ecossistema (Brienen et al., 2015).

Tabela 2. Tendências de temperatura máxima, mínima e precipitação

Floresta Nacional do Jamanxim		Xavier		ERA5-Land	
		p-valor	tau	p-valor	tau
Precipitação	UC	0,741	0,009	0,317	-0,029
	Buffer	0,829	0,006	0,291	-0,030
Temperatura mínima	UC	0,000	0,264	0,235	0,034
	Buffer	0,000	0,262	0,215	0,036
Temperatura máxima	UC	0,000	0,171	0,000	0,177
	Buffer	0,000	0,166	0,000	0,179

Diferentemente das variáveis térmicas, o regime de precipitação não apresentou tendências lineares significativas em nenhum dos modelos ou recortes geográficos ($p > 0,05$). Embora os coeficientes *Tau* para a base ERA5-Land indiquem uma leve tendência negativa (-0,03), a ausência de significância estatística sugere que o volume pluviométrico total mensal permanece em um estado de estabilidade média de longo prazo, apesar da elevada variabilidade interanual e da influência de episódios climáticos extremos.

Contudo, a estabilidade nos índices de precipitação média não exclui a ocorrência de estresse hídrico severo. A pressão ecossistêmica deriva, fundamentalmente, da sinergia entre o incremento das temperaturas máximas e a intensificação de eventos extremos. No primeiro caso, o forçamento térmico eleva a evapotranspiração potencial (ETP), exaurindo a umidade do solo e reduzindo a disponibilidade hídrica efetiva. Adicionalmente, a maior frequência de secas severas, frequentemente moduladas por anomalias climáticas como o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS), impõe distúrbios cujas magnitudes transcendem a capacidade de detecção de testes de tendência linear convencionais, comprometendo a resiliência e a estabilidade funcional do bioma (Boulton et al., 2022).

O regime hídrico é caracterizado por alta volatilidade interanual e um aumento na frequência de secas extremas, consistentemente com as projeções de deterioração da resiliência amazônica. A sinergia entre o aquecimento térmico generalizado (noturno e diurno) e a intensificação das secas impõe um estresse hidrotérmico severo ao ecossistema, particularmente nas porções norte e central, onde a precipitação média é historicamente menor. Este forçamento climático interage de forma deletéria com a fragmentação da paisagem induzida pelo desmatamento ao longo do eixo da BR-163 (Lapola et al., 2023).

O aumento da ETP, impulsionado pelas altas temperaturas e agravado pela redução da umidade do solo, resulta no declínio do crescimento diamétrico e na exacerbação da mortalidade arbórea (Brienen et al., 2015). Este efeito é amplificado em bordas de floresta, onde a exposição ao vento, a baixa umidade e as altas temperaturas são maximizadas (Reddington et al., 2025). A interação entre a seca meteorológica (déficit de precipitação) e a seca fisiológica (elevada evapotranspiração) aumenta a carga de combustível fino seco no sub-bosque. Esta condição, quando associada a fontes de ignição antrópicas decorrentes da atividade agropecuária na borda, resulta no aumento abrupto da frequência e intensidade de incêndios florestais, retroalimentando a mortalidade de árvores (Brando et al., 2014).

Os resultados microclimáticos observados na Flona do Jamanxim emergem como um sintoma da transição funcional do bioma amazônico de um sumidouro para uma fonte líquida de carbono atmosférico. Historicamente, a região atuou como um dreno significativo das emissões globais de CO₂. Contudo, o aquecimento progressivo e o aumento da mortalidade arbórea, impulsionados pela interação entre eventos de seca e desmatamento, estão reduzindo a capacidade de sequestro líquida (Gatti et al., 2021; Brienen et al., 2015).

Gatti et al. (2021) demonstraram que a Amazônia Oriental já se comporta como uma fonte líquida de carbono, processo intimamente ligado à intensidade do desmatamento e às pressões antrópicas. O contínuo aumento da temperatura e a perturbação do ciclo hidrológico

colocam a floresta em um caminho potencial em direção a um ponto de inflexão (*tipping point*). A perda de espécies arbóreas sensíveis ao clima e a invasão de gramíneas inflamáveis em florestas degradadas estabelecem um ciclo de degradação que pode resultar na substituição abrupta da floresta tropical densa por um ecossistema savânico mais aberto e menos resiliente (Boulton et al., 2022).

3.3 Índices extremos climáticos

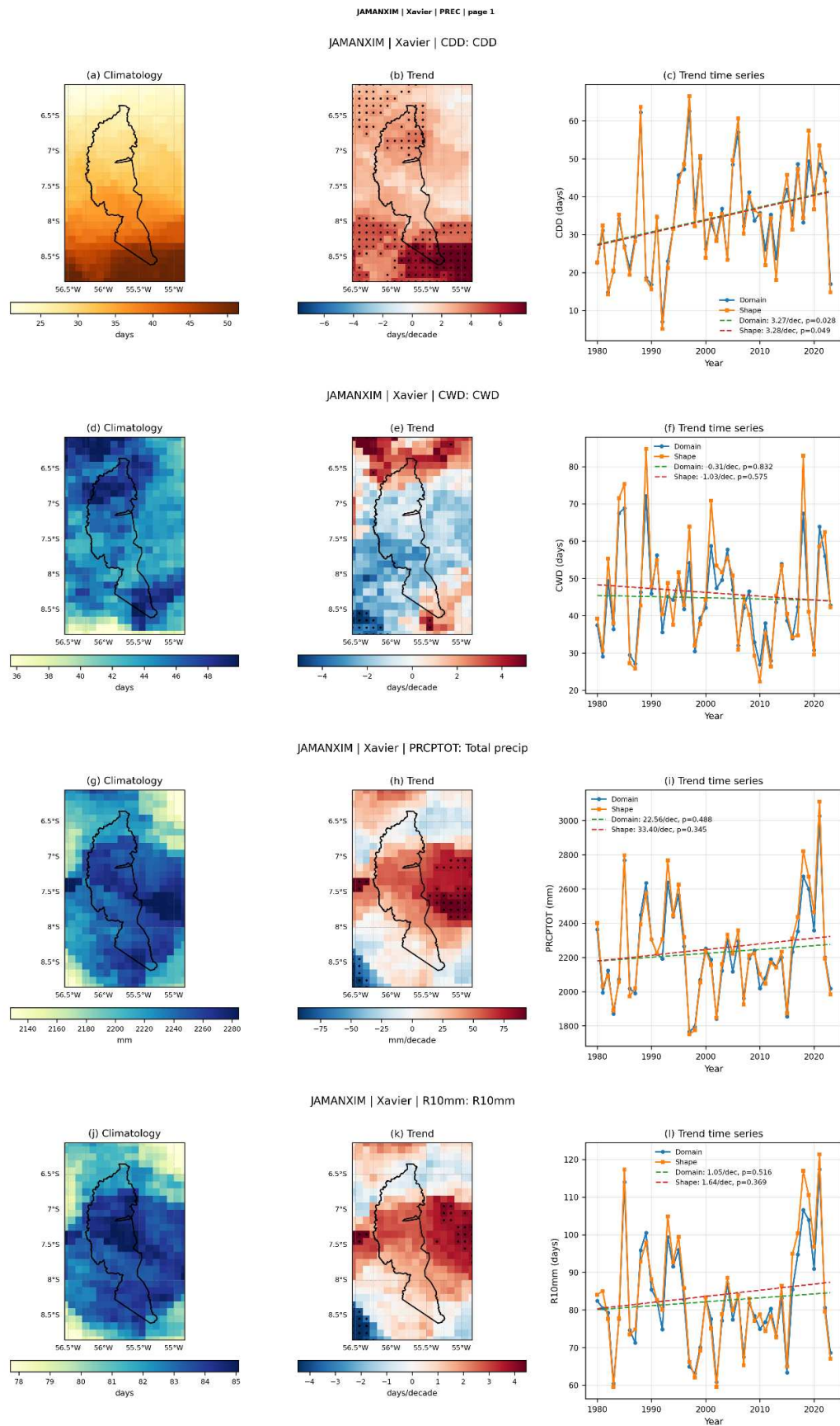
Os índices de extremos climáticos de precipitação para a área de estudo estão espacializados na Figura 4. A análise desses indicadores revela uma estabilidade predominante na Precipitação Total Anual (PRPTOT) na maior parte da Floresta Nacional (Flona), embora tenham sido identificadas divergências espaciais entre os produtos de grade utilizados.

Nos dados de Xavier et al. (2022), observa-se um núcleo de incremento pluviométrico na porção centro-leste da unidade, com tendências positivas variando entre 25 e 50 mm/década. Em contrapartida, o *dataset* de reanálise ERA5-Land indica um comportamento oposto em setores periféricos, com tendências negativas que alcançam -30 mm/década no setor sul e na borda leste da zona de amortecimento.

A discrepância entre os sinais das tendências pode ser atribuída a fatores metodológicos e físicos intrínsecos a cada plataforma de dados. O produto de Xavier et al. (2022) é construído a partir da interpolação de dados *in situ*; em regiões tropicais com baixa densidade de estações meteorológicas, esse processo pode propagar tendências locais de forma artificial sobre áreas extensas, uma limitação inerente a produtos que dependem da densidade da rede de pluviômetros. Por outro lado, o ERA5-Land utiliza um sistema de modelagem climática que integra observações de satélite e balanço físico, o qual tende a ser mais sensível a mudanças no uso do solo e aos fluxos de calor na interface superfície-atmosfera, podendo superestimar o déficit hídrico em áreas de borda florestal.

Além disso, as divergências no sinal da tendência decadal ocorrem frequentemente devido à forma como os modelos de reanálise parametrizam a convecção de mesoescala, a principal forçante de chuva na região, enquanto o dado observacional registra o acumulado direto (Muñoz-Sabater et al., 2021).

Figura 4. Índices extremos climáticos e precipitação da Floresta Nacional do Jamanxim (1980-2023)



Quanto aos índices de precipitação extrema, o ERA5-Land apontou um incremento positivo de 4 a 15 mm/década em Rx1day e Rx5day, respectivamente, sugerindo uma concentração da pluviosidade em eventos episódicos de maior magnitude energética, padrão não replicado com a mesma intensidade pelo modelo de Xavier.

Os resultados convergem para uma propensão sistemática à aridez microclimática na unidade de conservação. Observou-se um aumento robusto no número de Dias Secos Consecutivos (CDD), com incrementos decadais de 3 a 7 dias (Xavier) e 9 a 12 dias (ERA5-Land). Concomitantemente, houve retração no índice de Dias Úmidos Consecutivos (CWD), variando de -1,5 a -6 dias/década, e na frequência de eventos pluviométricos (R1mm), com reduções de -4 a -15 dias/década.

Em síntese, os dados evidenciam uma deterioração na regularidade hídrica, caracterizada pela diminuição na duração e frequência das chuvas em favor de períodos secos mais prolongados. Este cenário de estresse hídrico, quando sobreposto à fragmentação florestal e à conversão do uso da terra, potencializa a vulnerabilidade do bioma a processos de degradação e incêndios, comprometendo as funções ecossistêmicas e a manutenção do equilíbrio climático regional. Na Figura 5, são exibidos os Índices de Extremos Climáticos de Temperatura.

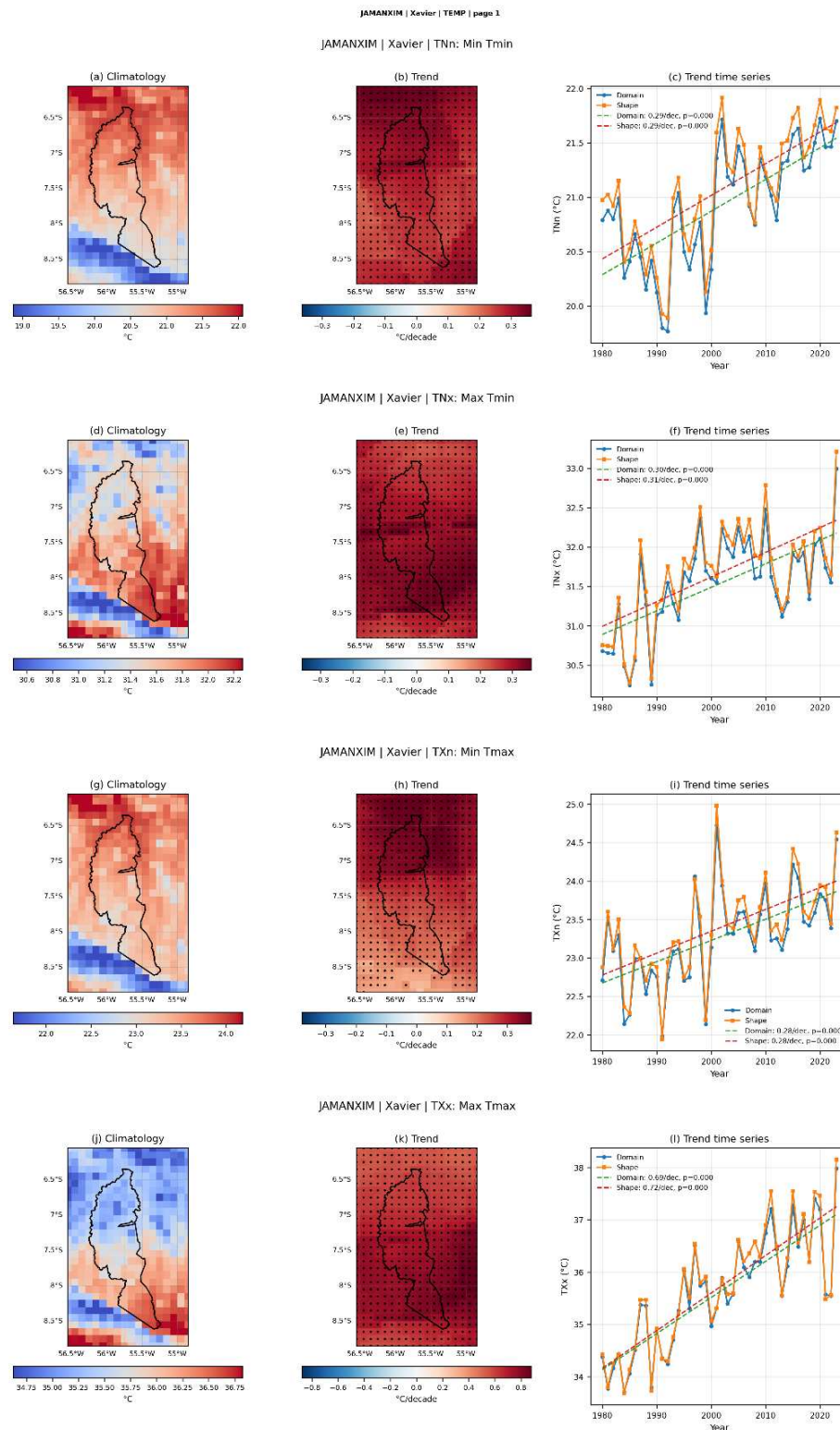
A análise das séries temporais revela um cenário de aquecimento multifacetado, com implicações críticas para o balanço hidrotérmico da Flona do Jamanxim. Os resultados do teste de *Mann-Kendall* indicam tendências positivas e estatisticamente significativas para os extremos térmicos diurnos e noturnos.

O aquecimento diurno extremo, representado pelo índice TXx, exhibe taxas de incremento variando entre 0,42 e 0,72°C/década (ERA5-Land) e porções de áreas com até 0,36°C/década (Xavier), refletindo uma resposta direta à modificação biogeofísica da superfície. Este processo, impulsionado pela supressão florestal, altera o particionamento de energia ao minimizar a evapotranspiração e maximizar o fluxo de calor sensível, resultando em um aquecimento radiativo da camada limite (Reddington et al., 2025).

Simultaneamente, os índices de temperatura mínima absoluta (TNn) e a maior temperatura mínima (TNx) exibem tendências de aquecimento consistentes, com taxas de incremento de até 0,45°C/década na base de Xavier, corroboradas pelas anomalias térmicas positivas no ERA5-Land. Este cenário indica um aquecimento sistemático das temperaturas noturnas, fenômeno particularmente deletério para a resiliência florestal. A elevação das mínimas reduz o período de recuperação térmica da vegetação, intensificando as taxas de respiração autotrófica noturna e o estresse metabólico. Tal mecanismo compromete a

produtividade primária líquida (PPL) ao elevar o consumo de carboidratos estocados, podendo converter ecossistemas historicamente resilientes em fontes líquidas de carbono para a atmosfera (Brienen et al., 2015).

Figura 5. Índices extremos de temperatura da Floresta Nacional do Jamanxim



A amplitude térmica diária (DTR) apresenta uma tendência de aumento acentuada, superando 0,50°C/década na base ERA5-Land, o que corrobora a intensificação do estresse térmico superficial. Complementarmente, o incremento nos índices de Noites Tropicais (TR20) e Dias de Verão (SU) reforça a persistência de condições térmicas extremas durante todo o ciclo anual. A sinergia entre o aquecimento anômalo e a crescente frequência de secas meteorológicas estabelece um estado de estresse hidrotérmico crítico, comprometendo o balanço hídrico do ecossistema. Esta condição é exacerbada pela fragmentação da paisagem na zona de amortecimento (*buffer*), que amplifica o efeito de borda e intensifica a dessecação da biomassa. Consequentemente, eleva-se a vulnerabilidade da floresta a distúrbios secundários, notadamente incêndios de sub-bosque em áreas sob degradação progressiva.

3.4 Área queimada na Floresta Nacional do Jamanxim

Na Figura 6, ilustram-se os dados de área queimada no período de 1985 a 2023 e, na Figura 7, a frequência de queima para o mesmo período. Os dados indicam que os picos históricos de incêndio na unidade de conservação coincidem com os eventos ENOS em suas fases quente e fria. No entanto, observa-se uma mudança de paradigma recente: embora episódios de *La Niña* (fases frias), como o triênio 2020-2022, tendam a favorecer maiores acumulados de precipitação, as extensões de área queimada mantiveram-se em níveis elevados, superando, inclusive, anos neutros anteriores (Figura 6a).

Essa persistência sugere que o componente antrópico de ignição, associado ao manejo agropecuário e à limpeza de áreas recém-desmatadas (Figura 2), em sinergia com as mudanças climáticas e eventos extremos, está se tornando o principal impulsionador de alteração no comportamento do fogo.

A dinâmica do fogo evidencia um gradiente de degradação ambiental. Em anos críticos, como 2022, os valores apontaram 8% de área queimada no *buffer* e 5% na unidade de conservação, em relação às suas respectivas áreas totais. O padrão de queima reflete efeitos de borda intensificados pela fragmentação da paisagem na periferia da Flona (Figura 2). As atividades antrópicas concentram-se na região leste do *buffer*, gerando focos de ignição que, sob condições de estresse hidrotérmico, propagam-se para o interior da unidade de conservação.

Figura 6. Área queimada anual no buffer e UC da Floresta Nacional do Jamanxim

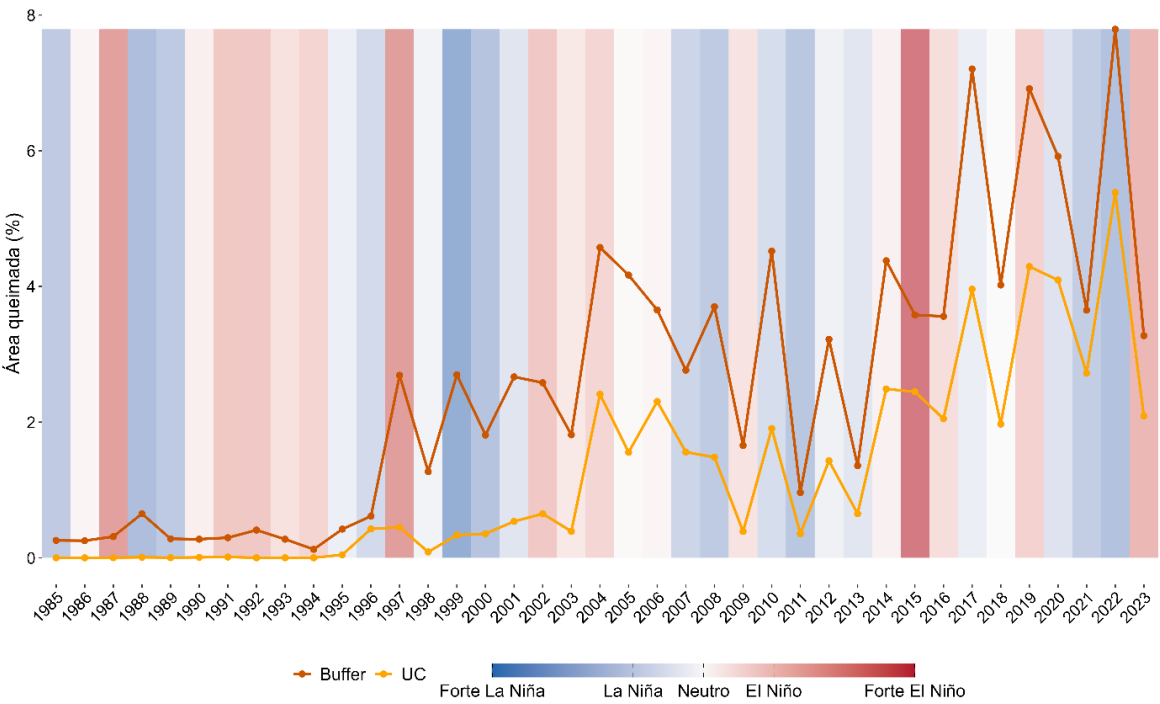
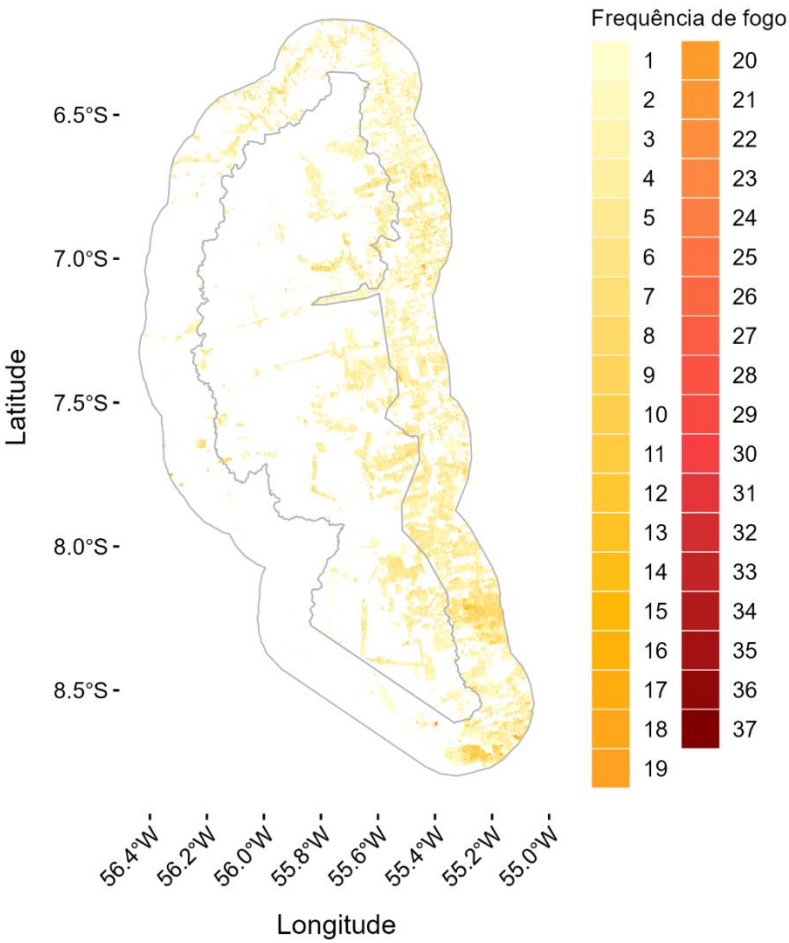


Figura 4: Frequência de queima no período de de 1985 a 2023



O aquecimento recorde e a seca extrema observados durante o *El Niño* 2015-2016 foram intensificados por anomalias térmicas de superfície que superaram os padrões históricos na bacia amazônica (Jimenez et al., 2021). Em fases quentes, a redução da precipitação e da umidade relativa do ar promove o aumento da carga de combustíveis finos (biomassa seca), favorecendo a ocorrência e a propagação do fogo (Aragão et al., 2018).

Ao observar o gráfico da Figura 6, nota-se um aumento da área queimada a partir de 2017, com picos em 2019 a 2022 na UC. Em contraste com as décadas de 1980 e 1990, caracterizadas por incêndios esporádicos e de baixa magnitude, a última década estabeleceu um novo regime de fogo na Flona do Jamanxim. A recorrência do fogo em intervalos curtos impede a regeneração natural, alterando a estrutura fitofisionômica da floresta e perpetuando um ciclo de vulnerabilidade que caracteriza a “degradação resiliente”.

Os indicadores de área queimada reforçam que o clima, isoladamente, não explica a dinâmica recente; é a sinergia entre eventos climáticos extremos e a ineficiência no controle das fontes de ignição antrópica que impulsionam a trajetória de degradação ecossistêmica. A distribuição espacial da frequência de fogo (1985-2023) revela um padrão assimétrico de pressão, com maior concentração de cicatrizes nos setores leste e sudeste, adjacentes à rodovia BR-163. A identificação de áreas com recorrência superior a 15-20 eventos ao longo do período analisado (Figura 7) indica a ocorrência de um processo de savanização funcional. Nesse estado, a alta frequência de fogo limita a recuperação da biomassa florestal e favorece a substituição por gramíneas altamente inflamáveis, estabelecendo um ciclo de retroalimentação positiva.

Em termos ambientais, a diminuição da reciclagem de umidade atmosférica compromete a formação de precipitação convectiva local, intensificando a aridez microclimática e elevando o déficit de pressão de vapor (DPV). Esse conjunto de *feedbacks* torna a vegetação remanescente mais suscetível ao estresse hídrico. Do ponto de vista biogeoquímico, a Flona do Jamanxim configura-se como um *hotspot* de emissões de gases de efeito estufa na Amazônia Oriental. Incêndios em florestas densas podem liberar, de forma imediata, entre 15 e 50 t C ha⁻¹. A combustão da biomassa viva e da serrapilheira, associada à decomposição de necromassa pós-fogo, gera pulsos substanciais de carbono para a atmosfera, comprometendo o balanço regional de carbono e as metas climáticas.

A manutenção da integridade climática da unidade depende do controle rigoroso das fontes de ignição. Na região, o fogo não é um componente ecológico natural; cada evento reduz a resiliência da floresta e intensifica efeitos de borda, facilitando a propagação para áreas previamente intactas. Nesse contexto, a implementação de estratégias de Manejo Integrado do

fogo (MIF), aliada ao fortalecimento da fiscalização nas zonas de amortecimento, é essencial para evitar a aproximação de um *tipping point* ecológico, no qual a perda da cobertura florestal se torne irreversível.

3.5 Impactos na biodiversidade da Floresta Nacional do Jamanxim em decorrência das mudanças climáticas, dinâmica do fogo e interações biosfera-atmosfera e uso da terra

A Floresta Nacional do Jamanxim, predominantemente caracterizada pela fitofisionomia de Floresta Ombrófila Densa Submontana, constitui um reservatório genético crucial para a integridade do Corredor Ecológico Tapajós-Xingu. O fomento à pesquisa científica na unidade, diretriz legal estabelecida pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Brasil, 2000), configura-se como uma estratégia essencial face às crescentes pressões antrópicas e à elevada riqueza taxonômica da região.

Inserida no interflúvio Tapajós-Xingu, a unidade abrange uma área reconhecida pelas altas taxas de endemismo e diversidade de mastofauna, com notório destaque para a ordem *Primates* (Buss et al., 2017). Devido à acentuada exigência ecológica e à vulnerabilidade à fragmentação de *habitats*, essas espécies atuam como bioindicadores robustos da integridade ecossistêmica e da conectividade florestal remanescente, parâmetros que se encontram diretamente ameaçados pela conversão do uso da terra nas adjacências da unidade (ICMBio, 2018).

O monitoramento da variabilidade fenológica é imperativo para avaliar a capacidade de resiliência dos ecossistemas sob estresse climático. A análise temporal dessas dinâmicas permite compreender a plasticidade das espécies, projetando como diferentes fitofisionomias responderão às anomalias climáticas em escalas regionais. A fim de proteger a funcionabilidade dos ecossistemas e sua capacidade de prover serviços, faz-se necessário uma gestão equilibrada, baseada no uso sustentável das florestas e dos recursos fornecidos, visando à mitigação dos impactos das alterações climáticas. A garantia da prestação de serviços ecossistêmicos pode exigir que comunidades residentes na unidade de conservação ou em seu entorno renunciem a determinados tipos de uso do solo em prol do bem comum, adotando comportamentos sustentáveis ou ações preventivas.

Os resultados demonstram que as variáveis térmicas atuam como os principais indutores das alterações climáticas locais. O aquecimento generalizado, particularmente das temperaturas máximas, configura um estressor ambiental primário que, quando associado à fragmentação florestal, potencializa a mortalidade arbórea e a vulnerabilidade a incêndios florestais. Esse

cenário reduz a resiliência da floresta e sua capacidade de prover serviços ecossistêmicos reguladores.

A Flona do Jamanxim localiza-se em uma região de intensa pressão antrópica, onde a supressão e a degradação florestal alteram o balanço de energia superficial e acentuam os extremos térmicos na borda meridional da Amazônia. Na Amazônia Oriental, o incremento na frequência de dias secos consecutivos (CDD) potencializa a ocorrência de incêndios florestais de grande magnitude (Aragão et al., 2018). O sinergismo entre o estresse hídrico severo e o acúmulo de material combustível reduz a resiliência ecossistêmica, tornando a unidade vulnerável a incêndios de sub-bosque. Tais eventos comprometem criticamente os estoques de biomassa aérea e os processos de sucessão e regeneração natural da vegetação.

A perda de resiliência na Flona do Jamanxim reflete uma trajetória crítica do bioma amazônico, na qual o sinergismo entre aquecimento global, desmatamento e fogo empurra os ecossistemas para seus limiares de regeneração natural. Conforme demonstrado por Boulton et al. (2022), mais de 75% da floresta enfrenta um processo de desaceleração crítica, o que dificulta a recuperação após distúrbios como secas e incêndios.

Na UC, essa fragilidade é evidenciada pela persistência de altos índices de queima durante o triênio *La Niña* (2020-2022), fase que deveria favorecer a supressão natural do fogo pelo aumento da umidade. Esse comportamento corrobora a tese de Lapola et al. (2023), indicando que a degradação antrópica e o efeito de borda na zona de amortecimento consolidaram-se como motores de ignição independentes da variabilidade climática sazonal.

Essa dinâmica é exacerbada por um forçamento térmico local com taxas de aquecimento superiores a 1.0°C por década em áreas específicas. A recorrência pirogênica estabelece um ciclo de retroalimentação positiva, no qual a perda de dossel e a invasão de gramíneas inflamáveis podem resultar na substituição irreversível da floresta densa por fisionomias savânicas degradadas. Tal cenário valida a transição da região de um sumidouro histórico para uma fonte líquida de carbono e sinaliza, em consonância com Coutinho et al. (2025), que o setor oriental da Amazônia está ultrapassando seu ponto de não retorno ecológico (*tipping point*) de forma acelerada.

Diante da convergência entre a pressão histórica no Arco do Desmatamento e a crescente severidade climática, a análise das anomalias térmicas e pluviométricas fundamenta a urgência de estratégias integradas de adaptação e mitigação. Entre elas, sugere-se:

- **Mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA):** Implementação de incentivos econômicos que valorizem a manutenção da floresta em pé, reconhecendo o papel

vital da Flona do Jamanxim na regulação dos “Rios Voadores” e na segurança hídrica do Centro-Sul brasileiro.

- **Restauração Ativa da Zona de Amortecimento:** Criação de corredores florestais no *buffer* para auxiliar na mitigação do efeito de borda e atuar como barreiras físicas contra a propagação de incêndios de sub-bosque.
- **Políticas Públicas:** Incorporação de limiares críticos de resiliência climática no licenciamento ambiental de grandes projetos logísticos, como a ferrovia EF-170 (Ferrogrão), visando desacoplar o desenvolvimento regional da degradação ecossistêmica irreversível.

4 Considerações finais

A investigação geoespacial e climatológica da Floresta Nacional (Flona) do Jamanxim indica que esta unidade de conservação de uso sustentável está submetida a um estresse ambiental sinérgico e multidimensional. Esse cenário compromete a integridade ecológica do ecossistema e acelera sua vulnerabilidade frente aos limiares críticos da Amazônia Oriental.

A análise do uso e ocupação da terra confirmou uma trajetória de fragilização do ordenamento territorial na qual a criação da Flona não foi suficiente para conter a expansão da fronteira agropecuária. O *buffer*, sob a influência direta da rodovia BR-163, registrou a substituição maciça da formação natural, atuando como o principal eixo de propagação de distúrbios. A persistência de elevadas taxas de área queimada, com picos de 50.000 hectares anuais no interior da unidade de conservação, evidencia o transbordamento da pressão pirogênica para a Flona, sinalizando a ineficácia das políticas de comando e controle no combate a atividades ilegais.

O componente climático reforça este quadro de vulnerabilidade. O teste de *Mann-Kendall* demonstrou um aquecimento estatisticamente significativo e generalizado, particularmente nas temperaturas máximas. A Temperatura Máxima Anual Mais Quente (TXx) exhibe um aumento acentuado, atingindo picos superiores a 1.0 °C por década em áreas específicas, o que evidencia o efeito do desmatamento na exacerbação do aquecimento microclimático. Simultaneamente, a estabilidade na precipitação total contrasta com o aumento significativo na duração dos períodos secos (CDD), impondo um déficit hidrotérmico severo à vegetação.

Em última instância, a combinação do aquecimento extremo com o prolongamento das secas sobre uma matriz florestal fragmentada eleva a mortalidade arbórea, reduz a capacidade de sequestro de carbono e aumenta o risco de incêndios florestais. Tal sinergia de pressões

ambientais e antrópicas insere a Flona do Jamanxim em uma zona de perda acentuada de resiliência amazônica. A manutenção desta unidade de conservação e, por extensão, dos serviços ecossistêmicos regionais, requer não apenas o reforço da fiscalização, mas a implementação de um modelo de gestão territorial que concilie o objetivo de uso sustentável da floresta com a prioridade intransigente de contenção do desmatamento e do uso do fogo.

5 Referências

- Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., ..., & Saatchi, S. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, 9(1), 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Arraut, J. M., Nobre, C., Barbosa, H. M. J., Obregon, G., & Marengo, J. (2012). Aerial rivers and lakes: Looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and the subtropical Americas. *Journal of Climate*, 25(2), 543-556. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4189.1>
- Boulton, C. A., Lenton, T. M., & Boers, N. (2022). Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*, 12, 271-278. <https://www.doi.org/10.1038/s41558-022-01287-2>
- Brando, P. M., Balch, J. K., Nepstad, D. C., Soares-Filho, B. S. (2014). Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 111(17), 6347-6352. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305499111>
- Brasil. (2000). **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm
- Brasil. (2006). *Decreto de 13 de fevereiro de 2006*. Cria a Floresta Nacional do Jamanxim, no Município de Novo Progresso, Estado do Pará, e dá outras providências. <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/amazonia/lista-de-ucs/flona-do-amana/arquivos/amana.pdf>
- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., ..., & Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344-348. <https://www.doi.org/10.1038/nature14283>
- Brito, R., & Castro, E. (2018). Desenvolvimento e conflitos na Amazônia: um olhar sobre a colonialidade dos processos em curso na BR-163. *Revista NERA*, 21(42), 51-73. <http://doi.org/10.47946/rnera.v0i42.5679>
- Buss, G., Ravetta, A. L., Fialho, M. S., Rossato, R. S., Sampaio, R., Printes, R. C., ..., & Jerusalinsky, L. (2017). Primatas do Parque Nacional do Jamanxim/PA: riqueza, distribuição e ameaças. *Biodiversidade Brasileira*, 7(2), 34-46. <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v7i2.719>

Climate and Ocean Variability, Predictability and Change. (2020, 6 out.). *ETCCDI climate change indices*. <https://etccdi.pacificclimate.org/>

Copernicus Climate Change Service. (2019). *ERA5-land hourly data from 1950 to present*. Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>

Coutinho, S. M., Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Rangel, E. F., Bustamante, M., Haddad, E. A., ..., & Feres, J. (2025). Climate research towards sustainable development: contributions of the Brazilian Science. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 97(4), e20250437. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520250437>

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2024). *Forecast charts and data*. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts#:~:text=We%20provide%20global%20forecasts%2C%20climate%20reanalyses%20and%20specific,how%20the%20weather%20is%20most%20likely%20to%20evolve.>

Fearnside, P. M. (2015, 2 mar.). *Rios voadores e a água de São Paulo 4: as razões da seca de 2014-2015*. https://amazoniareal.com.br/rios-voadores-e-a-agua-de-sao-paulo-4-as-razoes-da-seca-de-2014-2015/?utm_source=chatgpt.com

Fearnside, P. M. (2024). Amazon forest maintenance as a source of environmental services. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 80(1), 1-20. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652008000100006>

Gama, L. H. O. M., Almeida, A. S., Paiva, P. F. P. R., Silva Júnior, O. M., & Nahum, J. S. (2023). Cenários futuros de desmatamento na Floresta Nacional do Jamanxim-PA. *Revista Brasileira de Cartografia*, 75(4). <https://doi.org/10.14393/rbcv75n0a-62835>

Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Domingues, L. G., Cassol, H. L. G., ..., & Neves, R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867), 384-389. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Gusmão, L. H. A., Sombra, D. A., Messias, C. G., & Camilotti, V. L. (2024). Florestas nacionais na Amazônia brasileira: desmatamento e pressões de uso da terra (2018-2021). *Ra'ega - O Espaço Geográfico em Análise*, 60(1), 9-44. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v60i0.91638>

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. (2010). *Plano de manejo da Floresta Nacional do Jamanxim, localizada no estado do Pará*. Curitiba: ICMBio. https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/amazonia/lista-de-ucs/flona-do-jamanxim/arquivos/jamanxim_planejamento.pdf?utm_source=chatgpt.com

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. (2018). *Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção*. Brasília: ICMBio. <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-diversas/livro-vermelho/livro-vermelho-da-fauna-brasileira-ameacada-de-extincao-2018>

Instituto Socioambiental. (2024). *Unidades de Conservação no Brasil*. São Paulo: ISA. <https://uc.socioambiental.org>

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2023). *Estimativa de desmatamento na Amazônia Legal para 2023 é de 9.001 km²*. https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/estimativa-de-desmatamento-na-amazonia-legal-para-2023-e-de-9-001-km2/2023_1020_Nota_tecnica_Estimativa_Taxa_2023_SEI.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The physical science basis*. Cambridge: IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Alves, L. M., Sulca, J. C., Takahashi, K., Ferrett, S., & Collins, M. (2021). The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 41(7), 3761-3780. <https://doi.org/10.1002/joc.6453>

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. New York, NY: Charles Griffin e Company.

Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., ... & Walker, W. S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379(6630), eabp8622. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>

Makarieva, A. M., & Gorshkov, V. G. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 1013-1033. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MapBiomass. (2024). *Mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil entre 1985 a 2022*. (Coleção 8). https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/08/FACT_MapBiomass_Mapeamento-Anual-Cobertura_Colecao8_31.pdf

Marcuartú, B. C., Coelho, A. S., Maneschy, R. Q., & Canto, O. (2017). Uso e cobertura da terra na Floresta Nacional do Jamanxim, Novo Progresso, Pará: considerações sobre sua desafetação. *Estudos Geográficos*, 15(2), 35-56. <https://doi.org/10.5016/estgeo.v15i2.12569>

Marengo, J. A. (2007). *Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*. 2.ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. (Série Biodiversidade, 26). http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Livro2_completo.pdf

Marengo, J. A. (2014). O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, (103), 25-32. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32>

- Marengo, J. A., Espinoza, J.-C., Fu, R., Muñoz, J. C. J., Alves, L. M., Rocha, H. R., & Schöngart. (2021a). Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydro meteorology in the Amazon region. In: Science Panel for the Amazon. *Amazon assessment report 2021* (pp. 2-33). New York: SPA. [https://eng-ar21.sp-amazon.org/211112%20AR21%20Chapter%2022%20\(English\).pdf](https://eng-ar21.sp-amazon.org/211112%20AR21%20Chapter%2022%20(English).pdf)
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Leal, K. R. D., Broedel, E., Seluchi, M. E., ..., & Bender, F. (2021b). Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019-2020: Characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>
- Marenzi, R. C., & Longarete, C. (2018). As áreas protegidas no Brasil e os serviços ecossistêmicos ante as inundações: finalidade ou casualidade? *Cuadernos de Geografia*, 27(2), 313-322. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n2.65322>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ..., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349-4383. https://essd.copernicus.org/pdf_redirect.html
- Nobre, P., Matagutti, M., Urbano, D. F., Almeida, R. A. F., & Giarolla, E. (2009). Amazon deforestation and climate change in a coupled model simulation. *Journal of Climate*, 22(21), 5686-5697. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2757.1>
- Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., & Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Science (PNAS)*, 113(39), 10759-10768. <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1605516113#:~:text=Land%2Duse,conflict>
- Reddington, C. L., Smith, C., Butt, E. W., Baker, J. C. A., Oliveira, B. F. A., Yamba, E. I., & Spracklen, D. V. (2025). Tropical deforestation is associated with considerable heat-related mortality. *Nature Climate Change*, 15, 992-999 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02411-0>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., ..., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 108(24), 9899-9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Amer. Statist. Assoc.*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Silva, C. V. J., Aragão, L. E. O. C., Barlow, J., Espírito-Santo, F., Young, P. J., Anderson, L. O., ..., & Xaud, H. A. M. (2018). Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 373(1760), 20180043. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0043>
- Souza, Jr, C. M., Siqueira, J. V., Sales, M. H., Fonseca, A.V., Ribeiro, J.G.; Numata, I., ..., & Barlow, J. (2013). Ten-year landsat classification of deforestation and forest degradation in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 5, 5493-5513. <https://doi.org/10.3390/rs5115493>

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., ..., & Schellnhuber, H. J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>

World Bank. (2024). Land area (sq. km) - Qatar, Lebanon. World Development Indicators. Washington, DC: World Bank. <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.TOTL.K2>

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961-2020). *International Journal of Climatology*, 42(16), 8390-8404. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... & Zhai, P. M. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Climate Change*, 2(6), 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

ARTIGO 3 – Dinâmica do fogo, conversão da cobertura natural e perda potencial de serviços ecossistêmicos em Unidades de Conservação federais brasileiras

Resumo: As mudanças no uso e cobertura da terra, associadas à intensificação dos extremos climáticos, têm ampliado a vulnerabilidade ao fogo em ecossistemas tropicais e Unidades de Conservação. Este estudo avaliou a dinâmica do fogo, a conversão da vegetação natural e a perda potencial de serviços ecossistêmicos nos Parques Nacionais Chapada Diamantina e Grande Sertão Veredas, e na Floresta Nacional do Jamanxim, considerando o interior das unidades e *buffers* de 20 km. Foram utilizados dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas, áreas queimadas do MapBiomas Fogo, focos de calor do FIRMS/NASA, variáveis climáticas e índices de extremos climáticos. A valoração dos serviços ecossistêmicos foi realizada por transferência de benefícios, com base na estrutura conceitual TEEB e na abordagem de valoração por unidade de área de Costanza et al. (1997), comparando os anos de 1985 e 2023. Os resultados indicam que a dinâmica do fogo varia entre os biomas e reflete a interação entre sazonalidade, redução da precipitação, tipo de vegetação, fragmentação da paisagem e pressão antrópica. O Grande Sertão Veredas apresentou ampla recorrência de fogo em formações savânicas e campestres; a Chapada Diamantina apresentou queima mais localizada em formações abertas; e Jamanxim destacou-se pela maior vulnerabilidade à degradação florestal, com incêndios concentrados em bordas e áreas antropizadas. As maiores perdas potenciais de serviços ecossistêmicos ocorreram na Floresta Nacional do Jamanxim, especialmente no *buffer*. Os resultados reforçam a necessidade de integrar monitoramento climático, o controle da conversão da vegetação nativa, o manejo do fogo e a conservação dos serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Queimadas; Valoração ambiental.

Abstract: Land-use and land-cover changes, combined with the intensification of climate extremes, have increased fire vulnerability in tropical ecosystems and protected areas. This study assessed fire dynamics, natural vegetation conversion, and the potential loss of ecosystem services in Chapada Diamantina National Park, Grande Sertão Veredas National Park, and Jamanxim National Forest, considering both the protected areas and their 20-km buffer zones. The study utilized MapBiomas land-use and land-cover data, MapBiomas Fire burned-area products, FIRMS/NASA active fire detections, climate variables, and climate extreme indices. Ecosystem service valuation was performed through benefit transfer, based on the TEEB conceptual framework and the area-based valuation approach proposed by Costanza et al. (1997), comparing 1985 and 2023. The results indicate that fire dynamics vary across biomes and reflect interactions among seasonality, reduced precipitation, vegetation type, landscape fragmentation, and anthropogenic pressure. Grande Sertão Veredas showed widespread fire recurrence in savanna and grassland formations; Chapada Diamantina exhibited more localized burning in open vegetation formations; and Jamanxim stood out as the area most vulnerable to forest degradation, with fires concentrated along forest edges and anthropized areas. The greatest potential losses of ecosystem services occurred in Jamanxim National Forest, especially in its buffer zone. These findings reinforce the need to integrate climate monitoring, control of native vegetation conversion, fire management, and ecosystem service conservation.

Keywords: Climate change; Burned area; Environmental valuation.

1 Introdução

A intensificação das mudanças no uso e cobertura da terra, combinada aos efeitos das mudanças climáticas, tem ampliado a vulnerabilidade ao fogo dos ecossistemas tropicais. A conversão de formações naturais em áreas agropecuárias, a fragmentação da paisagem e a expansão de atividades antrópicas no entorno de áreas protegidas modificam a disponibilidade e a continuidade dos combustíveis vegetais. Paralelamente, secas prolongadas, aumento da temperatura do ar e a irregularidade das chuvas favorecem condições meteorológicas críticas para a ignição e a propagação de incêndios, visto que essas condições elevam o risco de fogo (Costa, 2020).

Esses processos tornam-se particularmente relevantes em Unidades de Conservação (UCs), onde o fogo pode comprometer a biodiversidade, os estoques de carbono, os recursos hídricos e os serviços ecossistêmicos. No contexto brasileiro, comparar Unidades de Proteção Integral, como Parques Nacionais, e Unidades de Uso Sustentável, como Florestas Nacionais, permite compreender como diferentes categorias de manejo respondem à interação entre uso da terra, clima e regimes de fogo.

Teixeira et al. (2017) destacam que, no Brasil, as Unidades de Conservação constituem um instrumento essencial para a implementação de políticas públicas voltadas à preservação ambiental e ao desenvolvimento sustentável. Com objetivos diversos, essas áreas protegidas assumem um papel estratégico no debate sobre a conservação da biodiversidade, o ordenamento territorial e controle do desmatamento, especialmente em regiões submetidas a intensas pressões antrópicas.

As Unidades de Conservação de Proteção Integral têm como objetivo principal a preservação dos ecossistemas naturais, buscando minimizar a interferência humana direta. Nessas áreas, o uso dos recursos naturais é permitido apenas de forma indireta, sendo vedadas práticas que envolvam coleta, consumo, dano ou destruição dos componentes ambientais (Brasil, 2000).

Por sua vez, as Unidades de Conservação de Uso Sustentável são instituídas com a finalidade de compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável dos recursos naturais, assegurando às comunidades tradicionais o acesso a esses recursos de maneira socialmente justa, economicamente viável e ecologicamente correta (Brasil, 2000). Dessa forma, enquanto as unidades de Proteção Integral priorizam a manutenção dos processos ecológicos com baixa intervenção antrópica, as unidades de Uso Sustentável buscam integrar conservação ambiental e uso racional do território.

Entre os principais objetivos das UCs está a preservação da biodiversidade, componente essencial para a manutenção dos processos ecológicos, da estabilidade dos ecossistemas e das contribuições da natureza ao bem-estar humano. A biodiversidade sustenta funções fundamentais, como regulação climática, ciclagem de nutrientes, conservação dos solos, polinização, provisão de água e manutenção de habitats, sendo sua perda uma ameaça crescente à integridade ecológica e à segurança socioambiental.

Evidências recentes indicam que as mudanças no uso da terra constituem um dos principais vetores diretos da perda de biodiversidade em escala global, intensificando a degradação de ecossistemas e alterando a composição das comunidades biológicas (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES], 2019; Jaureguiberry et al., 2022; Keck et al., 2025).

Nos biomas brasileiros, o fogo constitui uma das principais pressões ambientais associadas às atividades antrópicas em UCs. A expansão agropecuária, impulsionada pela crescente demanda por produtos agrícolas e pecuários, tem intensificado as mudanças no uso e cobertura da terra e ampliado a exposição dos ecossistemas naturais ao risco de incêndios florestais. Embora o fogo seja historicamente utilizado em práticas sazonais de manejo do solo, como a limpeza de áreas, a renovação de pastagens e o preparo para a implantação de culturas, seu uso inadequado especialmente sob condições climáticas favoráveis à propagação das chamas, pode resultar em incêndios de grandes proporções. Esses eventos comprometem a biodiversidade, os serviços ecossistêmicos e a integridade ambiental das áreas protegidas (Costa, 2020).

As UCs federais desempenham papel estratégico na conservação da biodiversidade, na regulação climática, na proteção dos recursos hídricos e na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais. No entanto, mesmo sob proteção legal, essas áreas têm sido crescentemente expostas a pressões ambientais decorrentes das mudanças no uso e cobertura da terra, da expansão de atividades antrópicas em suas zonas de influência e da intensificação de eventos climáticos extremos.

Em escala global, a perda de biodiversidade e a degradação dos ecossistemas têm sido associadas principalmente a vetores como mudanças no uso da terra, exploração direta dos recursos naturais, mudanças climáticas e poluição, comprometendo as contribuições da natureza para o bem-estar humano (IPBES, 2019; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023).

Nas últimas décadas, alterações nos padrões hidroclimáticos, como o aumento da temperatura do ar, o prolongamento da estação seca, redução da umidade do solo e maior

recorrência de secas severas, têm favorecido condições ambientais propícias à ignição e à propagação do fogo.

O IPCC destaca que os eventos extremos de temperatura, seca e precipitação vêm se intensificando em diferentes regiões do planeta, com efeitos diretos sobre os ecossistemas terrestres e sobre os riscos associados ao fogo (IPCC, 2021, 2022, 2023). Paralelamente, processos como desmatamento, fragmentação florestal, expansão agropecuária e conversão da vegetação nativa modificam a estrutura da paisagem, alteram a continuidade e a disponibilidade de material combustível e intensificam as fontes de ignição antrópica, promovendo mudanças significativas nos regimes de fogo.

Em ecossistemas tropicais, especialmente na Amazônia e no Cerrado, a interação entre clima, uso da terra e fogo tem contribuído para o aumento da vulnerabilidade ambiental, inclusive em territórios protegidos. Na Amazônia, as florestas úmidas originalmente apresentam baixa inflamabilidade sob condições naturais, entretanto, a fragmentação, o efeito de borda, desmatamento e as secas extremas reduzem a umidade da biomassa e favorecem a entrada e a propagação do fogo.

No Cerrado, embora o fogo integre historicamente os processos ecológicos de formações savânicas e campestres, alterações na frequência, intensidade, sazonalidade e extensão dos incêndios podem comprometer a regeneração da vegetação, conservação da biodiversidade e a estabilidade dos serviços ecossistêmicos (Pivello, 2011; Segura-Garcia et al., 2025).

Apesar dos avanços no monitoramento climático e ambiental, especialmente com o uso de séries temporais de sensoriamento remoto, ainda permanecem lacunas relevantes acerca da interação integrada entre variabilidade climática, extremos climáticos, mudanças no uso e cobertura da terra e a dinâmica espaço-temporal do fogo em Unidades de Conservação federais (Kumar et al., 2022; Dutra et al., 2023; MapBiomas, 2025).

O MapBiomas Fogo disponibiliza séries históricas de áreas queimadas no Brasil, permitindo avaliar cicatrizes de fogo, frequência de queima e recorrência em diferentes biomas e categorias territoriais (MapBiomas, 2025). Contudo, ainda é necessário avançar na compreensão de como esses processos afetam a capacidade das áreas protegidas de sustentar serviços ecossistêmicos fundamentais, como sequestro e armazenamento de carbono, estabilidade hidrológica, conservação da biodiversidade, proteção dos solos e regulação climática regional e global.

Além de identificar as mudanças ambientais e a dinâmica do fogo, torna-se necessário traduzir parte desses impactos em uma métrica capaz de evidenciar a importância econômica e socioambiental dos serviços ecossistêmicos mantidos pelas áreas protegidas.

Nesse sentido, a valoração ambiental constitui uma ferramenta complementar para estimar o valor potencial associado às funções ecológicas desempenhadas pelas diferentes classes de uso e cobertura da terra. Ao atribuir coeficientes monetários aos serviços ecossistêmicos, essa abordagem permite comparar a contribuição relativa das formações naturais e das áreas antrópicas, bem como estimar perdas potenciais associadas à conversão da vegetação nativa. Assim, a valoração não representa o preço de mercado da natureza, mas uma aproximação do valor dos benefícios ecológicos potencialmente comprometidos pela transformação da paisagem.

Neste estudo, essa perspectiva foi incorporada com base na estrutura conceitual do TEEB (Convention on Biological Diversity, 2018) e da abordagem de transferência de benefícios proposta por Costanza et al. (1997), permitindo relacionar as mudanças no uso e cobertura da terra à perda potencial de serviços ecossistêmicos nas unidades de conservação e em seus respectivos *buffers*.

Nesse contexto, torna-se essencial analisar, de forma integrada, a dinâmica do fogo, as transformações no uso e cobertura da terra e a perda potencial de serviços ecossistêmicos em UCs. Essa perspectiva é particularmente relevante para os Parques Nacionais da Chapada Diamantina e Grande Sertão Veredas, e a Floresta Nacional do Jamanxim, unidades inseridas em contextos ecológicos, climáticos e territoriais distintos, mas submetidas a diferentes graus de pressão antrópica, vulnerabilidade ao fogo e conversão da cobertura natural.

Este estudo teve como objetivo avaliar como as mudanças no uso e cobertura da terra, a variabilidade climática e os extremos climáticos influenciam a dinâmica do fogo nestas unidades de conservação, bem como estimar a perda potencial de serviços ecossistêmicos associada à conversão da cobertura natural para usos antrópicos nessas unidades e em seus respectivos *buffers*.

O fogo constitui um importante agente ecológico em determinados ecossistemas naturais, especialmente em formações savânicas e campestres do Cerrado, onde participa da dinâmica da vegetação, da ciclagem de nutrientes e da estruturação das comunidades. Entretanto, quando seu regime é alterado em frequência, intensidade, extensão ou sazonalidade, o fogo deixa de atuar como componente ecológico funcional e passa a representar um vetor de degradação ambiental (Pivello et al., 2021; Segura-Garcia et al., 2025).

Esse processo é intensificado pela combinação entre mudanças climáticas, eventos extremos de precipitação, seca e calor, desmatamento, fragmentação da paisagem e expansão de atividades agropecuárias, que ampliam a inflamabilidade da vegetação, a disponibilidade de combustível seco e as fontes de ignição antrópica (Brando et al., 2014; Pivello et al., 2021; Ribeiro et al., 2024).

Nesse cenário, as UCs federais desempenham papel estratégico na conservação da biodiversidade, manutenção dos ciclos biogeoquímicos, regulação climática e na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais. Contudo, a proteção legal não elimina a vulnerabilidade das áreas. Mesmo territórios protegidos têm sido afetados pela recorrência de incêndios, pressão de uso da terra em seus limites e zonas de influência, e pela intensificação de extremos climáticos capazes de alterar os regimes naturais de fogo. Assim, compreender a dinâmica do fogo em Unidades de Conservação exige considerar de forma integrada, os condicionantes climáticos, ecológicos e antrópicos que controlam sua ocorrência e propagação.

A integração entre climatologia, extremos climáticos, uso e cobertura da terra e dinâmica do fogo, além de avançar em relação às abordagens setoriais, oferece uma leitura sistêmica dos processos que determinam a vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas. Essa abordagem possibilita identificar padrões espaciais e temporais de queima, áreas de recorrência crítica, relações com a conversão da vegetação nativa e potenciais impactos ambientais e sociais.

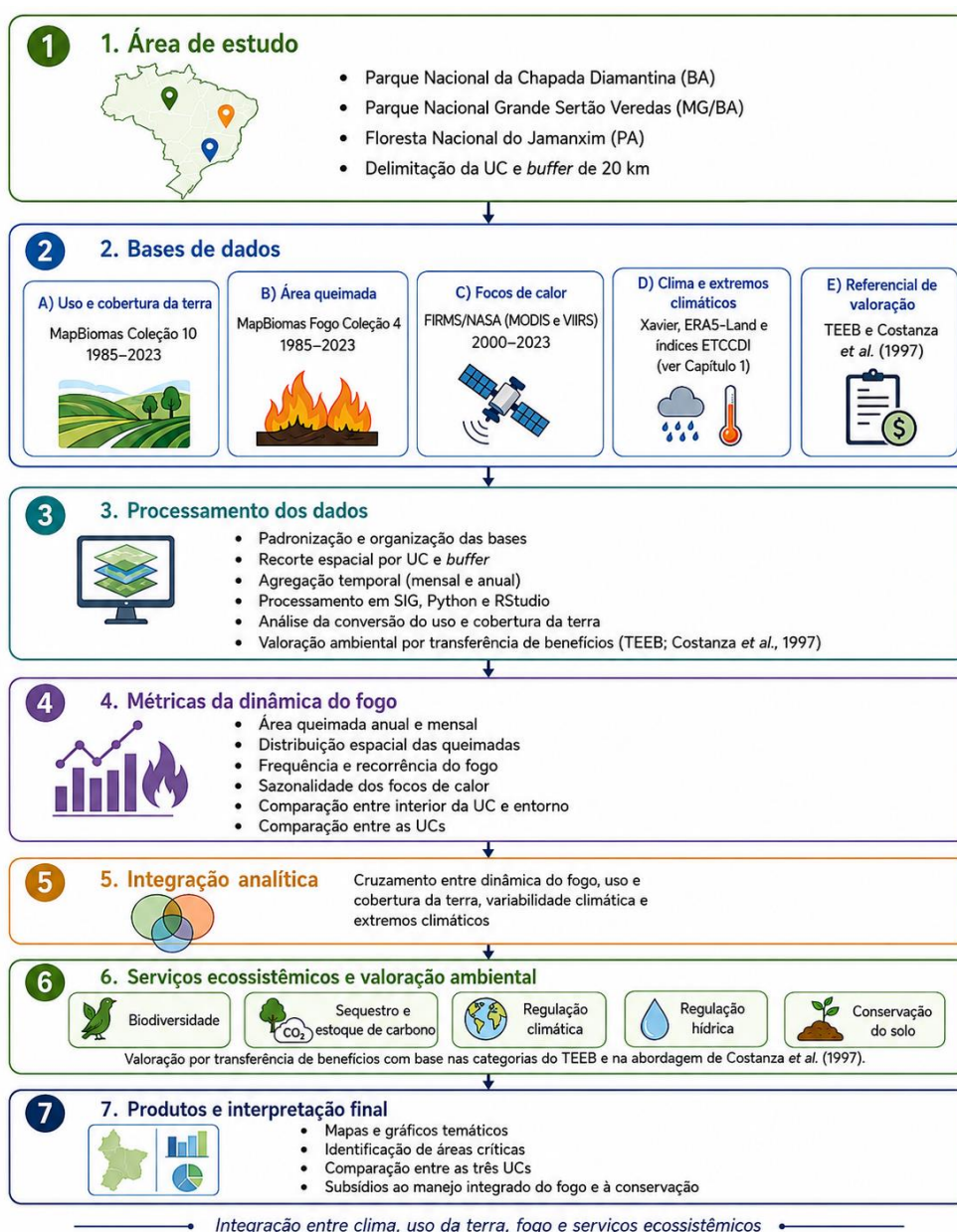
Além de sua relevância científica, este estudo apresenta aplicação direta no planejamento ambiental e na formulação de políticas públicas voltadas ao manejo integrado do fogo, à adaptação às mudanças climáticas e à conservação de áreas protegidas. A identificação dos fatores que condicionam a ocorrência e recorrência do fogo pode subsidiar estratégias mais eficientes de prevenção, monitoramento, restauração ecológica e mitigação de impactos ambientais em diferentes biomas brasileiros. Esses aspectos alinham-se aos objetivos do Relatório AR6 do IPCC, tendo em vista que os impactos mapeados comprometem a capacidade de resiliência ambiental.

A análise comparativa entre o Parque Nacional da Chapada Diamantina (PNCD), o Parque Nacional Grande Sertão Veredas (PNGSV) e a Floresta Nacional do Jamanxim (FNJ) permite investigar como diferentes contextos climáticos, fitogeográficos, territoriais e de pressão antrópica respondem às interações entre clima, uso da terra e fogo. Dessa forma, o estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre as mudanças nos regimes de fogo em UCs federais brasileiras e para a avaliação dos riscos associados à perda de serviços ecossistêmicos em paisagens tropicais protegidas.

2 Metodologia

A metodologia deste estudo foi estruturada para integrar dados de uso e cobertura da terra, clima, extremos climáticos, focos de calor e áreas queimadas nas três UCs analisadas. As etapas de seleção das bases, processamento, integração dos dados e avaliação dos serviços ecossistêmicos potencialmente impactados estão sintetizadas na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma metodológico



2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende três UCs federais brasileiras inseridas em duas diferentes categorias: o Parque Nacional da Chapada Diamantina e o Parque Nacional Grande Sertão Veredas (UCs de Proteção Integral) e a Floresta Nacional do Jamanxim (UC de Uso Sustentável). Essas unidades foram selecionadas por representarem diferentes domínios biogeográficos, categorias de manejo, regimes climáticos e níveis de pressão antrópica, permitindo uma análise comparativa da dinâmica do fogo em áreas protegidas.

O PNCD, localizado na região central da Bahia, no bioma Caatinga, possui uma área de 152.000 hectares. Está inserido em uma paisagem de transição semiárida, marcada por elevada heterogeneidade topográfica, sazonalidade climática e mosaicos de formações campestres, savânicas, florestais, campos rupestres e áreas úmidas (Pantanal dos Marimbus), condições que favorecem a ocorrência de incêndios durante períodos secos (Brasil, 2023).

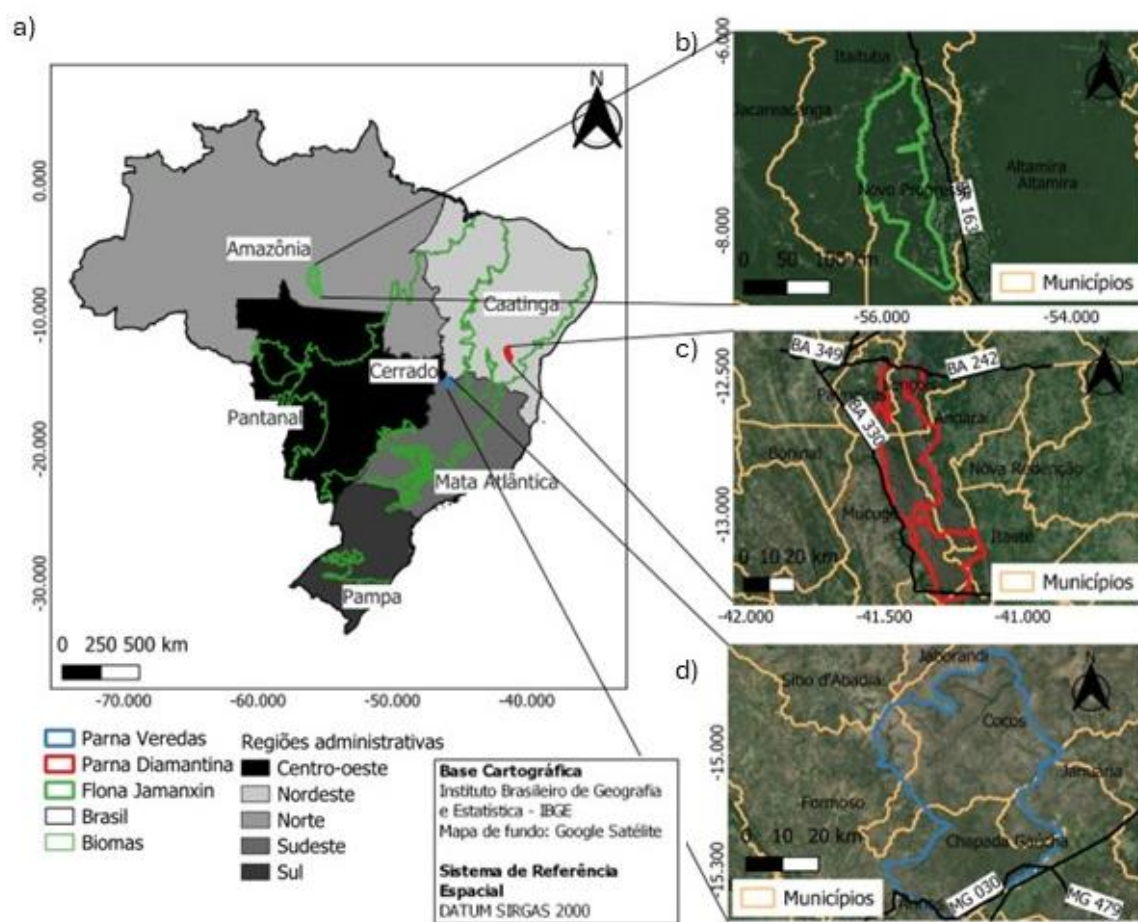
O PNGSV, com uma área de 230.853 hectares, encontra-se situado na bacia do rio São Francisco, apresentando 52,8% de sua área no extremo oeste da Bahia e 47,2% ao norte de Minas Gerais. A unidade está inserida no Cerrado, com presença de cerrado *sensu stricto*, campos, matas de galeria e veredas, ambientes de elevada sensibilidade hidrológica e vulneráveis à alteração dos regimes de fogo (Brasil, 2023).

A FNJ, unidade de conservação do tipo uso sustentável, está inserida na região norte brasileira, no oeste do estado do Pará, no município de Novo Progresso. Localiza-se na bacia hidrográfica do Tapajós, bioma Amazônico, e abrange uma área total de 1.301.120 hectares (Brasil, 2023).

Para cada UC, foram considerados seus limites oficiais e um *buffer* de 20 km, com o objetivo de comparar a dinâmica do fogo no interior das áreas protegidas e em suas zonas de influência e amortecimento, bem como avaliar a relação entre incêndios, uso da terra e serviços ecossistêmicos.

A Figura 2 ilustra a localização das três Unidades de Conservação analisadas neste estudo, sendo: Figura 2a, a distribuição espacial das áreas protegidas no território brasileiro, considerando os limites dos biomas e das regiões administrativas. As Figuras 2b, 2c e 2d detalham, respectivamente, a Floresta Nacional do Jamanxim, o Parque Nacional da Chapada Diamantina e o Parque Nacional Grande Sertão Veredas, evidenciando seus limites territoriais e municípios adjacentes. Essa representação espacial permite visualizar os diferentes contextos biogeográficos e territoriais das unidades selecionadas, abrangendo a Amazônia Oriental, a transição semiárida da Bahia e o Cerrado brasileiro.

Figura 2. (a) Distribuição espacial das unidades de conservação; (b) Flona Jamanxim, sudoeste do Pará, Amazônia Oriental; (c) Parna Chapada Diamantina, região central da Bahia; e (d) Parna Grande Sertão Veredas, transição entre Minas Gerais e Bahia



2.2 Focos de calor e área queimada

A dinâmica espacial e temporal dos focos de calor foi analisada a partir de dados orbitais vetoriais disponibilizados pela plataforma *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS), gerida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O FIRMS disponibiliza dados de fogo ativo e anomalias térmicas em escala global, derivados de sensores orbitais, permitindo o monitoramento de ocorrências térmicas associadas ao fogo em tempo praticamente real e em séries históricas. Neste estudo, foram utilizados produtos dos sensores MODIS e VIIRS, de forma complementar, considerando suas diferenças de resolução espacial, sensibilidade térmica e período de disponibilidade.

Os dados do sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, foram utilizados para caracterizar a série histórica mais longa de focos de calor. Esse produto apresenta resolução espacial de aproximadamente 1 km. A série MODIS *Collection 6.1* está disponível a partir de

novembro de 2000 para o satélite Terra e de julho de 2002 para o satélite Aqua (*Fire Information for Resource Management System* [FIRMS], 2024a).

Complementarmente, foram utilizados dados do sensor VIIRS, a bordo dos satélites S-NPP e NOAA-20, com resolução espacial de 375 m. Em razão de sua maior resolução espacial, o VIIRS apresenta maior capacidade de detecção de focos de menor dimensão e melhor detalhamento da distribuição espacial das anomalias térmicas quando comparado a produtos de menor resolução espacial. A série VIIRS/S-NPP está disponível a partir de janeiro de 2012, enquanto os dados VIIRS/NOAA-20 foram incorporados a partir de janeiro de 2020, conforme disponibilidade na plataforma FIRMS (2024b).

Ressalta-se que os focos de calor indicam a presença de fogo ativo ou anomalia térmica no momento da passagem do satélite, podendo ser influenciados por fatores como cobertura de nuvens, horário de imageamento, intensidade do fogo, tamanho da frente de queima e resolução espacial do sensor. Portanto, esses dados foram utilizados como indicadores de ocorrência e distribuição espaço-temporal de eventos térmicos, sendo interpretados de forma complementar às cicatrizes de área queimada derivadas do MapBiomas Fogo.

As áreas queimadas foram obtidas a partir da Coleção 4 do MapBiomas Fogo, que disponibiliza o mapeamento anual e mensal de cicatrizes de fogo para todo o território brasileiro. A coleção contempla o período de 1985 a 2024; entretanto, neste estudo foi adotado o recorte temporal de 1985 a 2023, a fim de manter a compatibilidade com as bases de uso e cobertura da terra e com as variáveis climáticas utilizadas na análise. Os dados apresentam resolução espacial de 30 m e são derivados de mosaicos de imagens dos satélites Landsat 5, 7, 8 e 9, permitindo quantificar a extensão, distribuição espacial, frequência e a recorrência das cicatrizes de fogo nas UCs e em seus respectivos *buffers* (MapBiomas, 2025).

O mapeamento das cicatrizes de fogo na Coleção 4 foi realizado por meio de algoritmos de inteligência artificial, utilizando modelo de *Deep Neural Network* (DNN) aplicado às séries históricas *Landsat*. O processamento foi conduzido em ambiente de computação em nuvem, com uso do *Google Earth Engine* (Gorelick et al., 2017; MapBiomas, 2025).

Após a obtenção dos dados, os mapas anuais e mensais de área queimada foram processados em ambiente SIG a fim de identificar e calcular as áreas queimadas mensais e anuais, a área queimada acumulada e a frequência de recorrência do fogo ao longo da série histórica. Esses indicadores permitiram avaliar os padrões espaciais e temporais dos incêndios, identificar áreas críticas de recorrência e comparar a dinâmica do fogo entre o interior das áreas protegidas e zonas de influência.

2.3 Valoração da perda potencial de serviços ecossistêmicos por conversão da cobertura natural

O primeiro passo da valoração ambiental consistiu na estimativa do valor potencial dos serviços ecossistêmicos associados às classes de uso e cobertura da terra, obtidas a partir da Coleção 10 do MapBiomias, conforme descrito no Capítulo 1, Seção 3.1. Para isso, adotou-se a abordagem de transferência de benefícios, combinando a estrutura conceitual dos serviços ecossistêmicos proposta pelo TEEB (*Convention on Biological Diversity*, 2018), os coeficientes monetários do TEEB *Valuation Database*, sistematizados por Van der Ploeg et al. (2010), e a lógica de valoração por unidade de área apresentada por Costanza et al. (1997). Assim, cada classe de uso e cobertura da terra foi associada a um coeficiente monetário médio, expresso em dólares por hectare por ano (US\$ · ha⁻¹ · ano⁻¹), permitindo estimar o valor potencial dos serviços ecossistêmicos a partir da área ocupada por cada classe.

Os coeficientes monetários foram obtidos a partir do TEEB *Valuation Database* e selecionados conforme a correspondência entre as classes de uso e cobertura da terra do MapBiomias e os tipos de ecossistemas/serviços ecossistêmicos descritos na base.

Como os coeficientes monetários são expressos por hectare, a área global dos ecossistemas utilizada nos estudos de referência não foi incorporada ao cálculo local, sendo substituídos pela área de cada classe mapeada nas unidades de conservação e em seus respectivos *buffers*.

O valor potencial dos serviços ecossistêmicos foi estimado conforme a Equação 1:

$$VSE_{total} = \sum(A_i \times VC_i)$$

em que VSE_{total} é o valor total estimado dos serviços ecossistêmicos; A_i é a área da classe de uso e cobertura da terra i , em hectares; e VC_i é o coeficiente monetário de valoração da classe i , expresso em US\$ · ha⁻¹ · ano⁻¹.

Para estimar a perda potencial de serviços ecossistêmicos associada à conversão de cobertura natural para uso antrópico, utilizou-se a Equação 2:

$$PSE = \sum[A_{ij} \times (VC_i - VC_j)]$$

em que PSE é a perda potencial de serviços ecossistêmicos; A_{ij} é a área convertida da classe natural i para a classe antrópica j , em hectares; VC_i é o coeficiente de valoração da classe natural original; e VC_j é o coeficiente de valoração da classe antrópica final.

Os coeficientes monetários foram atualizados para dólares constantes de 2023, considerando o *Consumer Price Index for All Urban Consumers* (CPI-U) dos Estados Unidos. A atualização foi realizada pela razão entre o CPI médio anual de 2023 e o CPI médio anual de 2007, resultando em um fator de correção de aproximadamente 1,4696. Assim, os valores originalmente expressos em $\text{US\$}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foram convertidos para valores atualizados de 2023.

Os valores estimados representam uma aproximação monetária do valor potencial dos serviços ecossistêmicos, não correspondendo a preço de mercado, custo de restauração ou dano econômico direto.

A dinâmica do fogo foi discutida de forma complementar, como indicador de pressão e degradação da paisagem. Embora a valoração ambiental tenha sido baseada na conversão de uso e cobertura da terra, a sobreposição espacial entre áreas antropizadas, bordas e maior recorrência de fogo contribuiu para a interpretação de como a perda de cobertura natural pode ampliar a vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos nas unidades.

2.4 Dados de uso e cobertura da terra, temperatura, precipitação e extremos climáticos

Os dados de uso e cobertura da terra utilizados neste capítulo foram obtidos da Coleção 10 do MapBiomas, considerando a série temporal de 1985 a 2023. A descrição detalhada da base de dados, das classes analisadas, da resolução espacial, dos procedimentos de processamento e da delimitação espacial das Unidades de Conservação e seus respectivos *buffers* encontra-se apresentada na Seção 2.1 do Capítulo 1 desta tese.

Da mesma forma, os dados climáticos de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, bem como os índices de extremos climáticos utilizados para relacionar as condições hidroclimáticas e a dinâmica do fogo, seguem os procedimentos metodológicos padronizados descritos no Capítulo 1, seção 2.2. Os dados foram obtidos a partir das bases de Xavier et al. (2022) e ERA5-Land, abrangendo o período de 1980 a 2023, e os índices de extremos climáticos foram calculados conforme as definições do ETCCDI. Assim, neste capítulo, essas variáveis são retomadas apenas como suporte analítico para a interpretação da ocorrência, recorrência e distribuição espacial do fogo nas Unidades de Conservação.

3 Resultados e discussão

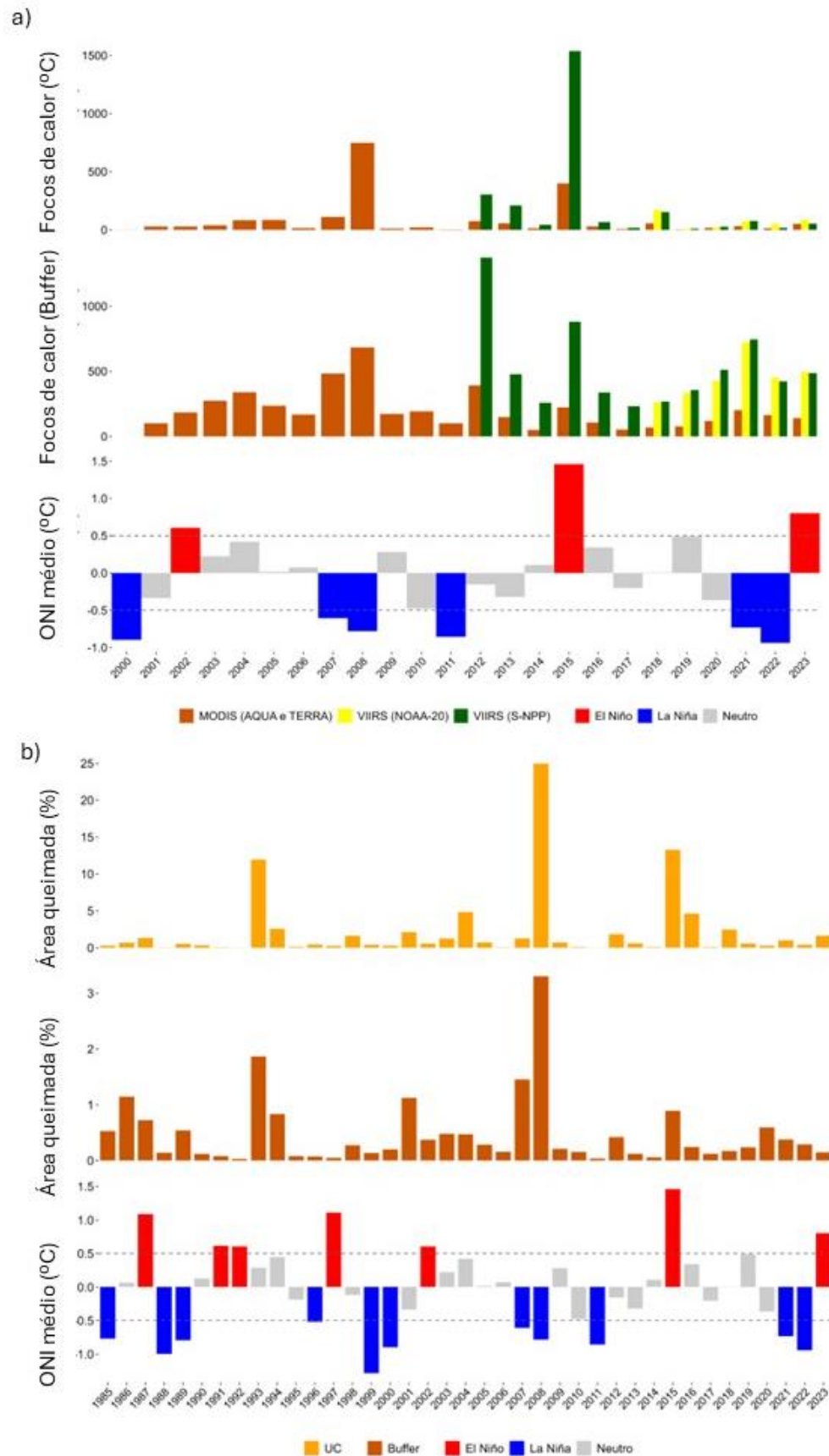
Para as três Unidades de Conservação analisadas, foram levantadas informações sobre área queimada, focos de calor, uso e cobertura da terra, variáveis climáticas de temperatura e precipitação, bem como índices de extremos climáticos. Esses dados permitiram avaliar a dinâmica do fogo de forma integrada, considerando tanto as condicionantes ambientais quanto as pressões antrópicas associadas às transformações da paisagem.

Ressalta-se, entretanto, a diferença temporal entre as bases de dados utilizadas. As séries históricas de uso e cobertura da terra e de área queimada abrangem o período de 1985 a 2023. Já o monitoramento de focos de calor tem início em novembro de 2000, em função da disponibilidade dos dados orbitais sistematizados. Essa distinção é importante para a interpretação dos resultados, uma vez que cada base apresenta cobertura temporal, resolução espacial e finalidade analítica específicas.

3.1 Análise espaço-temporal da dinâmica do fogo no Parque Nacional da Chapada Diamantina

Nas Figuras 4a e 4b, ilustra-se a relação entre focos de calor, área queimada e fases do *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), representadas pelo *Oceanic Niño Index* (ONI) médio, no PNCD. Os resultados indicam que a dinâmica do fogo não responde de forma linear a um único fator climático ou antrópico. Como o ONI é derivado das anomalias de temperatura da superfície do mar na região *Niño* 3.4, ele permite contextualizar os anos de maior queima em relação a episódios de *El Niño*, *La Niña* ou neutralidade climática.

Figura 4. (a) Focos de calor no Parque Nacional da Chapada Diamantina (2001 a 2023); (b) Área queimada (1985 a 2023)



O aumento do número de registros a partir de 2012 não deve ser interpretado, isoladamente, como um aumento proporcional do número de incêndios. O sensor VIIRS, com resolução nominal de 375 m, apresenta maior sensibilidade para detectar focos de menor dimensão e frentes de fogo menos intensas em comparação ao MODIS, cuja resolução nominal é de aproximadamente 1 km (Schroeder et al., 2014; Giglio et al., 2016). Assim, os focos de calor devem ser interpretados como indicadores de ocorrência térmica ativa no momento da passagem orbital, enquanto as cicatrizes de área queimada representam a extensão espacial acumulada do fogo na paisagem (FIRMS, 2024a).

Essa distinção metodológica é fundamental para interpretar os resultados. No período de estudo, anos com elevada densidade de focos de calor nem sempre corresponderam aos maiores percentuais de área queimada (Figuras 4a e 4b), indicando que a quantidade de focos pode expressar tanto um maior número de ignições quanto uma maior fragmentação espacial do fogo, sem necessariamente gerar grandes cicatrizes contínuas.

Quanto à área queimada no PNCD, os números foram mais expressivos em 1993, 2008 e 2015, enquanto o ano de 2021 apresentou elevado número de focos, mas baixa representatividade em termos de área queimada na UC e no *buffer*. Esse comportamento sugere que, em determinados anos, as ignições podem ter sido mais numerosas e espacialmente dispersas, porém com menor capacidade de expansão, possivelmente em função de descontinuidades no combustível, respostas de combate ou condições meteorológicas menos favoráveis à propagação.

A relação entre o fogo e as teleconexões climáticas também apresenta um comportamento complexo. O ano de 1993 foi marcado por condições neutras do ENSO, enquanto 2007 representou uma transição para *La Niña* a partir do segundo semestre, e 2008 apresentou condições de *La Niña* crescentes e persistentes. Já o ano de 2015 foi caracterizado por um dos episódios mais intensos de *El Niño* da série recente, condição associada ao aumento das temperaturas globais e à intensificação de extremos climáticos em várias regiões.

Em 2021, por sua vez, predominou a condição de *La Niña*. Esses padrões indicam que eventos de fogo podem ocorrer tanto sob fases quentes quanto frias do ENOS, reforçando a necessidade de avaliar não apenas o sinal climático de grande escala, mas também efeitos regionais sobre precipitação, temperatura, estação seca e umidade da vegetação.

No caso da Chapada Diamantina, a influência do ENOS deve ser analisada em conjunto com a variabilidade hidroclimática regional. Estudos sobre o Nordeste brasileiro indicam que a fase quente do ENOS tende a estar associada à redução da precipitação e ao prolongamento de condições de seca em partes do semiárido, embora a resposta espacial seja heterogênea e

modulada por outros sistemas atmosféricos, como a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas frontais, vórtices ciclônicos de altos níveis e anomalias no Atlântico Tropical (Hastenrath, 2006; Almeida, 2016; Marengo et al., 2017; Correia Filho et al., 2019). Complementarmente, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) atuam como sistemas de baixa pressão em grande escala na alta troposfera, caracterizados por uma circulação ciclônica de núcleo frio (Amorim et al., 2020; Lyra et al., 2023).

Correia Filho et al. (2019) destacam que, durante a fase quente do ENOS, há uma redução significativa da precipitação e o prolongamento de regimes secos no Nordeste brasileiro, especialmente na porção semiárida. Marengo et al. (2017) também mostram que secas severas no Nordeste resultam em interações entre forçantes oceânicas, circulação atmosférica e aquecimento regional, impactando a disponibilidade hídrica e a vegetação.

Embora tenham gênese sobre o Oceano Atlântico (entre 20°-45°W e 0°-28°S) com maior frequência em janeiro, a atuação dos VCAN ao adentrar o continente é espacialmente heterogênea. Enquanto favorecem chuvas na costa norte e em estados como Piauí e Pernambuco, esses sistemas inibem a convecção no setor sul e central da região, resultando em céu limpo e ausência de precipitação, notadamente no estado da Bahia (Varejão-Silva, 2006).

Para o PNCD, esse padrão é relevante tendo em vista que a supressão da convecção e a redução da nebulosidade podem intensificar a radiação solar incidente, elevar a temperatura da superfície e reduzir a umidade dos combustíveis vegetais. Quando essas condições ocorrem durante a estação seca ou no período de transição seca-chuvosa, especialmente em paisagens com gramíneas, campos rupestres e mosaicos savânicos, aumentam a inflamabilidade da vegetação e favorecem a propagação do fogo.

Os anos de 2008 e 2015 merecem destaque pois já foram identificados na literatura como grandes episódios de incêndio no PNCD. Leite et al. (2017) analisaram os incêndios ocorridos nesses anos utilizando índices espectrais de vegetação, como NBR e NDVI, e apontaram que esses anos, estiveram entre os maiores eventos registrados no parque. Os resultados corroboram os mostrados na Figura 4, na qual 2008 e 2015 aparecem como anos de elevada área queimada.

A análise do uso e cobertura da terra reforça essa interpretação (Capítulo 1, seção 3.1). Entre 1985 e 2023, observa-se a permanência de formações naturais no interior da UC, mas também a expansão de áreas agropecuárias no *buffer*, sobretudo nas bordas oeste e sudoeste. Esse padrão cria uma zona de transição crítica entre paisagens naturais e antrópicas, onde a disponibilidade de combustível fino, a abertura da vegetação e as fontes de ignição associadas ao uso da terra podem aumentar a vulnerabilidade ao fogo. A substituição de vegetação nativa por áreas agrícolas ou pastagens modifica as propriedades biofísicas da superfície, incluindo

albedo, rugosidade, evapotranspiração e fluxo de calor sensível, favorecendo condições microclimáticas mais quentes e secas nas bordas da UC.

Estudos em ambientes savânicos demonstram que fogo e as mudanças na cobertura vegetal reduzem a biomassa, a evapotranspiração e o fluxo de calor latente, ao mesmo tempo em que aumentam o aquecimento da superfície e o fluxo de calor sensível, o que pode intensificar o estresse hídrico e a inflamabilidade da vegetação.

Assim, a dinâmica do fogo no PNCD não indica um aumento linear dos incêndios, mas sim uma maior sensibilidade à combinação entre sazonalidade seca, extremos climáticos, estrutura da paisagem e fontes antrópicas de ignição. Os anos de maior área queimada refletem episódios de maior propagação, enquanto o ano de 2021 demonstra que o aumento de focos de calor não resulta, necessariamente, em uma maior extensão de área queimada. Associada à expansão agropecuária no *buffer*, essa resposta sugere que as bordas da unidade vêm se tornando mais vulneráveis ao fogo, sobretudo em períodos de maior estresse hídrico.

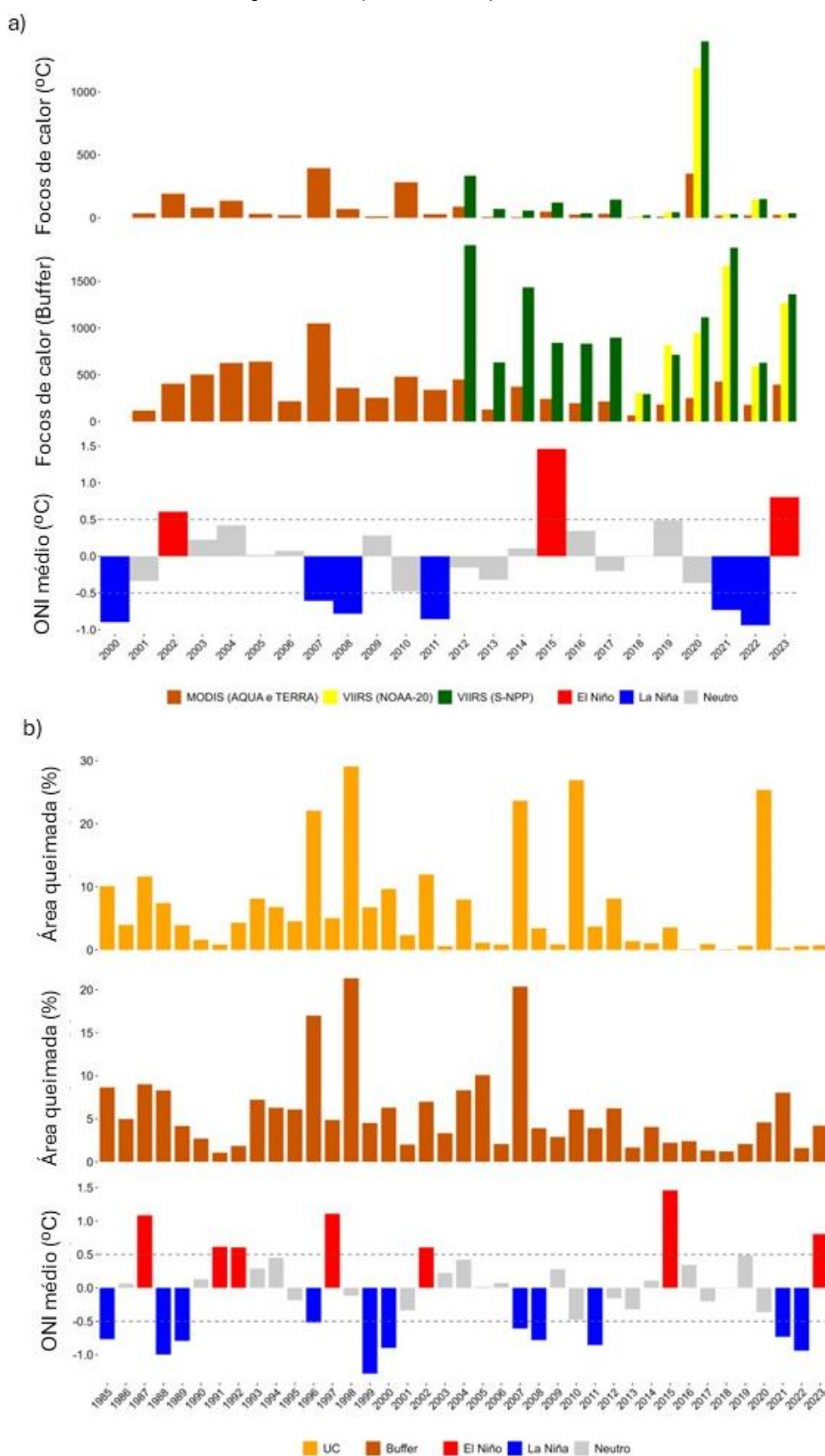
Essa vulnerabilidade é reforçada pelos resultados climáticos prévios do Capítulo 1, que indicam redução da precipitação total anual, aumento dos dias secos consecutivos e intensificação dos extremos térmicos, como TXx, SU, TR20 e DTR. Essas condições ampliam a demanda evaporativa da atmosfera, reduzem a umidade da vegetação e favorecem a propagação do fogo, especialmente em anos de maior estresse hidroclimático ou durante a transição seca-chuvosa. Assim, os eventos de maior área queimada devem ser interpretados como resultado da combinação entre combustível fino seco, sazonalidade climática e maior sensibilidade das formações campestres e savânicas à combustão.

No PNCD, a vulnerabilidade ao fogo é intensificada pela redução da precipitação, aumento dos dias secos consecutivos, extremos térmicos e expansão agropecuária no *buffer*, sobretudo nas bordas oeste e sudoeste. Esses fatores indicam que a dinâmica do fogo resulta da interação entre o estresse hidroclimático, sazonalidade seca e a pressão antrópica, ampliando o risco de propagação em anos críticos.

3.2 Análise espaço-temporal da dinâmica do fogo no Parque Nacional Grande Sertão Veredas

No Parque Nacional Grande Sertão Veredas, a dinâmica do fogo apresentou elevada variabilidade interanual ao longo da série analisada, com alternância entre anos de baixa ocorrência de queima e anos marcados por grandes extensões queimadas. Na Figura 5a, demonstram-se os dados de focos de calor e, na Figura 5b, os dados de área queimada.

Figura 5. (a) Focos de calor no Parque Nacional Grande Sertão Veredas (2001 a 2023); (b) Área queimada (1985 a 2023)



Os maiores registros de área queimada ocorreram em 1998 e 2007, seguidos por 1996, 2010, 2012 e 2021. O ano de 1998 correspondeu ao maior percentual de área queimada na UC, coincidindo com um episódio de *El Niño* forte, enquanto 2007, o segundo maior registro de queima, ocorreu sob condições associadas a um *El Niño* moderado no início do ano e posterior transição para *La Niña*, conforme a série histórica do *Oceanic Niño Index*.

Entretanto, a elevada área queimada em 1996, sob condição de *La Niña*, indica que as teleconexões climáticas não atuam de forma isolada na dinâmica do fogo. Embora o ENOS possa influenciar a precipitação, a temperatura e a duração da estação seca, a extensão da queima depende de variáveis climáticas e biofísicas integradas. Assim, os anos de maior queima no parque devem ser interpretados como resultado da interação entre condições hidroclimáticas favoráveis à propagação do fogo e pressões antrópicas presentes no interior e, sobretudo, no entorno da UC.

A análise espacial das cicatrizes de queima evidencia que em alguns anos a maior concentração de áreas queimadas ocorreu na Zona de Amortecimento, especialmente nos eventos de 1998, 2007, 2010, 2020 e 2021, indicando influência da paisagem adjacente sobre a dinâmica do fogo no parque. Considerando que o *buffer* possui aproximadamente 586.868 ha, a maior extensão de áreas queimadas no entorno sugere que as ignições e a propagação do fogo estão fortemente relacionadas aos usos da terra externos à UC.

Esse padrão é coerente com o Plano de Manejo do Parque, que aponta como atividades conflitantes a situação fundiária irregular, os incêndios, a agricultura mecanizada em fazendas limítrofes, a criação de gado em áreas não desapropriadas e a extração de recursos vegetais.

Os focos de calor apresentaram comportamento compatível com os anos de maior área queimada, sobretudo no *buffer*, indicando coerência entre os registros de ignição e a extensão das cicatrizes de fogo. Entre 2001 e 2005, observou-se um aumento sequencial dos focos detectados pelo MODIS, com destaque para 2007, ano de maior registro desse sensor.

No período posterior, com registros VIIRS, os anos de 2012, 2014, 2021 e 2023 apresentaram os maiores valores, especialmente na Zona de Amortecimento. Essa diferença também deve considerar as especificidades dos sensores, uma vez que MODIS e VIIRS apresentam diferenças de resolução espacial, sensibilidade e capacidade de detecção de focos. Portanto, embora os focos de calor sejam importantes indicadores de ignição, eles não expressam isoladamente a severidade ou a extensão da queima, sendo necessário analisá-los em conjunto com as cicatrizes de área queimada.

A maior recorrência de incêndios no *buffer* reforça o papel das pressões antrópicas na dinâmica do fogo. A região do entorno apresenta atividades potencialmente conflitantes com

os objetivos de conservação, como agricultura mecanizada, áreas de pastagem, produção de sementes de gramíneas, carvoarias e outras formas de uso produtivo da terra (Capítulo 1 – Seção 3.1). Essas atividades ampliam a probabilidade de ignições antrópicas e aumentam o risco de propagação do fogo para áreas naturais, especialmente durante a estação seca. Assim, a Zona de Amortecimento atua como uma área crítica para o manejo do fogo, pois concentra tanto fontes de ignição quanto mudanças no uso da terra capazes de alterar a conectividade do combustível na paisagem.

Os dados de uso e cobertura da terra reforçam essa interpretação. No interior da UC, predominam formações naturais ao longo de toda a série, com baixa participação de áreas agropecuárias. Em 2023, a paisagem do parque ainda era composta majoritariamente por formações naturais, incluindo áreas florestais, formações savânicas, vegetação herbácea e arbustiva e veredas. No *buffer*, entretanto, observa-se uma expansão mais expressiva do setor agropecuário, indicando intensificação do uso antrópico no entorno da unidade (Capítulo 1 – Seção 3.1). Essa expansão tende a aumentar a fragmentação da paisagem e ampliar as bordas entre áreas produtivas e vegetação nativa, elevando a probabilidade de ignições associadas ao manejo agropecuário.

A composição da vegetação também contribui para explicar a recorrência do fogo. Em formações savânicas e campestres, a presença de gramíneas e material herbáceo seco favorece a continuidade horizontal do combustível fino, aumentando a inflamabilidade durante a estação seca. Embora muitas espécies do Cerrado apresentem adaptações ao fogo, a recorrência elevada, os incêndios tardios e os intervalos curtos entre eventos podem comprometer a regeneração da vegetação, alterar a estrutura das comunidades, reduzir os estoques de carbono e afetar a fauna. Em áreas úmidas, como veredas, os impactos podem ser ainda mais severos, pois esses ambientes apresentam um funcionamento hidrológico particular e maior sensibilidade ecológica à queima recorrente.

Do ponto de vista climático, os resultados analíticos anteriores ajudam a explicar o aumento da vulnerabilidade da paisagem ao fogo. Para o PNGSV, as análises de tendência indicaram redução significativa da precipitação tanto na UC quanto no *buffer*, nas bases Xavier e ERA5-Land. Também foram observadas tendências significativas de aumento da temperatura máxima e da temperatura mínima. Esses resultados indicam a intensificação do estresse hidroclimático, com redução da disponibilidade hídrica e aumento das condições atmosféricas favoráveis à secagem do combustível vegetal.

Além disso, os índices climáticos extremos apresentados no Capítulo 1 indicam aumento dos dias secos consecutivos, redução de indicadores associados à precipitação e

intensificação dos extremos térmicos, como aumento de dias quentes, noites tropicais e temperaturas máximas extremas (Capítulo 1 – Seção 3.2.1). Esse conjunto de mudanças tende a ampliar a inflamabilidade da vegetação, pois reduz a umidade do combustível e aumenta a demanda evaporativa da atmosfera. Assim, anos com estiagem prolongada, chuvas abaixo da média e temperaturas elevadas tornam-se mais favoráveis à propagação do fogo, especialmente quando há fontes de ignição no entorno da UC.

A redução média relativa dos grandes incêndios após 2012 deve ser interpretada com cautela. Embora alguns anos recentes tenham apresentado menor área queimada no interior da UC, a ocorrência de eventos expressivos em 2020 e 2021 indica que o risco permanece elevado. Essa possível redução pode estar associada a melhorias no monitoramento, ações de prevenção e combate, estratégias de Manejo Integrado do Fogo (MIF) e mudanças na gestão territorial.

O Plano de Manejo do Parque reconhece o MIF como instrumento estratégico de planejamento, baseado no manejo adaptativo e na organização do conhecimento sobre o regime do fogo na UC. Contudo, a permanência de pressões no entorno indica que o controle do fogo não depende apenas de ações internas, mas também da gestão integrada da paisagem e da articulação com proprietários, comunidades e atividades produtivas no *buffer*.

Diante deste contexto, os resultados indicam que a dinâmica do fogo no parque é condicionada pela interação entre teleconexões climáticas, redução da precipitação, aumento dos extremos térmicos, maior duração dos períodos secos, estrutura inflamável da vegetação savânica e pressões antrópicas no entorno da UC. Os anos de maior área queimada, como 1998, 2007, 1996, 2010, 2012, 2020 e 2021, representam períodos em que as condições ambientais favoreceram uma maior propagação do fogo. Já os focos de calor evidenciam a pressão de ignição, especialmente no *buffer*. Assim, a conservação do parque exige não apenas ações de combate ao fogo dentro da UC, mas também políticas de prevenção, regularização fundiária, manejo de combustíveis, proteção das veredas e fortalecimento do MIF em escala de paisagem.

A dinâmica do fogo no PNGSV reflete a própria complexidade do regime de fogo no Cerrado. Embora o bioma seja dependente do fogo e seus regimes naturais contribuam para a manutenção da estrutura ecológica e da pirodiversidade, a intensificação de condições quentes e secas, redução da precipitação, aumento da duração da estação seca e pressões antrópicas no entorno podem alterar a frequência, extensão e a severidade dos incêndios florestais.

Silva et al. (2025) mostram que estações severas de fogo no Cerrado são geralmente precedidas por condições quentes e secas no outono austral e associadas a condições quentes e secas durante a própria estação do fogo. Destacam também que o déficit de pressão de vapor,

seca, vento e os fatores humanos influenciam a propagação e a intensidade dos incêndios em diferentes fitofisnomias do bioma.

Nesse sentido, os resultados obtidos para o PNGSV indicam que os grandes eventos de queima não decorrem apenas de anomalias climáticas, mas da interação entre o clima, disponibilidade de combustível, vegetação savânica inflamável, uso da terra e as fontes antrópicas de ignição, especialmente no *buffer*. Essa leitura é consistente com Silva et al. (2025), que ressaltam que o clima atua como habilitador do fogo, mas não elimina a importância dos controles bioclimáticos e humanos, uma vez que as ignições no Cerrado são predominantemente antrópicas e frequentemente associadas a práticas agrícolas, conversão da terra e usos tradicionais.

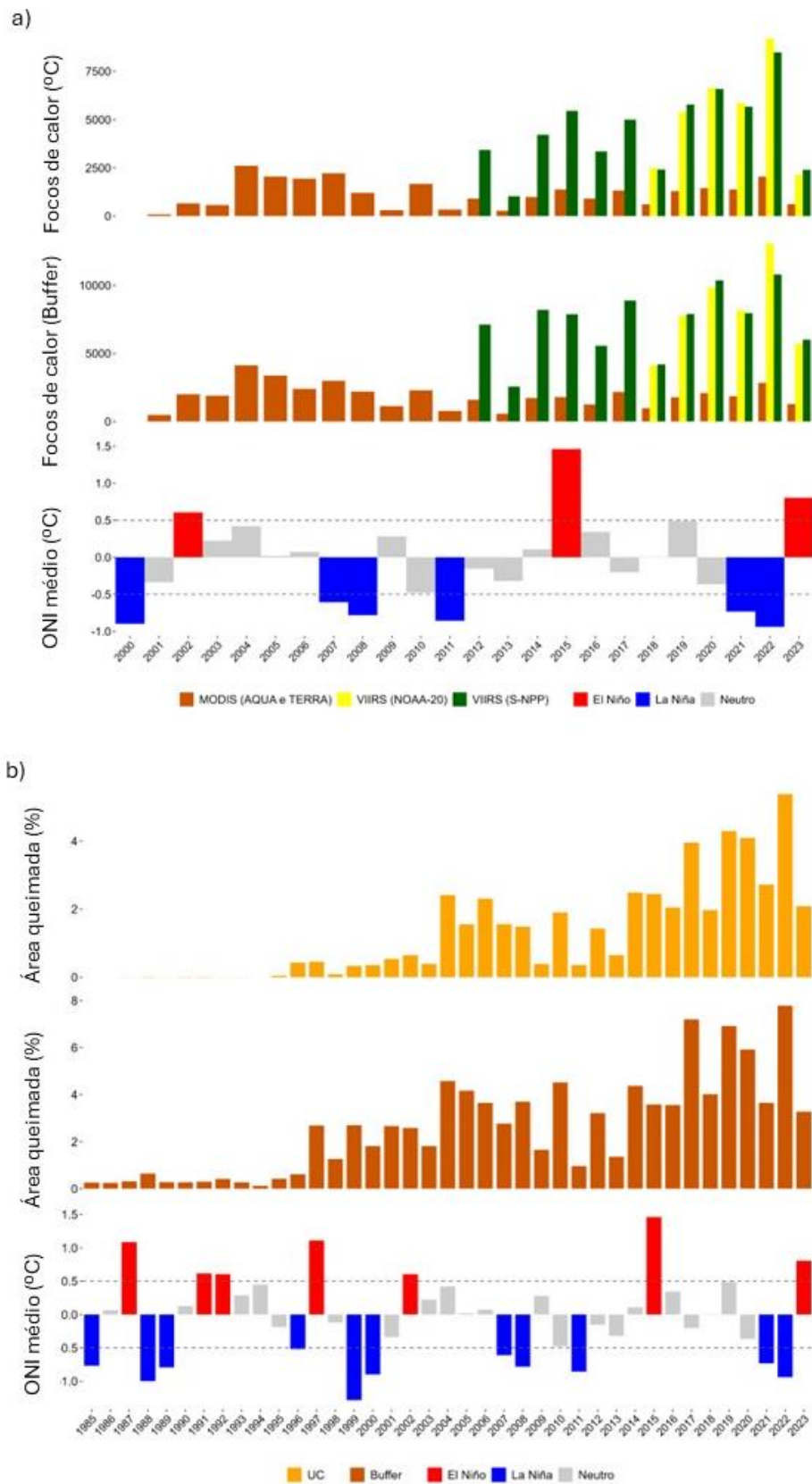
3.3 Análise espaço-temporal da dinâmica do fogo na Floresta Nacional do Jamanxim

Especificamente, a Floresta Nacional (Flona) do Jamanxim figura como uma das UCs mais antropizadas da Amazônia brasileira. Embora criada para conter o avanço da fronteira agrícola no eixo da rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém), a unidade enfrenta pressões persistentes decorrentes da abertura de estradas clandestinas e da exploração ilegal de madeira. Essas atividades fragmentam a cobertura florestal e atuam como condutores de ignição, elevando a recorrência de incêndios florestais na região (Barros & Oliveira, 2023).

A série histórica de focos de calor revela uma trajetória de intensificação da atividade de fogo, estreitamente condicionada pela evolução dos sistemas de monitoramento orbital e por oscilações climáticas de escala planetária. Os registros derivados do sensor MODIS (satélites Terra e Aqua) estabelecem uma linha de base de longo prazo, embora operem com uma resolução espacial de 1 km e revisita temporal diária ou bidimensional (Figura 6a).

Em contraste, os dados provenientes dos sensores VIIRS (satélites S-NPP e NOAA-20), integrados à análise a partir de 2012 e 2018, respectivamente, conferem uma sensibilidade detectiva superior (Figura 6a). Com resolução espacial de 375 m e maior frequência de imageamento (duas passagens diárias), o VIIRS mitiga o sub-registro de queimadas de pequena escala e sob dossel, o que explica o incremento abrupto na densidade de focos observada na última década em comparação ao registro histórico do MODIS. A dinâmica temporal do regime de fogo é detalhada na Figura 6. A evolução interanual da ocorrência de focos de calor na unidade de conservação e no *buffer* é ilustrada na Figura 6a, enquanto a proporção de área queimada correspondente à série histórica estendida (1985-2023) é apresentada na Figura 6b.

Figura 6. (a) Focos de calor na Floresta Nacional do Jamanxim (2001 a 2023); (b) Área queimada (1985 a 2023)



Na FNI, a dinâmica do fogo deve ser interpretada de forma distinta em relação às unidades inseridas no Cerrado e na Caatinga, uma vez que a Amazônia é composta majoritariamente por ecossistemas florestais sensíveis ao fogo. Deve também ser levado em consideração que, ao contrário dos Parques, a Floresta Nacional é uma unidade de conservação de uso sustentável e não de proteção integral.

Nesse contexto, a ocorrência de áreas queimadas e de focos de calor tende a refletir, sobretudo, a interação entre seca, degradação florestal, desmatamento, expansão agropecuária, abertura de bordas e fontes antrópicas de ignição. Assim, os anos de maior queima devem ser analisados considerando tanto as condições climáticas que favorecem a inflamabilidade da floresta quanto as pressões territoriais associadas ao uso da terra.

Na FNI, a dinâmica do fogo resulta da interação entre a variabilidade climática de grande escala, sistemas atmosféricos regionais, mudanças no uso e cobertura da terra e pressões territoriais associadas ao eixo da BR-163. As séries analisadas indicam aumento da atividade do fogo, especialmente a partir da década de 2010, com maior recorrência de focos de calor e expansão da área queimada tanto no interior da unidade quanto na zona de amortecimento.

Esse comportamento pode ser parcialmente explicado pela influência de teleconexões climáticas, uma vez que eventos de ENOS tendem a reduzir a precipitação e aumentar as temperaturas em setores da Amazônia, intensificando o déficit hídrico e favorecendo a inflamabilidade da vegetação (Alencar et al., 2006; Marengo et al., 2008). Outrossim, as anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical também modulam o transporte de umidade para a bacia amazônica, podendo deslocar os padrões de convecção e contribuir para secas regionais severas, como observado em episódios recentes de estiagem na Amazônia (Marengo & Espinoza, 2016).

Os resultados climáticos obtidos anteriormente para a FNI reforçam esse mecanismo, pois indicam aquecimento consistente, com aumento das temperaturas mínimas e máximas, elevação das noites tropicais e intensificação de extremos térmicos. Paralelamente, os índices de precipitação sugerem maior irregularidade hidroclimática, com tendência de aumento dos dias secos consecutivos, redução ou instabilidade dos dias úmidos consecutivos e intensificação de eventos extremos de chuva, como RX1day, RX5day e R20mm (Capítulo 1 – Seção 3.3).

Essa configuração indica uma estação seca potencialmente mais severa, intercalada por eventos de precipitação intensa, o que amplia a inflamabilidade da paisagem. Em florestas úmidas tropicais, diferentemente de biomas dependentes do fogo, a vegetação não apresenta adaptações estruturais ao fogo recorrente; assim, mesmo incêndios de sub-bosque de baixa

intensidade podem causar mortalidade arbórea, abertura de dossel e aumento da suscetibilidade a novos incêndios (Uhl & Kauffman, 1990; Cochrane & Laurance, 2002; Barlow & Peres, 2008).

A relação entre fogo e clima, entretanto, não é direta nem exclusivamente meteorológica. Os focos de calor e as cicatrizes de queima devem ser interpretados como resultado da combinação entre condições atmosféricas favoráveis à combustão e fontes antrópicas de ignição. Nesse sentido, a expansão agropecuária, a abertura de áreas no entorno da unidade, fragmentação florestal e proximidade de estradas aumentam a exposição da floresta ao fogo.

As mudanças observadas no uso e cobertura da terra mostram uma redução gradual das formações naturais e o avanço de áreas agropecuárias, sobretudo na zona de amortecimento da Flona, padrão coerente com o histórico de ocupação associado à BR-163 (Capítulo 1 – Seção 3.1). A rodovia Cuiabá-Santarém foi um importante vetor de integração territorial, mas também estimulou frentes de desmatamento, grilagem, exploração madeireira e conversão florestal no sudoeste do Pará (Fearnside, 2007).

Assim, a paisagem da FNJ apresenta uma combinação crítica de aumento da pressão antrópica sobre a cobertura florestal e maior frequência de condições climáticas favoráveis à propagação do fogo, especialmente em áreas sob influência da BR-163, onde a expansão agropecuária, ocupação irregular, grilagem e o desmatamento, ampliam a vulnerabilidade da floresta ao fogo (Fearnside, 2007; Siegel et al., 2022). Do ponto de vista sinótico, o regime de chuvas da região é controlado principalmente pela atuação do Sistema de Monção da América do Sul, migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical, convecção amazônica, linhas de instabilidade e, em alguns episódios, pela penetração de sistemas frontais e friagens na Amazônia meridional (Marengo et al., 2012; Cohen et al., 1995; Garreaud, 2000).

Durante a estação chuvosa, a convergência de umidade mantém índices mais elevados de água no solo e na vegetação. Na transição para a estação seca, a redução da convecção, o enfraquecimento do transporte de umidade e o aumento da subsidência atmosférica favorecem maior radiação incidente, temperaturas mais elevadas e queda da umidade relativa, criando condições favoráveis à combustão do material vegetal. Quando essa sazonalidade ocorre sob a influência de *El Niño* ou de anomalias no Atlântico Tropical, a estação seca pode se tornar mais longa e intensa, elevando o risco de incêndios florestais (Marengo et al., 2011; Marengo & Espinoza, 2016).

Na FNJ os resultados deste estudo indicam que a dinâmica do fogo não pode ser explicada exclusivamente pelas fases do ENOS. A série temporal de focos de calor mostra um

aumento expressivo das detecções a partir da década de 2010, tanto no interior da unidade quanto na zona de amortecimento, com destaque para os anos mais recentes, especialmente entre 2018 e 2023. Embora anos sob influência de *El Niño* apareçam associados a registros importantes de fogo, os dados apresentados nas Figuras 6a e 6b também evidenciam a ocorrência de focos de calor e áreas queimadas em anos de *La Niña* e na categoria neutra. Esse padrão demonstra que o *El Niño* pode intensificar as condições climáticas favoráveis à combustão, mas não atua como causa isolada do fogo.

Os potenciais impactos ambientais são expressivos. A recorrência do fogo em florestas amazônicas pode provocar degradação florestal cumulativa, mortalidade de árvores, redução da biomassa, perda de carbono, alteração da composição florística, fragmentação de habitats, redução da biodiversidade e maior vulnerabilidade a invasões por gramíneas e espécies oportunistas (Cochrane & Laurance, 2002; Barlow & Peres, 2008; Lapola et al., 2023).

Além disso, incêndios recorrentes podem comprometer serviços ecossistêmicos essenciais como o armazenamento de carbono, regulação climática, reciclagem de umidade, conservação da biodiversidade, proteção do solo e a manutenção da qualidade da água e do ar. No caso da FNJ, esses impactos são particularmente relevantes, pois a unidade está inserida em uma região estratégica da fronteira de ocupação da Amazônia, funcionando como barreira à conversão florestal e como área-chave para a conectividade ecológica no sudoeste do Pará.

Em síntese, a dinâmica do fogo na FNJ deve ser compreendida como resultado do acoplamento entre teleconexões climáticas, sistemas sinóticos, uso da terra e acessibilidade territorial. As teleconexões modulam a intensidade da estação seca; os sistemas atmosféricos regionais controlam a disponibilidade sazonal de umidade; e a expansão agropecuária, a fragmentação florestal e a influência da BR-163 ampliam as fontes de ignição e a propagação do fogo. Portanto, anos mais quentes e secos tendem a apresentar maior risco de fogo quando coincidem com o avanço de áreas antrópicas, bordas florestais e uso recorrente do fogo no entorno da unidade.

3.4 Frequência do fogo, uso da terra e sazonalidade da queima nos Parques Nacionais da Chapada Diamantina, Grande Sertão Veredas e na Floresta Nacional do Jamanxim

A análise integrada das cicatrizes de fogo, frequência de queima e uso e cobertura da terra evidencia que as três unidades de conservação apresentaram dinâmicas distintas de fogo entre 1985 e 2023. Essa divergência reflete as diferenças entre os biomas, os tipos de ecossistemas, condições climáticas, categoria de unidade (Proteção Integral e Uso Sustentável)

e as pressões antrópicas. No Parque Nacional da Chapada Diamantina (Figura 7), inserido em área de transição entre a Caatinga e Cerrado, as cicatrizes de fogo concentram-se, sobretudo, em formações campestres, savânicas, áreas de pastagem e mosaicos de uso, com maior recorrência ao longo de corredores internos e áreas abertas da paisagem.

Embora a unidade apresente menor frequência máxima de fogo quando comparada às demais áreas analisadas, os mapas indicam recorrência espacial em setores específicos, sugerindo que a propagação do fogo está associada à combinação entre vegetação campestre ou savânica, sazonalidade seca e usos antrópicos no entorno (Figura 7c).

A sobreposição entre as cicatrizes de fogo e o uso e cobertura da terra indica que parte relevante da recorrência de queimadas no interior da UC ocorre em áreas associadas a formações abertas, especialmente formações savânicas, campestres e afloramentos rochosos. A presença de fogo sobre áreas de afloramento rochoso é relevante porque esses ambientes apresentam solos rasos, baixa retenção de umidade, vegetação descontínua e elevada exposição à radiação, condições que favorecem o ressecamento do combustível fino durante a estação seca.

Assim, embora os afloramentos rochosos possam limitar a continuidade espacial da combustão em alguns trechos, a vegetação herbácea e arbustiva associada a esses ambientes pode atuar como combustível suficiente para sustentar incêndios recorrentes em anos de maior déficit hídrico ou sob a presença de ignições locais.

No Parque Nacional Grande Sertão Veredas, localizado no Cerrado, a frequência de fogo é mais ampla e espacialmente distribuída, atingindo principalmente formações savânicas, campestres e áreas de pastagem (Figura 8).

Figura 7. Frequência do fogo, uso da terra e sazonalidade da queima no Parque Nacional da Chapada Diamantina

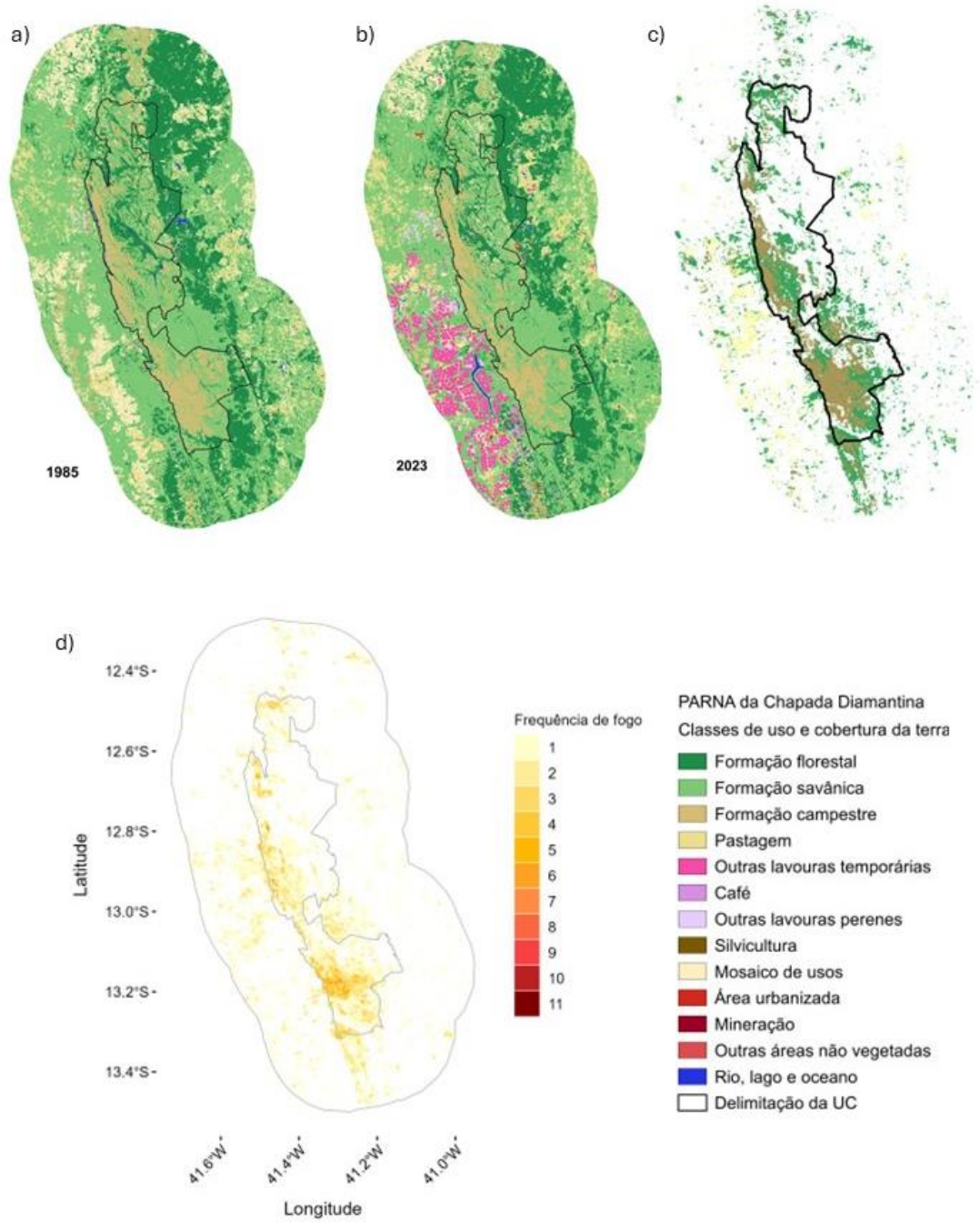
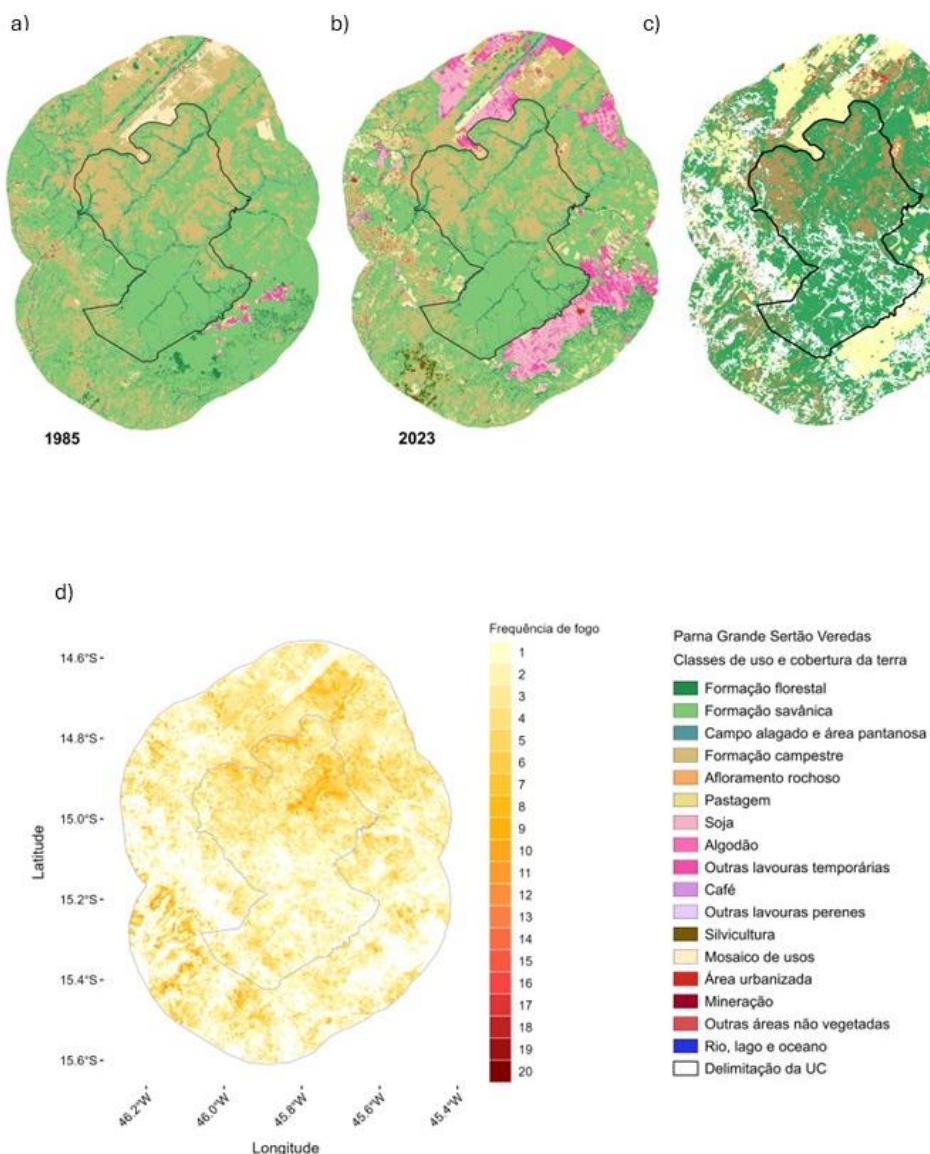


Figura 8. Frequência do fogo, uso da terra e sazonalidade da queima no Parque Nacional Grande Sertão Veredas



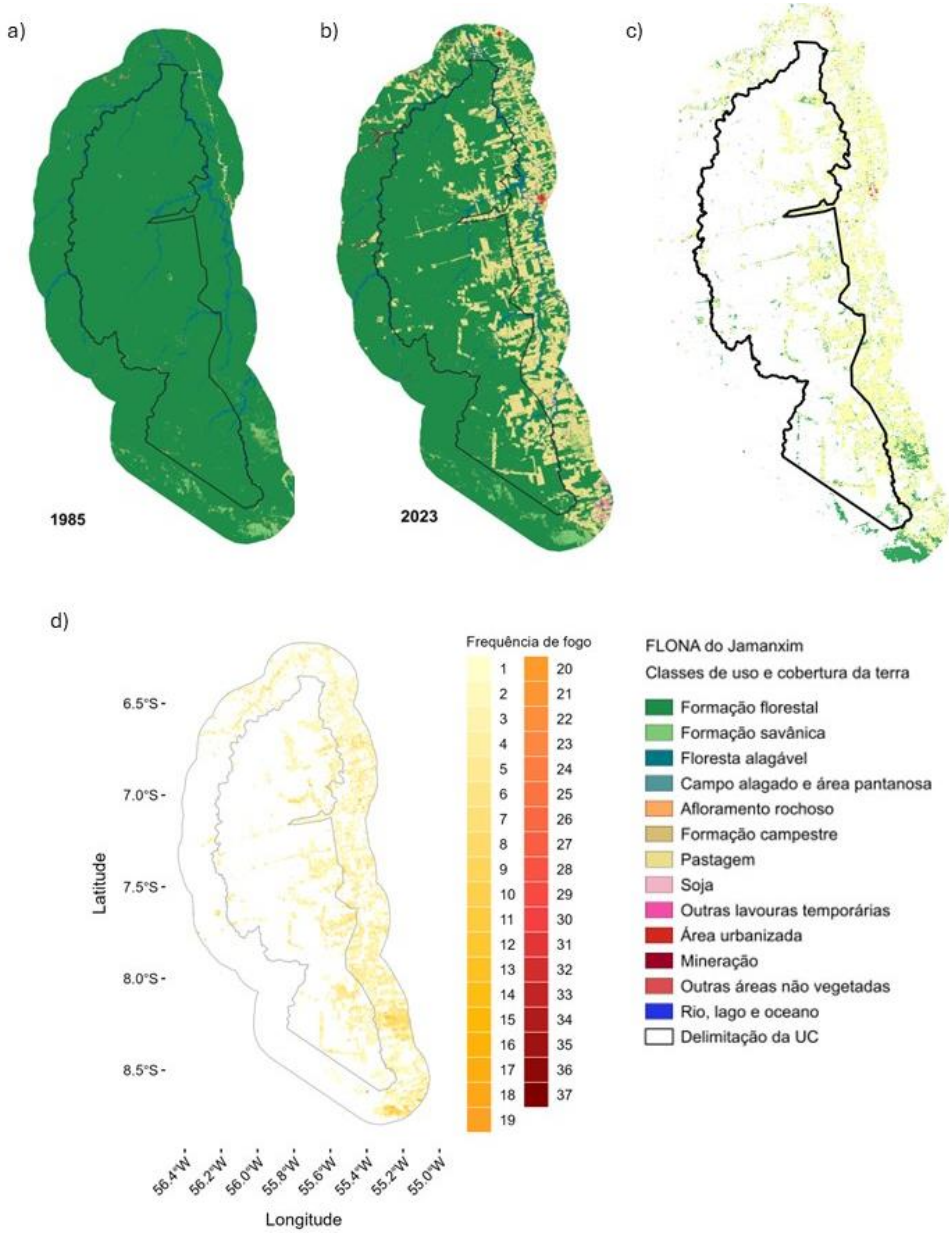
A recorrência do fogo está fortemente associada às formações savânicas e campestres, onde a presença de biomassa herbácea contínua favorece a propagação das queimadas durante a estação seca. Esse padrão é coerente com a elevada inflamabilidade das paisagens abertas do Cerrado e evidencia que o fogo constitui um processo recorrente na dinâmica da paisagem. Entretanto, os resultados indicam que essa dinâmica não deve ser interpretada apenas como fogo ecológico ou natural, uma vez que as cicatrizes também se sobrepõem a áreas de pastagem e a mosaicos de uso, especialmente no *buffer* (Figura 8c).

No entorno da UC, a expansão agropecuária observada entre 1985 e 2023 ampliou as bordas e as zonas de contato entre a vegetação nativa e as áreas antrópicas, favorecendo fontes

locais de ignição, maior conectividade do combustível e a recorrência do fogo. Assim, no Grande Sertão Veredas, a dinâmica das queimadas resulta da interação entre as características ecológicas do Cerrado, a sazonalidade seca e a intensificação do uso da terra no entorno, indicando que a conversão de formações naturais pode potencializar a frequência e a distribuição espacial do fogo na unidade e em sua zona de amortecimento.

A Floresta Nacional do Jamanxim apresentou o padrão mais crítico sob a perspectiva da degradação florestal (Figura 9).

Figura 9. Frequência do fogo, uso da terra e sazonalidade da queima na Floresta Nacional do Jamanxim



Apesar de a unidade estar inserida no bioma Amazônia, onde a floresta não é adaptada ao fogo recorrente, os mapas mostram elevada frequência de queima, especialmente em bordas, áreas próximas a acessos, zonas de conversão e setores associados à expansão agropecuária. A sobreposição entre as cicatrizes de fogo e o uso da terra indica que o fogo ocorre principalmente em áreas de floresta fragmentada, bordas florestais, pastagens, mosaicos agropecuários e zonas de transição entre a cobertura florestal e as áreas abertas (Figura 9c). Esse resultado reforça que, na FNJ, o fogo está fortemente associado à transformação da paisagem e à pressão antrópica, sendo menos compatível com uma dinâmica ecológica natural e mais relacionado à degradação florestal, à abertura de áreas e à recorrência de ignições humanas.

Por outro lado, no setor mais preservado da unidade, onde a cobertura florestal é mais contínua e o efeito de borda é reduzido, não se observam cicatrizes significativas de queima recorrente. Assim, os resultados mostram que o fogo está fortemente associado às áreas antropizadas e às bordas florestais, e não ao interior mais conservado da floresta.

Comparativamente, a Flona do Jamanxim foi a unidade que apresentou a maior frequência máxima de fogo no período analisado, seguida pelo Parque Nacional Grande Sertão Veredas e, por fim, pelo Parque Nacional da Chapada Diamantina. Essa diferença é relevante porque a severidade ecológica do fogo não depende apenas da área queimada ou da frequência, mas também da sensibilidade do ecossistema afetado. No Cerrado, como observado no Grande Sertão Veredas, o fogo faz parte da história evolutiva do bioma, embora sua intensificação e recorrência possam gerar impactos negativos quando associadas a regimes alterados. Já na Floresta Nacional do Jamanxim, a ocorrência recorrente de fogo em floresta amazônica representa um risco majorado de degradação, mortalidade arbórea, perda de biomassa, abertura do dossel e retroalimentação da inflamabilidade.

Os dados suplementares de área queimada mensal acumulada reforçam essa diferenciação (Materiais Suplementares 1, 2 e 3). Nas três unidades, a maior parte da queima concentra-se na estação seca e no período de transição seca-chuvosa, especialmente entre agosto, setembro e outubro. Esse padrão é mais pronunciado em Jamanxim e no Grande Sertão Veredas, onde os maiores acumulados mensais ocorrem no fim da estação seca, momento em que a vegetação está mais inflamável e a umidade do combustível é menor. Na Chapada Diamantina, embora a área queimada total seja inferior em relação à extensão territorial da unidade, também há uma marcada concentração sazonal, com eventos relevantes no segundo semestre e picos pontuais em anos específicos. Assim, a sazonalidade do fogo é comum às três áreas, mas a magnitude e a recorrência espacial variam conforme o bioma, o tipo de vegetação e a pressão de uso da terra.

A influência do ENOS deve ser interpretada de forma complementar, e não determinística. Os resultados discutidos mostram que anos de *El Niño*, *La Niña* e neutralidade apresentaram ocorrência de fogo, indicando que as fases quente e fria do ENOS modulam o risco climático, mas não explicam isoladamente a dinâmica de queima. Em anos de *El Niño*, a redução da precipitação e o aumento da temperatura podem intensificar a inflamabilidade, sobretudo na Amazônia e em áreas de Cerrado. Entretanto, os registros de fogo em anos de *La Niña* e neutros demonstram que a disponibilidade de combustível, a sazonalidade seca, o uso agropecuário, as bordas florestais e as fontes humanas de ignição são fundamentais para explicar a ocorrência e a propagação dos incêndios. Portanto, a resposta ao ENOS varia entre as unidades e depende da interação entre o clima regional e a estrutura da paisagem.

Em síntese, os resultados indicam que a dinâmica do fogo nas três unidades é controlada pela interação entre o bioma, sazonalidade climática, uso e cobertura da terra e a pressão antrópica. O Grande Sertão Veredas apresentou um padrão típico de paisagens savânicas, com ampla recorrência de fogo em formações campestres e savânicas; a Chapada Diamantina apresentou menor frequência relativa, mas com cicatrizes concentradas em áreas abertas e formações inflamáveis; e Jamanxim destacou-se como a área mais preocupante pela elevada frequência de fogo em uma matriz florestal amazônica progressivamente fragmentada, processo acentuado a partir de 2010. Dessa forma, o fogo assume significados ecológicos distintos: no Veredas, pode estar associado a regimes naturais ou manejados, embora alterados; na Chapada Diamantina, reflete a vulnerabilidade de paisagens abertas e ecotonais; e em Jamanxim, representa sobretudo um vetor de degradação florestal associado à conversão do uso da terra.

3.5 Estimativa do valor potencial dos serviços ecossistêmicos por classe de uso e cobertura da terra

Os serviços ecossistêmicos representam os benefícios diretos e indiretos que os ecossistemas fornecem à sociedade, sustentando processos ecológicos essenciais e contribuindo para o bem-estar humano. Neste estudo, eles foram organizados conforme a estrutura conceitual do TEEB (*Convention on Biological Diversity*, 2018), que permite agrupar as contribuições da natureza nas categorias de provisão, regulação, habitat/suporte e culturais (Tabela 1). Utilizou-se o arcabouço do TEEB para relacionar as classes de uso e cobertura da terra (advindas do MapBiomas, Capítulo – Seção 3.1) às funções ecológicas potencialmente desempenhadas pelas unidades de conservação, considerando serviços como provisão de água, regulação climática,

regulação hídrica, purificação da água, polinização, manutenção da biodiversidade, recreação, turismo, educação ambiental e valor paisagístico.

No contexto das unidades estudadas, os serviços ecossistêmicos assumem relevância particular por estarem associados a diferentes biomas, ecossistemas e pressões antrópicas. As formações florestais, savânicas, campestres, áreas alagadas e os corpos d'água contribuem para a manutenção da biodiversidade, regulação do clima, armazenamento de carbono, estabilidade hídrica e conservação do solo, conforme suas características físicas, bióticas e abióticas.

Por outro lado, a conversão de formações naturais para usos antrópicos tende a reduzir a capacidade da paisagem de sustentar os serviços ecossistêmicos, comprometendo a resiliência ecológica e a aptidão de responder a perturbações como o fogo recorrente, as secas, os extremos térmicos e a fragmentação da vegetação.

Tabela 2. Classificação dos serviços ecossistêmicos segundo o TEEB

Categoria TEEB	Serviço ecossistêmico	Descrição
Provisão	Alimentos	Frutos do Cerrado e recursos pesqueiros.
	Matérias-primas	Madeira manejada e biomassa vegetal.
	Água doce	Mananciais e recarga de aquíferos
	Recursos genéticos	Variabilidade de espécies endêmicas para fins biotecnológicos.
Regulação	Regulação climática	Estoque e sequestro de carbono florestal
	Regulação hídrica	Controle de vazão e manutenção do ciclo hidrológico regional.
	Purificação da água	Filtragem de poluentes e sedimentos pela vegetação ripária.
	Polinização	Manutenção de polinizadores para áreas agrícolas vizinhas às UCs.
Habitat suporte	Ciclo de vida	Berçário para espécies migratórias e manutenção da fauna local.
	Diversidade genética	Preservação de <i>hotspots</i> de biodiversidade
Cultural	Recreação e turismo	Ecoturismo e turismo de aventura.
	Estético	Valor das paisagens cênicas únicas.
	Espiritual e histórico	Identidade cultural sertaneja e conexão literária.
	Ciência e educação	Sítios para pesquisa científica e educação ambiental.

Fonte: Adaptado de TEEB (*Convention on Biological Diversity*, 2018).

Nota: Os serviços de provisão, regulação e culturais correspondem, respectivamente, às contribuições materiais, de regulação e não-materiais do *framework* IPBES (2019).

A valoração ambiental utilizada neste estudo não deve ser interpretada como uma precificação da natureza ou como a atribuição de um preço de mercado à biodiversidade. Trata-se de uma ferramenta analítica e comparativa que permite expressar, em termos monetários aproximados, parte dos benefícios ecológicos associados às classes de uso e cobertura da terra. Dessa forma, a valoração serve para evidenciar a importância econômica e socioambiental de serviços que frequentemente não são incorporados aos processos de planejamento territorial, gestão ambiental e tomada de decisão. A abordagem segue a lógica de Costanza et al. (1997), que estimaram valores de serviços ecossistêmicos por unidade de área para diferentes biomas, demonstrando que grande parte desses benefícios ocorre fora dos mercados formais e, por isso, tende a ser subestimada em avaliações econômicas convencionais.

Os valores utilizados foram expressos como taxas anuais, em dólares por hectare por ano ($\text{US\$} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$). Portanto, os resultados indicam o valor potencial anual dos serviços ecossistêmicos associados a cada classe de uso e cobertura da terra, e não um valor acumulado ou definitivo do ecossistema.

Essa distinção é fundamental, pois o objetivo da valoração não é estimar quanto vale uma unidade de conservação em termos absolutos, mas sim comparar como diferentes classes de cobertura contribuem para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e como a conversão de formações naturais para usos antrópicos representa uma perda potencial desses benefícios.

Essa abordagem também se alinha às discussões do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6), que destaca que os riscos climáticos afetam ecossistemas, biodiversidade, recursos hídricos, segurança alimentar e meios de vida, exigindo estratégias integradas de adaptação, conservação, aumento da resiliência e políticas públicas. No caso das unidades de conservação analisadas, a manutenção de formações naturais pode funcionar como um elemento estratégico para reduzir vulnerabilidades ambientais, conservar estoques de carbono, proteger recursos hídricos e sustentar a capacidade de recuperação dos ecossistemas diante de eventos extremos e de alterações nos regimes de fogo.

Assim, a estimativa do valor potencial dos serviços ecossistêmicos por classe de uso e cobertura da terra foi utilizada como uma medida complementar para avaliar os efeitos da conversão da paisagem entre 1985 e 2023. A partir dessa perspectiva, a perda de formações naturais não representa apenas uma alteração na estrutura espacial da paisagem, mas também uma redução potencial de funções ecológicas essenciais à resiliência ambiental das unidades de conservação e de suas zonas de amortecimento (*buffer*).

As Tabelas 2, 3 e 4 demonstram os cálculos de valoração ambiental das unidades de conservação e de seus respectivos *buffers*. A valoração potencial dos serviços ecossistêmicos evidenciou diferenças importantes entre as áreas protegidas.

Em valores absolutos, a Floresta Nacional do Jamanxim apresentou os maiores valores de VSE, tanto no interior da UC quanto no *buffer*, em virtude de sua maior extensão territorial e da predominância de formações florestais e áreas úmidas, que são classes com coeficientes de valoração mais elevados. Todavia, foi também a área com as maiores perdas potenciais entre 1985 e 2023: no interior da UC, o VSE reduziu de US\$ 4.640,94 milhões·ano⁻¹ para US\$ 4.064,10 milhões·ano⁻¹, representando uma perda de US\$ 576,85 milhões·ano⁻¹; no *buffer*, a redução foi ainda mais expressiva, passando de US\$ 3.817,12 milhões·ano⁻¹ para US\$ 2.979,08 milhões·ano⁻¹, o que equivale a uma perda de US\$ 838,04 milhões·ano⁻¹.

Tabela 3. Valoração de serviços ecossistêmicos – TEEB – Parque Nacional da Chapada Diamantina

PNCD — Parque Nacional da Chapada Diamantina: comparação por classe (1985–2023)									
<i>Valores em dólares constantes de 2023. VSE apresentado em milhões de US\$ por ano; variações com sinal positivo/negativo.</i>									
UC									
Classe MapBiomias	Área 1985 (ha)	Área 2023 (ha)	Δ área (ha)	Δ área (%)	Coef. 2023 (US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	VSE 1985 (US\$ mi/ano)	VSE 2023 (US\$ mi/ano)	Δ VSE (US\$ mi/ano)	Δ VSE (%)
Formação Florestal	30.312,81	29.258,78	-1.054,03	-3,48%	2.903,86	88,02	84,96	-3,06	-3,48%
Corpos d'água	283,81	177,76	-106,05	-37,37%	12.488,34	3,54	2,22	-1,32	-37,37%
Formação Savânica	72.045,37	72.351,50	+306,13	+0,42%	260,11	18,74	18,82	+0,08	+0,42%
Formação Campestre	44.917,81	42.235,79	-2.682,02	-5,97%	260,11	11,68	10,99	-0,70	-5,97%
Mosaico de Agricultura	2.887,94	7.043,80	+4.155,86	+143,90%	197,66	0,57	1,39	+0,82	+143,90%
Agricultura	41,47	341,02	+299,55	+722,33%	135,20	0,01	0,05	+0,04	+722,33%
Pastagem	117,27	519,93	+402,66	+343,36%	135,20	0,02	0,07	+0,05	+343,36%
Outras áreas não vegetadas	109,30	51,88	-57,42	-52,53%	0,00	0,00	0,00	0,00	
TOTAL	150.715,78	151.980,46	+1.264,68	+0,84%		122,58	118,50	-4,09	-3,33%
Buffer									
Classe MapBiomias	Área 1985 (ha)	Área 2023 (ha)	Δ área (ha)	Δ área (%)	Coef. 2023 (US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	VSE 1985 (US\$ mi/ano)	VSE 2023 (US\$ mi/ano)	Δ VSE (US\$ mi/ano)	Δ VSE (%)
Formação Florestal	148.316,20	145.066,20	-3.250,00	-2,19%	2.903,86	430,69	421,25	-9,44	-2,19%
Corpos d'água	0,00	3.621,30	+3.621,30		12.488,34	0,00	45,22	+45,22	
Formação Savânica	334.713,60	303.006,50	-31.707,10	-9,47%	260,11	87,06	78,82	-8,25	-9,47%
Formação Campestre	17.082,19	16.550,21	-531,98	-3,11%	260,11	4,44	4,30	-0,14	-3,11%
Mosaico de Agricultura	75.203,06	36.971,20	-38.231,86	-50,84%	197,66	14,86	7,31	-7,56	-50,84%
Agricultura	1.255,53	51.754,98	+50.499,45	+4022,16%	135,20	0,17	7,00	+6,83	+4022,16%
Pastagem	40.925,73	62.418,07	+21.492,34	+52,52%	135,20	5,53	8,44	+2,91	+52,52%
Outras áreas não vegetadas	329,70	428,12	+98,42	+29,85%	0,00	0,00	0,00	0,00	
TOTAL	617.826,01	619.816,58	+1.990,57	+0,32%		542,76	572,34	+29,58	+5,45%

Tabela 4. Valoração de serviços ecossistêmicos – TEEB – Parque Nacional Grande Sertão Veredas

PNGSV — Parque Nacional Grande Sertão Veredas: comparação por classe (1985–2023)									
Valores em dólares constantes de 2023. VSE apresentado em milhões de US\$ por ano; variações com sinal positivo/negativo.									
UC									
Classe MapBiomias	Área 1985 (ha)	Área 2023 (ha)	Δ área (ha)	Δ área (%)	Coef. 2023 (US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	VSE 1985 (US\$ mi/ano)	VSE 2023 (US\$ mi/ano)	Δ VSE (US\$ mi/ano)	Δ VSE (%)
Formação Florestal	6.247,89	7.370,64	+1.122,75	+17,97%	2.903,86	18,14	21,40	+3,26	+17,97%
Corpos d'água	62,98	1,22	-61,76	-98,06%	12.488,34	0,79	0,02	-0,77	-98,06%
Campo alagado e área pantanosa	6.026,68	5.098,10	-928,58	-15,41%	197,66	1,19	1,01	-0,18	-15,41%
Formação Savânica	140.542,89	141.364,19	+821,30	+0,58%	260,11	36,56	36,77	+0,21	+0,58%
Formação Campestre	76.486,09	76.105,19	-380,90	-0,50%	260,11	19,89	19,80	-0,10	-0,50%
Afloramento rochoso	0,00	36,57	+36,57		197,66	0,00	0,01	+0,01	
Mosaico de Agricultura	25.589,43	0,00	-25.589,43	-100,00%	197,66	5,06	0,00	-5,06	-100,00%
Agricultura	261,10	345,00	+83,90	+32,13%	135,20	0,04	0,05	+0,01	+32,13%
Pastagem	449,42	141,97	-307,45	-68,41%	135,20	0,06	0,02	-0,04	-68,41%
Outras áreas não vegetadas	319,05	133,25	-185,80	-58,24%	0,00	0,00	0,00	0,00	
TOTAL	255.985,53	230.596,13	-25.389,40	-9,92%		81,73	79,07	-2,66	-3,26%
Buffer									
Classe MapBiomias	Área 1985 (ha)	Área 2023 (ha)	Δ área (ha)	Δ área (%)	Coef. 2023 (US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	VSE 1985 (US\$ mi/ano)	VSE 2023 (US\$ mi/ano)	Δ VSE (US\$ mi/ano)	Δ VSE (%)
Formação Florestal	18.561,11	17.391,94	-1.169,17	-6,30%	2.903,86	53,90	50,50	-3,40	-6,30%
Corpos d'água	0,00	894,13	+894,13		12.488,34	0,00	11,17	+11,17	
Campo alagado e área pantanosa	10.630,32	6.858,58	-3.771,74	-35,48%	197,66	2,10	1,36	-0,75	-35,48%
Formação Savânica	345.784,11	278.263,56	-67.520,55	-19,53%	260,11	89,94	72,38	-17,56	-19,53%
Formação Campestre	162.328,91	137.172,92	-25.155,99	-15,50%	260,11	42,22	35,68	-6,54	-15,50%
Mosaico de Agricultura	0,00	6.779,94	+6.779,94		197,66	0,00	1,34	+1,34	
Agricultura	4.180,90	85.473,52	+81.292,62	+1944,38%	135,20	0,57	11,56	+10,99	+1944,38%
Pastagem	6.858,58	35.182,10	+28.323,52	+412,96%	135,20	0,93	4,76	+3,83	+412,96%
Mineração	1,00	4,00	+3,00	+300,00%	0,00	0,00	0,00	0,00	
Outras áreas não vegetadas	3.355,95	6.214,70	+2.858,75	+85,18%	0,00	0,00	0,00	0,00	
TOTAL	551.700,88	574.235,39	+22.534,51	+4,08%		189,66	188,74	-0,92	-0,49%

Tabela 5. Valoração de serviços ecossistêmicos – TEEB – Floresta Nacional do Jamanxim

FNJ — Floresta Nacional do Jamanxim: comparação por classe (1985–2023)									
Valores em dólares constantes de 2023. VSE apresentado em milhões de US\$ por ano; variações com sinal positivo/negativo.									
UC									
Classe MapBiomias	Área 1985 (ha)	Área 2023 (ha)	Δ área (ha)	Δ área (%)	Coef. 2023 (US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	VSE 1985 (US\$)	VSE 2023 (US\$)	Δ VSE (US\$)	Δ VSE (%)
Formação Florestal	1.261.801,00	1.070.837,00	-190.964,00	-15,13%	2.903,86	3.664,09	3.109,56	-554,53	-15,13%
Floresta Alagável	32.953,00	31.213,00	-1.740,00	-5,28%	28.775,00	948,22	898,15	-50,07	-5,28%
Corpos d'água	2.248,00	2.403,00	+155,00	+6,90%	12.488,34	28,07	30,01	+1,94	+6,90%
Formação Savânica	1.373,00	1.079,00	-294,00	-21,41%	260,11	0,36	0,28	-0,08	-21,41%
Formação Campestre	623,00	414,00	-209,00	-33,55%	260,11	0,16	0,11	-0,05	-33,55%
Afloramento rochoso	1.796,00	1.807,00	+11,00	+0,61%	0,00	0,00	0,00	0,00	
Agricultura	0,00	136,00	+136,00		135,20	0,00	0,02	+0,02	
Pastagem	261,00	192.064,00	+191.803,00	+73487,74%	135,20	0,04	25,97	+25,93	+73487,74%
Mineração	0,00	716,00	+716,00		0,00	0,00	0,00	0,00	
TOTAL	1.301.055,00	1.300.669,00	-386,00	-0,03%		4.640,94	4.064,10	-576,85	-12,43%
Buffer									
Classe MapBiomias	Área 1985 (ha)	Área 2023 (ha)	Δ área (ha)	Δ área (%)	Coef. 2023 (US\$ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	VSE 1985 (US\$)	VSE 2023 (US\$)	Δ VSE (US\$)	Δ VSE (%)
Formação Florestal	1.301.576,00	934.863,00	-366.713,00	-28,17%	2.903,86	3.779,59	2.714,71	-1.064,88	-28,17%
Floresta Alagável	932,00	191,00	-741,00	-79,51%	28.775,00	26,82	5,50	-21,32	-79,51%
Corpos d'água	0,00	16.014,00	+16.014,00		12.488,34	0,00	199,99	+199,99	
Formação Savânica	31.403,00	27.998,00	-3.405,00	-10,84%	260,11	8,17	7,28	-0,89	-10,84%
Formação Campestre	5.438,00	2.934,00	-2.504,00	-46,05%	260,11	1,41	0,76	-0,65	-46,05%
Afloramento rochoso	2.692,00	2.701,00	+9,00	+0,33%	0,00	0,00	0,00	0,00	
Agricultura	10,00	3.806,00	+3.796,00	+37960,00%	135,20	0,00	0,51	+0,51	+37960,00%
Pastagem	8.313,00	372.237,00	+363.924,00	+4377,77%	135,20	1,12	50,33	+49,21	+4377,77%
Mineração	826,00	7.623,00	+6.797,00	+822,88%	0,00	0,00	0,00	0,00	
TOTAL	1.351.190,00	1.368.367,00	+17.177,00	+1,27%		3.817,12	2.979,08	-838,04	-21,95%

No Parque Nacional da Chapada Diamantina, o interior da UC apresentou uma pequena redução no valor potencial dos serviços ecossistêmicos, associada principalmente à perda de formações florestais e campestres. No *buffer*, houve um aumento do VSE, mas esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois decorre da combinação entre mudanças nas classes mapeadas, aumento de corpos d'água e expansão de usos agropecuários (que também são valorados), não representando necessariamente um ganho ecológico real ou a melhoria da integridade ambiental.

No Parque Nacional Grande Sertão Veredas, tanto o interior da UC quanto o *buffer* apresentaram relativa estabilidade no VSE, com perdas menores quando comparadas às da Flona do Jamanxim. Ainda assim, a redução de formações campestres, áreas alagadas e formações savânicas no *buffer* indica uma perda potencial de serviços associados à regulação hídrica, à conservação da biodiversidade, ao suporte ao ciclo de vida e à manutenção da paisagem savânica do Cerrado, principalmente das veredas, que possuem grande importância ambiental e sensibilidade ecológica.

Comparativamente, a FNJ foi a unidade mais vulnerável à perda potencial de serviços ecossistêmicos, especialmente no *buffer*, onde a conversão de formações naturais para pastagem, agricultura e mineração reduziu de forma expressiva o valor associado à paisagem.

O PNGSV apresentou perdas mais moderadas, mas relevantes por afetarem formações naturais típicas do Cerrado. Deve-se considerar que parte da conversão para a agropecuária, tendo em vista os coeficientes da literatura, possui valores estimados que podem mascarar o real comprometimento da valoração ambiental.

Por fim, o PNCD apresentou a menor perda no interior da UC e um comportamento distinto no seu entorno. Assim, os resultados indicam que a perda de cobertura natural não implica apenas uma alteração espacial da paisagem, mas sim uma redução potencial da capacidade das UCs e de seus entornos de manterem serviços fundamentais.

4 Considerações finais

A dinâmica do fogo nas Unidades de Conservação analisadas resulta da complexa interação entre variabilidade climática, extremos hidroclimáticos, estrutura da vegetação, uso e cobertura da terra e pressão antrópica. A ocorrência de fogo em anos de *El Niño*, *La Niña* e neutralidade indica que o ENOS atua como um importante modulador do risco climático, mas não explica de forma isolada a ocorrência ou a extensão dos incêndios. A propagação do fogo

depende da interação concomitante entre a disponibilidade de combustível, sazonalidade seca, fontes de ignição, acúmulo de biomassa e as condições meteorológicas locais.

As três unidades apresentaram respostas distintas a esses fatores. No Parque Nacional da Chapada Diamantina, a queima foi mais localizada, concentrando-se em formações abertas, áreas campestres, savânicas e afloramentos rochosos, refletindo a combinação entre a sazonalidade seca, o relevo acidentado, os extremos térmicos e as pressões no entorno.

No Parque Nacional Grande Sertão Veredas, a recorrência do fogo foi mais ampla e espalhada pela paisagem, especialmente em formações savânicas e campestres, evidenciando a inflamabilidade natural do Cerrado, mas também a forte influência da expansão agropecuária na zona de amortecimento.

Na Floresta Nacional do Jamanxim, o fogo assumiu o caráter mais crítico sob a perspectiva da degradação, concentrando-se em bordas florestais, áreas antropizadas e setores sob influência direta do eixo da rodovia BR-163, onde a fragmentação da floresta, o desmatamento e a conversão da cobertura natural ampliam drasticamente a vulnerabilidade da floresta amazônica.

A análise comparativa deixa evidente que os *buffers* desempenham um papel central na dinâmica dos incêndios. Nas três unidades de conservação, as zonas de amortecimento concentraram as maiores pressões associadas à conversão da vegetação nativa, à expansão agropecuária e ao efeito de borda, elevando a probabilidade de ignições antrópicas. Esse resultado reforça que a efetividade da conservação não depende apenas da proteção formal estabelecida no interior das UCs, mas também de uma gestão territorial integrada de seu entorno, especialmente em paisagens submetidas à expansão da fronteira produtiva e à intensificação de extremos climáticos.

A valoração ambiental indicou de forma clara que a perda de cobertura natural representa uma severa perda potencial de serviços ecossistêmicos. A Floresta Nacional do Jamanxim apresentou os maiores valores absolutos de serviços ecossistêmicos devido à sua tipologia vegetal, mas registrou também as maiores perdas potenciais entre 1985 e 2023. Esse resultado reflete a imensa importância das formações florestais e áreas úmidas para a regulação climática, a conservação da biodiversidade, a estabilidade hídrica e o armazenamento de carbono, mas também evidencia sua extrema vulnerabilidade frente à conversão da paisagem.

Em síntese, os resultados indicam que o fogo, a conversão da vegetação nativa e a perda de serviços ecossistêmicos são processos interdependentes e retroalimentados. A conservação das UCs federais analisadas exige estratégias urgentes que integrem o monitoramento climático contínuo, o controle rigoroso do desmatamento, a consolidação do manejo integrado do fogo

(MIF), proteção efetiva dos *buffers*, restauração de áreas degradadas e a incorporação dos serviços ecossistêmicos nas tomadas de decisão econômica. Essa abordagem integrada é essencial para ampliar a resiliência das áreas protegidas frente às mudanças climáticas globais, mitigar os riscos ambientais e salvaguardar a biodiversidade regional.

5 Referências

- Almeida, H. A. (2016). *Climatologia aplicada à geografia*. Campina Grande, PB: EDUEPB. <https://editora.ifpb.edu.br/index.php/uepb/catalog/book/128>
- Alencar, A., Nepstad, D., & Diaz, M. C. V. (2006). Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO years: area burned and committed carbon emissions. *Earth Interactions*, 10(6), 1-17. <https://www.doi.org/10.1175/EI150.1>
- Amorim, A. C. B., Chaves, R. R., & Silva, C. M. S. (2020). Regionalização e análise da tendência da precipitação do Rio Grande do Norte associada a padrões de TSM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(2), 269-280. <https://doi.org/10.1590/0102-7786352024>
- Barlow, J., & Peres, C. A. (2008). Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1787-1794. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0013>
- Barros, C., & Oliveira, R. (2023, 17 out.). *Quem está destruindo as unidades de conservação da Amazônia?* <https://www.ecodebate.com.br/2023/10/17/quem-esta-destruindo-as-unidades-de-conservacao-da-amazonia/>
- Brando, P. M., Balch, J. K., Nepstad, D. C., & Soares-Filho, B. S. (2014). Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 111(17), 6347-6352. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305499111>
- Brasil. (2000). **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm
- Brasil. Unidades de Conservação no Brasil. (2023). *Floresta Nacional do Jamanxim*. <https://uc.socioambiental.org/arp/4445>
- Cochrane, M. A., & Laurance, W. F. (2002). Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests. *Journal of Tropical Ecology*, 18(3), 311-325. <https://doi.org/10.1017/S0266467402002237>
- Cohen, J. C. P., Silva Dias, M. A. F., & Nobre, C. A. (1995). Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. *Monthly Weather Review*, 123(11), 3163-3174. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123%3C3163:ECAWAS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123%3C3163:ECAWAS%3E2.0.CO;2)
- Convention on Biological Diversity. Economics, Trade and Incentive Measures. (2018). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB)*. 31 mai. 2018. <https://www.cbd.int/incentives/teeb>

- Correia Filho, W. L. F., Oliveira-Júnior, J. F., Santiago, D. B., Terassi, P. M. B., Teodoro, P. E., & Gois, G. (2019). Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSA product. *Big Earth Data*, 3(4), 315-337. <https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1692298>
- Costa, E. G. (2020). *Índice de Risco Potencial de Fogo (PFIV2), na prevenção de incêndios florestais: Estudo de caso no Parque Nacional da Serra da Canastra* [Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais]. <https://repositorio.ifmg.edu.br/server/api/core/bitstreams/9c4d3c7f-12d2-449b-804d-559ef3722436/content>
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., ..., & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://www.doi.org/10.1038/387253a0>
- Dutra, D. J., Anderson, L. O., Fearnside, P. M., Graça, P. M. L. A., Yanai, A. M., Dalagnol, R., & Aragão, L. E. O. C. (2023). Fire dynamics in an emerging deforestation frontier in southwestern Amazonia, Brazil. *Fire*, 6(1), 2. <https://doi.org/10.3390/fire6010002>
- Fearnside, P. M. (2007). Brazil's Cuiabá-Santarém (BR-163) Highway: the environmental cost of paving a soybean corridor through the Amazon. *Environmental Management*, 39, 601-614. <https://www.doi.org/10.1007/s00267-006-0149-2>
- Fire Information for Resource Management System. (2024a). *Active fire data*. https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/#:~:text=NASA%20%7C%20LANCE%20%7C%20Fire%20Information%20for%20Resource,or%20can%20be%20viewed%20through%20a%20map%20interface.
- Fire Information for Resource Management System. (2024b). *VIIRS Suomi-NPP, NOAA-20 and NOAA-21 Fires and Thermal Anomalies*. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>
- Garreaud, R. D. (2000). Cold air incursions over subtropical South America: mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, 128(7), 2544-2559. [https://www.doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2544:CAIOSS>2.0.CO;2](https://www.doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2544:CAIOSS>2.0.CO;2)
- Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing Environmental*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hastenrath, S. (2006). Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. *Progress in Oceanography*, 70(2-4), 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2005.07.004>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The physical science basis*. Cambridge: IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: IPCC.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services: summary for policymakers*. Bonn, Germany: IPBES. https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf?utm_source=chatgpt.com

Jaureguiberry, P., Titeux, N., Wiemers, M., Bowler, D. E., Coscieme, L., Golden, A. S., & Purvis, A. (2022). The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science Advances*, 8(45). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9982>

Keck, F., Peller, T., Alther, R., Barouillet, C., Blackman, R., Capo, E., & Altermatt, F. (2025). The global human impact on biodiversity. *Nature*, 641:395-400. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08752-2>

Kumar, S., Getirana, A., Libonati, R., Hain, C., Mahanama, S., & Andela, N. (2022). Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. *Scientific Reports*, 12:964. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05130-0>

Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., ... & Walker, W. S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379(6630), eabp8622. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>

Leite, C. C. S. S., Santos, S. M. B., Rocha, W. J. S. F., Silva, A. B., & Baptista, G. M. M. (2017). Análise dos incêndios ocorridos no Parque Nacional da Chapada Diamantina-Bahia em 2008 e 2015 com suporte em índices espectrais de vegetação. *Rev. Bras. Cartografia*, 69(6), 1127-1141. <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44315/23397>

Lyra, M. J. A., Chou, S. C., & Cavalcanti, I. F. A. (2023). Estudo sinótico e da estrutura vertical de um vórtice ciclônico de altos níveis ocorrido em janeiro de 2016. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38, e38230092. <https://doi.org/10.1590/0102-77863810092>

MapBiomass. (2025). 40 anos de fogo nos biomas brasileiros: coleção 4 do MapBiomass Fogo (1985 a 2024). https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2025/06/Fact_Fogo_colecao4.pdf

Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Oyama, M. D., Oliveira, G. S., Oliveira, R., ..., & Brown, I. F. (2008). The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 21(3), 495-516. <https://www.doi.org/10.1175/2007JCLI1600.1>

Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033-1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>

Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R., & Rodriguez, D. A. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, 38(12), L12703. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>

- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Días, P. L., Cavalcanti, I. F. A., & Alves, L. M. (2012). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 32(1), 1-21. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>
- Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil – past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 1189-1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Pivello, V. R. (2011). The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present. *Fire Ecology*, 7(1), 24-39. <https://www.doi.org/10.4996/fireecology.0701024>
- Pivello, V. R., Vieira, I., Christianini, A. V., Ribeiro, D. B., Menezes, L. S., Berlinck, C. N., ..., & Overbeck, G. E. (2021). Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Pecon*, 19(3), 233-255. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>
- Ribeiro, A. F. S., Santos, L., Randerson, J. T., Uribe, M. R., Alencar, A. A. C., Macedo, M. N., ..., & Brando, P. M. (2024). The time since land-use transition drives changes in fire regimes at the Cerrado-Amazon agricultural frontier. *Communications Earth & Environment*, 5, 96. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01248-3>
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
- Segura-Garcia, C., Alencar, A., Arruda, V. L. S., Bauman, D., Silva, W., Conciani, D. E., Menor, I. O. (2025). The fire regimes of the Cerrado and their changes through time. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 380(1924), 20230460. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0460>
- Siegel, K., Perez, A. F., Kinnebrew, E., Mills-Novoa, M., Ochoa, J., & Shoffner, E. (2022). Integration of qualitative and quantitative methods for land-use-change modeling in a deforestation frontier. *Conservation Biology*, 36(6), e13924, 2022. <https://www.doi.org/10.1111/cobi.13924>
- Silva, P. S., Libonati, R., Gonçalves, L. G., Dacamara, C. C. (2025). The climatic patterns that control regional fire activity in the Brazilian savanna. *Agricultural and Forest Meteorology*, 374, 110792. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110792>
- Teixeira, T. H., Ferreira Neto, J. A., Moura, R. A., & Figueiredo, N. A. (2017). As unidades de conservação de uso sustentável no bioma amazônico: dilemas e perspectivas para o desenvolvimento sustentável. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, (46), 71-89. <https://doi.org/10.59072/rper.vi46.480>
- Uhl, C., & Kauffman, J. B. (1990). Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the Eastern Amazon. *Ecology*, 71(2), 437-449. <https://doi.org/10.2307/1940299>
- Van der Ploeg, S., De Groot, R. S., & Wang, Y. (2010). *The TEEB Valuation Database: A searchable database of 1310 estimates of monetary values of ecosystem services*. Wageningen: Foundation for Sustainable Development.

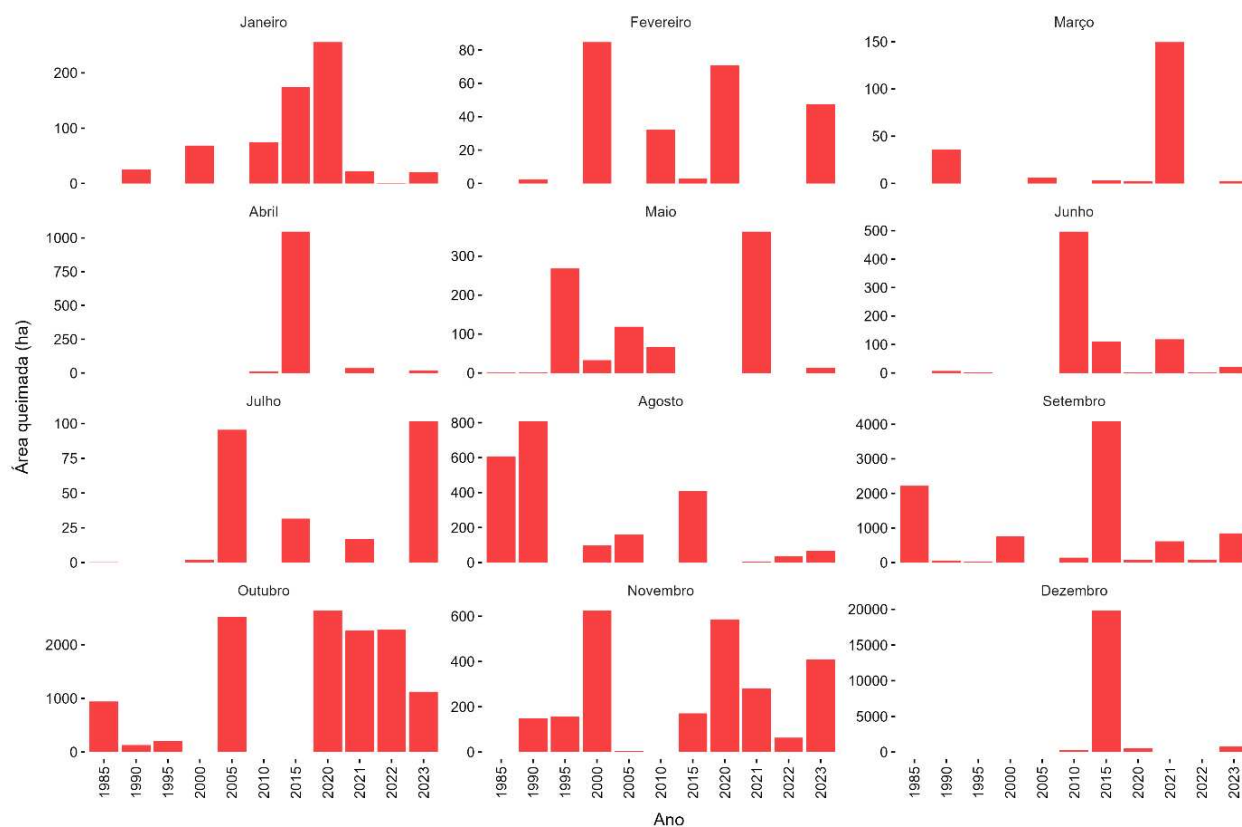
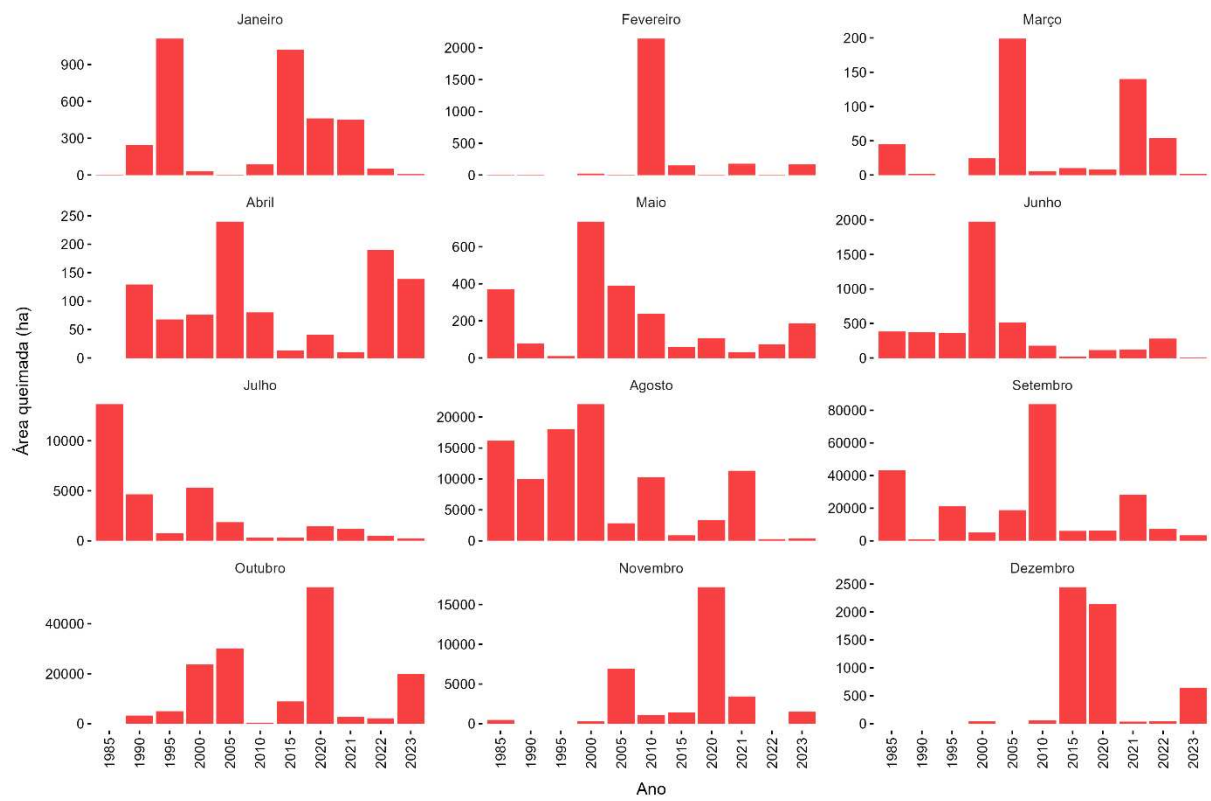


Figura S2. Área queimada mensal acumulada no Parque Nacional Grande Sertão Veredas (1985-2023)



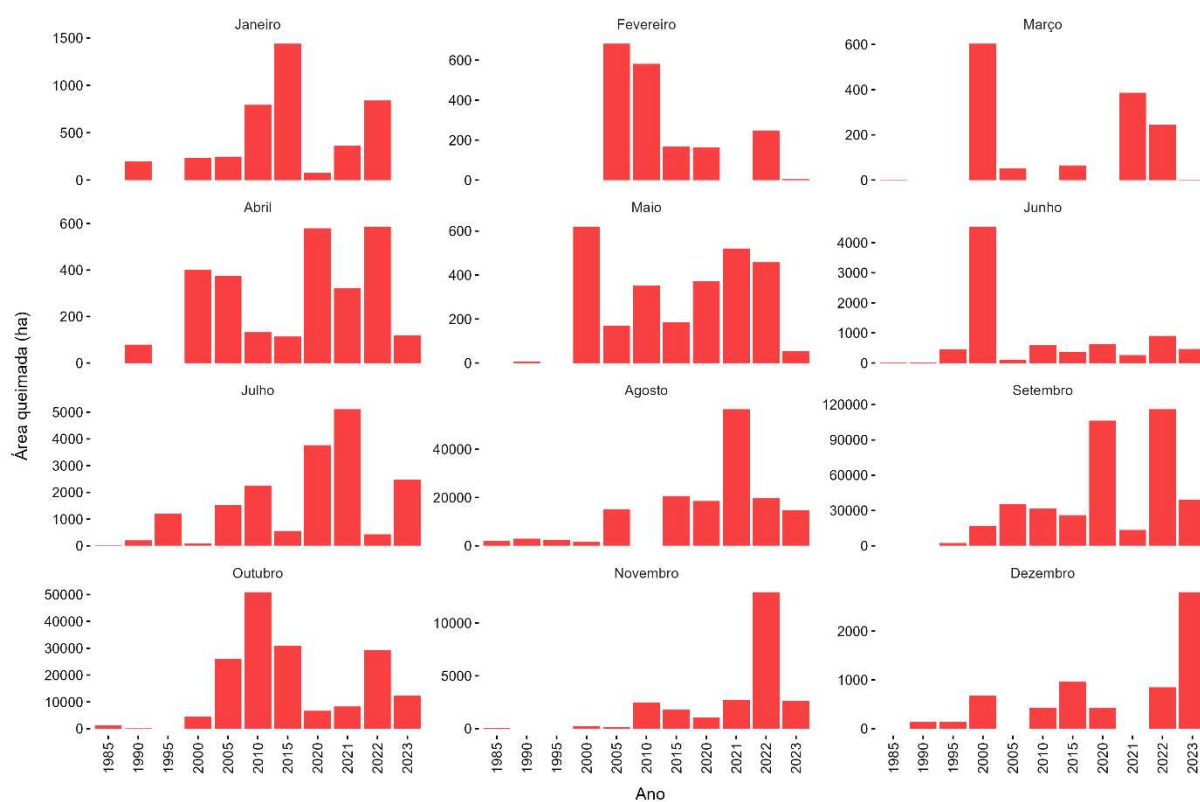


Figura S4. Frequência mensal de área queimada no Parque Nacional da Chapada Diamantina (1985-2023)

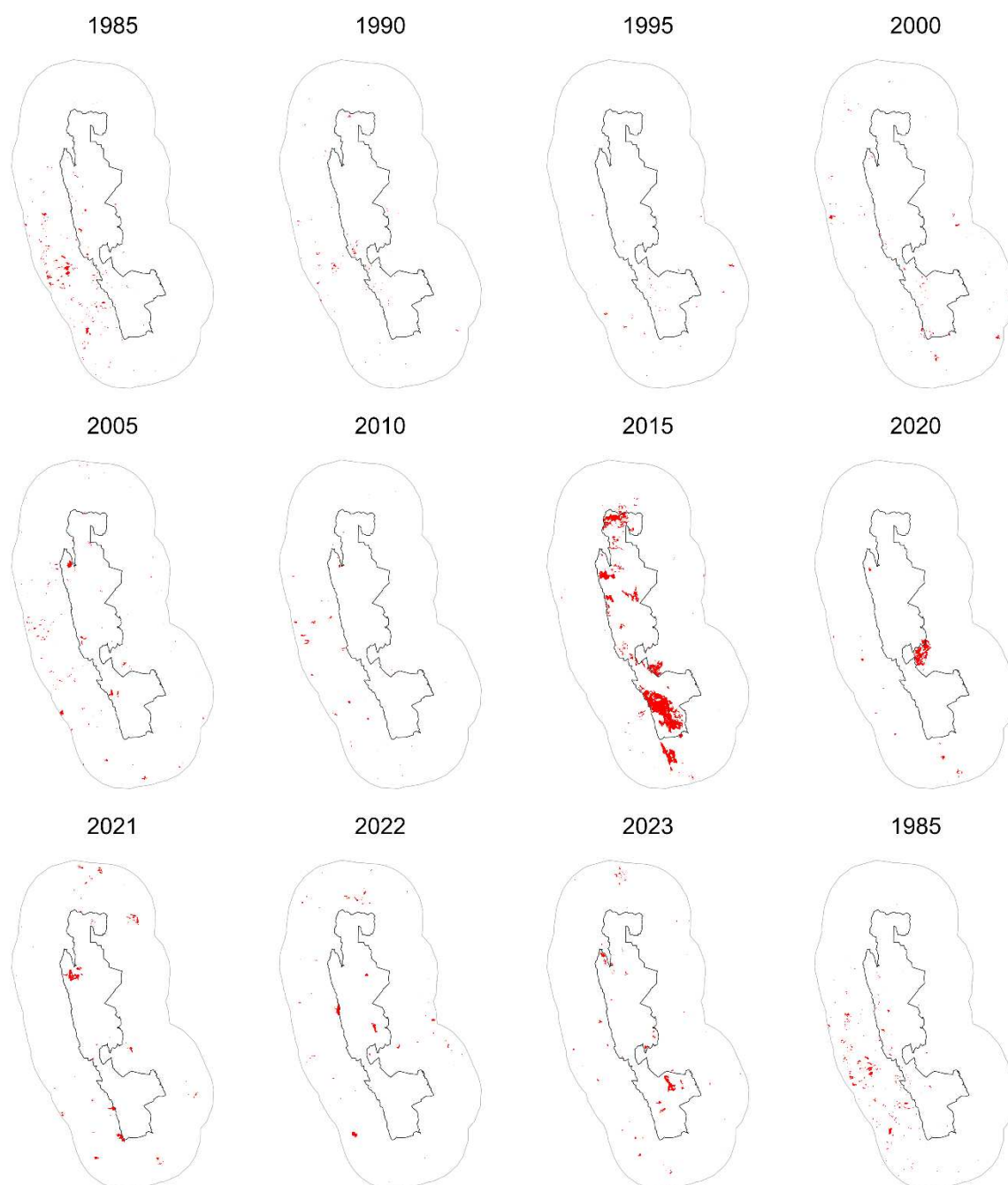


Figura S5. Frequência mensal de área queimada no Parque Nacional Grande Sertão Veredas (1985-2023)

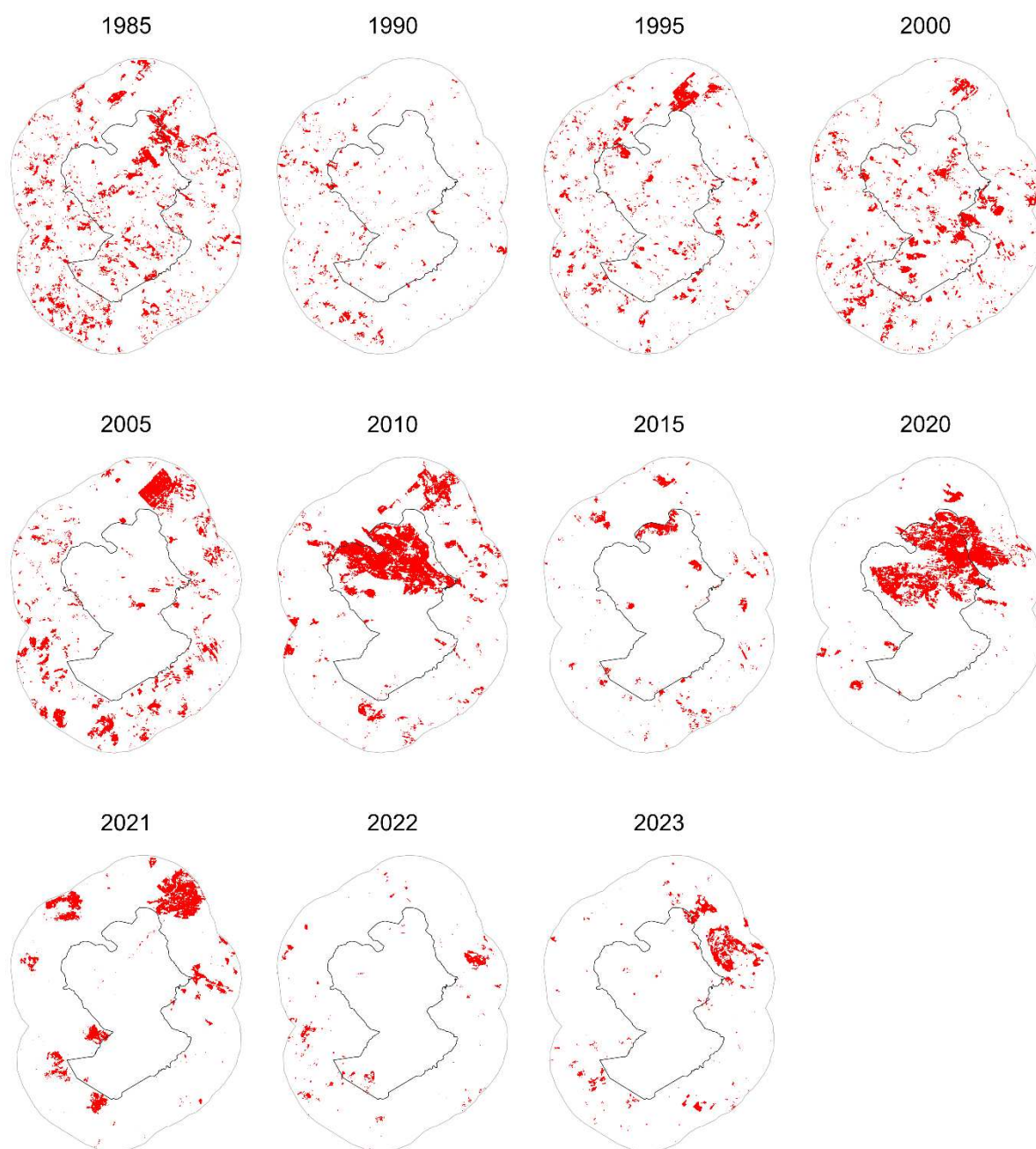
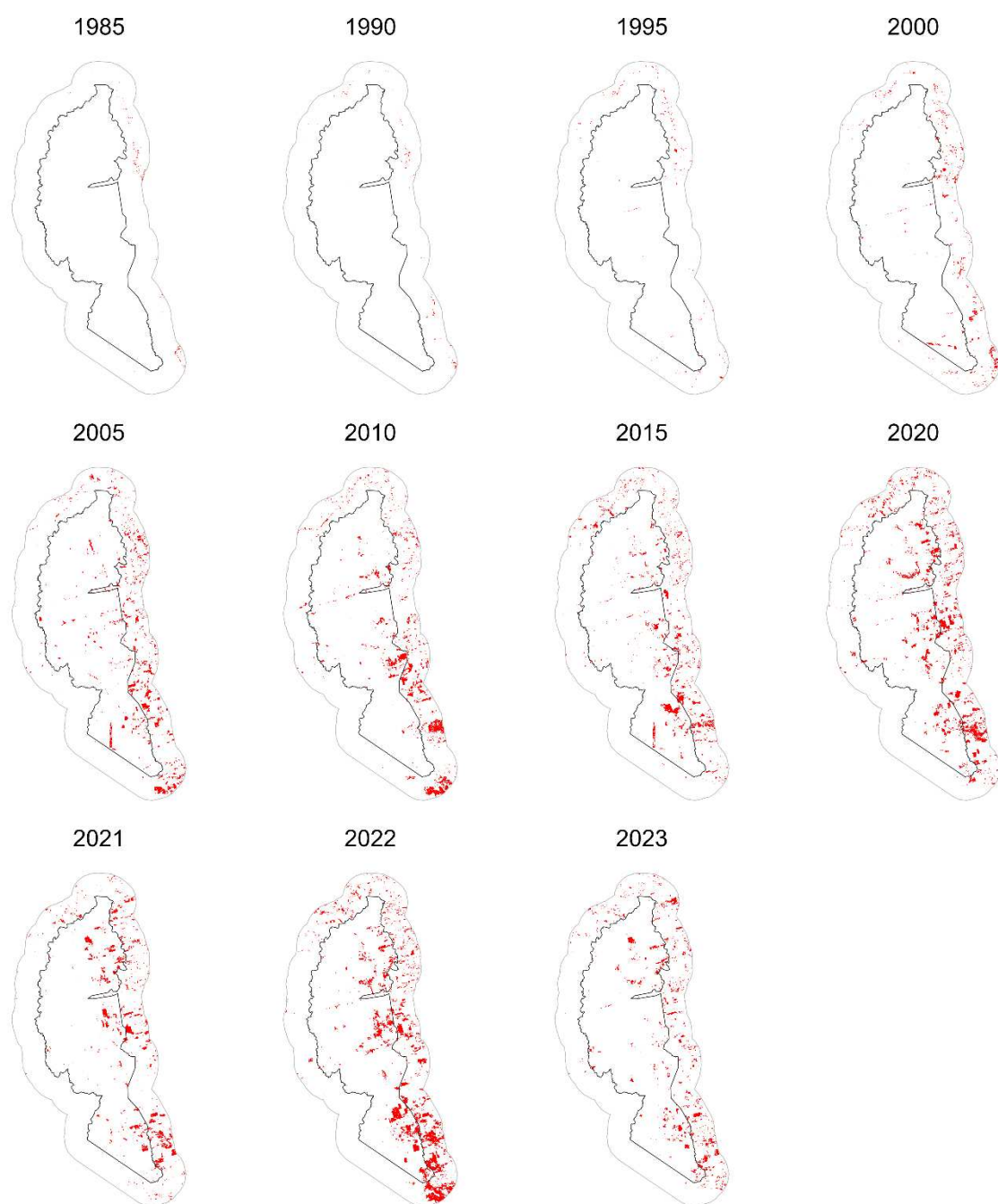


Figura S6. Frequência mensal de área queimada na Florestal Nacional do Jamanxim (1985-2023)



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que a vulnerabilidade ambiental das Unidades de Conservação Federais analisadas resulta da interação entre variabilidade climática, extremos climáticos, mudanças no uso e cobertura da terra, e alteração dos regimes de fogo. Embora essas áreas desempenhem papel estratégico na conservação da biodiversidade, regulação climática, proteção dos recursos hídricos e manutenção dos serviços ecossistêmicos, os resultados indicam que sua efetividade pode ser comprometida quando pressões climáticas e antrópicas atuam simultaneamente no interior das unidades e, sobretudo, em seus buffers.

Nos Parques Nacionais da Chapada Diamantina e Grande Sertão Veredas, os resultados evidenciaram que a conservação da cobertura natural no interior das UCs não é suficiente para garantir a estabilidade ecológica da paisagem quando o entorno apresenta expansão agropecuária, fragmentação da vegetação e aumento de áreas antropizadas.

No Parque Nacional da Chapada Diamantina, a manutenção relativa das formações naturais no interior contrasta com a conversão de áreas no *buffer*, especialmente nas bordas oeste e sudoeste, contribuindo para maior exposição a extremos térmicos, redução da umidade da vegetação e aumento da vulnerabilidade ao fogo.

No Parque Nacional Grande Sertão Veredas, a pressão no entorno foi ainda mais expressiva, com redução de formações naturais e avanço de atividades agropecuárias, ampliando o risco sobre formações savânicas, campestres e veredas, ecossistemas essenciais à regulação hídrica e à manutenção da biodiversidade do Cerrado.

A análise climática mostrou intensificação de sinais de aquecimento e alterações nos padrões de precipitação, com aumento de extremos térmicos, maior ocorrência de dias quentes e noites tropicais, além de mudanças na duração dos períodos secos. Esses resultados indicam que os ecossistemas estudados estão sujeitos a maior demanda evaporativa, estresse hídrico e redução da umidade dos combustíveis vegetais. No Cerrado e na Caatinga, esse processo tende a aumentar a inflamabilidade das formações abertas, na Amazônia, favorece a entrada e propagação do fogo em florestas previamente degradadas, fragmentadas ou submetidas ao efeito de borda.

A Floresta Nacional do Jamanxim apresentou o quadro mais crítico de degradação entre as unidades analisadas. Inserida na fronteira de expansão da Amazônia Oriental e sob influência do eixo da BR-163, a unidade apresentou forte associação entre desmatamento, fragmentação florestal, expansão agropecuária, recorrência do fogo e perda potencial de serviços ecossistêmicos. Os resultados indicam que o fogo se concentrou principalmente em bordas, áreas antropizadas e zonas de conversão, enquanto setores mais preservados, com cobertura florestal contínua e menor efeito de borda, apresentaram menor recorrência de queima. Esse padrão reforça que, o fogo está mais associado à degradação e à transformação da paisagem do que a uma dinâmica ecológica natural.

A análise comparativa da dinâmica do fogo evidenciou que as queimadas não respondem de forma linear às fases do ENOS. A ocorrência de fogo em anos de *El Niño*, *La Niña* e neutralidade demonstra que as teleconexões climáticas modulam o risco, mas não determinam isoladamente a ocorrência ou a extensão dos incêndios.

A propagação do fogo depende também da sazonalidade climática, disponibilidade e continuidade do combustível, tipo de vegetação, umidade antecedente, estrutura da paisagem e das fontes antrópicas de ignição. Assim, o fogo assume significados ecológicos distintos entre as áreas: na Chapada Diamantina, associa-se a formações abertas, relevo heterogêneo e sazonalidade seca; no Grande Sertão Veredas, reflete a inflamabilidade natural das paisagens savânicas, mas também a intensificação do uso da terra no entorno; em Jamanxim, representa um vetor de degradação florestal associado à conversão da cobertura natural.

A valoração ambiental demonstrou que a perda de vegetação natural implica também redução potencial da capacidade das UCs e de seus entornos de manterem serviços ecossistêmicos fundamentais. A Floresta Nacional do Jamanxim apresentou os maiores valores absolutos de serviços ecossistêmicos, em razão de sua extensão territorial e da predominância de formações florestais e áreas úmidas, mas também registrou as maiores perdas potenciais, especialmente no *buffer*.

No Parque Nacional Grande Sertão Veredas, as perdas foram mais moderadas, porém relevantes por afetarem formações naturais típicas do Cerrado e ambientes hidrologicamente sensíveis, como veredas. No Parque Nacional da Chapada Diamantina, os resultados indicam que alterações no *buffer* podem comprometer funções ecológicas importantes para a conectividade, a regulação hídrica e a resiliência da paisagem.

De forma integrada, a tese evidencia que os *buffers* (zona de amortecimento), são áreas estratégicas para a conservação das Unidades de Conservação. A degradação no entorno reduz a capacidade de amortecimento climático, amplia o efeito de borda, aumenta as fontes de ignição e intensifica a exposição das UCs a extremos climáticos e incêndios. Portanto, a gestão das áreas protegidas não deve se limitar aos seus limites oficiais, mas incorporar uma abordagem de paisagem, capaz de articular conservação, ordenamento territorial, restauração ecológica, prevenção de incêndios e adaptação às mudanças climáticas.

Os resultados reforçam a necessidade de fortalecer políticas públicas voltadas ao controle da conversão da vegetação nativa, à fiscalização territorial, ao manejo integrado do fogo, recuperação de áreas degradadas e proteção dos serviços ecossistêmicos.

Em um cenário de intensificação dos extremos climáticos, a conservação das Unidades de Conservação Federais depende da integração entre monitoramento climático, sensoriamento remoto, gestão dos *buffers*, participação social, políticas públicas e planejamento ambiental de longo prazo. Essa abordagem é essencial para ampliar a resiliência dos ecossistemas tropicais, reduzir riscos associados ao fogo e garantir a manutenção da biodiversidade, da água, do carbono e dos demais serviços ecossistêmicos fundamentais ao bem-estar humano e à estabilidade ambiental.