



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE/INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

LUZINETE SCAUNICHI BARBOSA

**PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA COM BASE
EM DADOS DE REANÁLISE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

CUIABÁ - MT
2026

LUZINETE SCAUNICHI BARBOSA

**PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA COM BASE
EM DADOS DE REANÁLISE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física Ambiental da Faculdade/Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Física Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adilson Pacheco de Souza

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

B238p Barbosa, Luzinete Scaunichi.

Perigo de incêndios florestais na transição Cerrado-Amazônia com base em dados de reanálise e mudanças climáticas [recurso eletrônico] / Luzinete Scaunichi Barbosa. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 205 f., il. color., pdf). -- 2026.

Orientador: Adilson Pacheco de Souza.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2026.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. proteção florestal. 2. incêndios de vegetação. 3. irradiância relativa. 4. ERA5 Land. 5. CMIP6. I. Souza, Adilson Pacheco de, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA
COM BASE EM DADOS DE REANÁLISE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

AUTORA: DOUTORANDA LUZINETE SCAUNICHI BARBOSA

Tese defendida e aprovada em **30 de ABRIL** de **2026**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA [Presidente Banca / **Orientador**]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. PROFA. DRA. DANIELA ROBERTA BORELLA [Examinadora Externa]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. PROF. DR. DIEGO MARTINS STANGERLIN [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

4. PROF. DR. RAFAEL RODOLFO DE MELO [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

5. PROF. DR. WANDERSON CARVALHO DA SILVA [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ

6. PROFA. DRA. DONIZETE RITTER [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO

Cuiabá, 30/04/2026.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 05/05/2026, às 09:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAFAEL RODOLFO DE MELO**, **Usuário Externo**, em 05/05/2026, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Roberta Borella**, **Usuário Externo**, em 05/05/2026, às 13:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Donizete Ritter registrado(a) civilmente como DONIZETE RITTER**, **Usuário Externo**, em 05/05/2026, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diego Martins Stangerlin**, **Usuário Externo**, em 12/05/2026, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADILSON PACHECO DE SOUZA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 13/05/2026, às 08:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wanderson Carvalho da Silva**, **Usuário Externo**, em 14/05/2026, às 06:17, conforme horário

oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_or_gao_acesso_externo=0, informando o código verificador **9202279** e o código CRC **D3162C0D**.

Referência: Processo nº23108.034462/2026-75

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar e guiar meu caminho, repleto de saúde, força, esperança e fé, e por me direcionar e derramar sobre mim grandes bênçãos, com seu infinito amor. Minha gratidão pelas contribuições dos queridos familiares, amigos e incentivadores, enfim, todos que direcionaram palavras de apoio e energia para a conclusão da tese. Em especial, a minha família, pois sem o apoio de vocês, eu não teria vencido esta etapa.

Ao meu marido Aquiles, agradeço profundamente por estar sempre ao meu lado, incentivando-me nesta trajetória, com paciência, compreensão e apoio incondicional. Aos meus filhos Bruno, Sílvia e Miguel, os maiores presentes da minha vida, que souberam lidar com minha ausência e, ainda assim, me ofereceram apoio constante e amor inabalável.

Ao meu pai, José Barbosa, que, desde a infância, me mostrou que a educação é o melhor caminho, que o conhecimento nunca será roubado e que, hoje, depois de muitos anos, mesmo quando estava no leito de uma UTI, esteve preocupado com meus estudos, incentivando-me a não desistir. Hoje estou aqui finalizando e o dedico ao senhor, meu pai.

Assim agradeço:

Ao Professor Dr. Adilson de Souza Pacheco, pela orientação fundamental e pelo apoio constante ao longo deste doutorado. Registro aqui minha imensa gratidão, não apenas pelo seu papel de pesquisador, uma fonte brilhante de conhecimento e experiências, mas também pelo seu comprometimento, amizade e responsabilidade. Um ser humano incrível, de coração gigante. O cumprimento do seu papel é, de fato, motivo de orgulho para todos os que o conhecem e têm a oportunidade de trabalhar ao seu lado. Obrigada por caminhar comigo no desenvolvimento deste trabalho e por participar de todas as fases de sua construção. Apesar de sua agenda lotada, manteve-se sempre solícito e atento. O senhor atuou muito além de um orientador; com suas palavras de amizade e confiança, deu-me todo o suporte necessário, sem o qual este trabalho não teria sido concluído.

À minha amiga-irmã Daniela Castagna, pelo carinho, amizade, companheirismo e paciência durante nossa convivência, em todos os momentos de angústia e alegria, seja na vida acadêmica, profissional ou pessoal. Obrigada por ser meu apoio e suporte, sempre sem medir esforços, pronta para me ouvir, me abraçar e me ajudar. Seu afeto e seu carinho chegaram muitas vezes pela internet, mesmo a quilômetros de distância, e me sustentaram e fortaleceram nesta caminhada. Talvez você não saiba o quão significativo foi receber suas mensagens de apoio,

mas foram elas que não me deixaram desistir ao longo da caminhada e me trouxeram até aqui. Agradeço também pelas valiosas contribuições nas discussões das disciplinas e na realização deste trabalho, que me auxiliou em todas as etapas. Sou imensamente grata pela ajuda fundamental. Sei que nem mil palavras bastariam para expressar minha gratidão e admiração. Que a nossa amizade seja eterna. Obrigada por me 'emprestar' sua família sulista, que hoje também considero minha. Muito obrigada!

À Maria Renata, expresso minha imensa gratidão por todo o cuidado, afeto e zelo com o meu filho Miguel. Seu apoio foi fundamental para que eu pudesse trilhar esta trajetória de doutorado com tranquilidade.

À Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), pelo apoio e pela oportunidade de qualificação profissional, viabilizada pelo afastamento das atividades docentes, sem o qual a conclusão desta pesquisa não seria possível.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso por compartilharem seus conhecimentos.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação, pelo apoio e companheirismo, em especial ao Ian, Fernando, Nivalda e André, pelo acolhimento e pela parceria.

Ao grupo do Laboratório de Hidráulica e aos integrantes do Grupo de Pesquisa Tecnologia em Recursos Hídricos no Centro-Oeste (TREHCO), pela ajuda nas discussões e análises, bem como pela amizade, pelo incentivo, pelo companheirismo e pela oportunidade de crescimento pessoal e científico.

Aos amigos e colegas, pela presença tranquilizadora, pelas risadas e pelo apoio: Daniela Castagna, Rhavel Salviano, Charles Campoe, Karen Barbosa, Célio Jacinto, Mariana Pizzatto, Daniela Borella e Jones Gerboni, que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho e tornaram essa trajetória mais leve.

Ao Professor Dr. Frederico Terra, pela leveza de sua amizade, companheirismo e convivência, e pelas experiências de vida compartilhadas.

Agradeço à banca examinadora pelas valiosas contribuições e pelo rigor técnico que contribuíram para o aprimoramento desta pesquisa.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Maria Renata, muito obrigada por todo o cuidado, afeto e zelo com o Miguel. O seu apoio foi fundamental para que eu pudesse trilhar essa trajetória do doutorado com tranquilidade.

“A natureza é um todo vivo, em que cada organismo desempenha seu papel na harmonia do clima global.”

(Alexander von Humboldt, 1845)

RESUMO

Os índices de perigo de incêndio são instrumentos fundamentais para reduzir danos socioeconômicos e ambientais, pois permitem prever e monitorar a ocorrência de incêndios em regiões vulneráveis. Este estudo avaliou o desempenho dos índices Angström, FMA, FMA+, EVAP/P e P-EVAP na transição Cerrado-Amazônia de 2010 a 2022, utilizando dados meteorológicos do INMET e de reanálise da plataforma Copernicus. A eficiência foi validada pelos métodos *Skill Score* e Porcentagem de Sucesso, correlacionando os resultados aos focos de calor registrados no BDQueimadas (INPE). Os resultados evidenciaram a sazonalidade típica de regiões tropicais, caracterizada por verões chuvosos e invernos severamente secos, com umidade relativa mínima inferior a 30%. Apesar da precipitação média anual de 1.662 mm, a heterogeneidade espacial e a redução hídrica sazonal impulsionaram um aumento de 42% nas ocorrências de fogo, totalizando 3,9 milhões de focos no período. Entre os índices avaliados, P-EVAP e FMA+ apresentaram maior precisão preditiva, com destaque para o P-EVAP, que alcançou um *Skill Score* de até 0,74, especialmente com dados de reanálise. O FMA apresentou desempenho intermediário, enquanto Angström e EVAP/P foram menos confiáveis. Regionalmente, Maranhão e Tocantins apresentaram maior sensibilidade e precisão nos resultados, confirmando a influência direta da variabilidade meteorológica sobre o risco de incêndios. Complementarmente, o estudo investigou a dinâmica espaço-temporal do perigo de incêndio, integrando dados observados e estimados de 2015 a 2024, bem como projeções climáticas do modelo HadGEM3-GC31-LL (CMIP6). Foram avaliados os índices FMA+ e P-EVAP para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Os resultados revelaram uma evolução alarmante na ampliação do período de perigo de incêndio: o SSP1-2.6 manteve a sazonalidade histórica; o SSP2-4.5 indicou uma transição gradual, com aumento da intensidade e da duração do perigo de incêndio; e o SSP5-8.5 projetou um perigo extremo e contínuo, com temperaturas próximas de 40 °C e redução drástica da precipitação. Foram identificadas rupturas críticas na sazonalidade pluvial, no Tocantins, a janela de perigo migra para maio-julho; em Rondônia, antecipa-se para abril e maio; e em Mato Grosso, o perigo torna-se permanente até 2100. A vulnerabilidade espacial mostrou-se heterogênea, com Maranhão, Piauí e Tocantins registrando menores totais pluviométricos e ventos intensos, o que amplia a inflamabilidade da vegetação. Conclui-se que os índices FMA+ e P-EVAP são os mais eficazes para avaliar o perigo de incêndios. Os resultados validam a capacidade do modelo HadGEM3-GC31-LL de representar satisfatoriamente a variabilidade da região, confirmando que as mudanças climáticas projetadas não apenas intensificam a magnitude dos incêndios, mas também promovem uma ruptura na sazonalidade do regime de fogo, tornando o perigo cada vez mais permanente. Reconhece-se que, embora a porção oeste sofra com a redução mais precoce da umidade, toda a região caminha, inequivocamente, para um futuro de maior vulnerabilidade climática e inflamabilidade. Essa constatação é fundamental para subsidiar políticas públicas e estratégias de monitoramento contínuo e adaptativo, sendo necessário o desenvolvimento de planos de mitigação regionalizados, capazes de contribuir para a redução dos impactos das mudanças climáticas na interface Cerrado–Amazônia.

Palavras-chave: proteção florestal; incêndios de vegetação; ERA5 Land; CMIP6; mudanças climáticas.

ABSTRACT

Fire hazard indices are fundamental tools for reducing socioeconomic and environmental damage, as they allow for the prediction and monitoring of wildfires in vulnerable regions. This study evaluated the performance of the Ångström, FMA, FMA+, EVAP/P, and P-EVAP indices in the Cerrado-Amazon transition zone between 2010 and 2022, using meteorological data from INMET and reanalysis from the Copernicus platform. Efficiency was validated using the *Skill Score* and Success Percentage methods, and the results were correlated with the hotspots recorded in the BDQueimadas (INPE). The results highlighted the typical seasonality of tropical regions, marked by rainy summers and severely dry winters, with minimum relative humidity below 30%. Despite an average annual rainfall of 1,662 mm, spatial heterogeneity and seasonal water reduction drove a 42% increase in fire occurrences, totaling 3.9 million hotspots during the period. Among the indices evaluated, P-EVAP and FMA+ showed greater predictive accuracy, with P-EVAP standing out, achieving a *Skill Score* of up to 0.74, especially with reanalysis data. The FMA showed intermediate performance, while Ångström and EVAP/P were less reliable. Regionally, Maranhão and Tocantins showed greater sensitivity and precision in their results, confirming the direct influence of meteorological variability on wildfire risk. Complementarily, the study investigated the spatio-temporal dynamics of fire hazard, integrating observed and estimated data between 2015 and 2024, as well as climate projections from the HadGEM3-GC31-LL model (CMIP6). The FMA+ and P-EVAP indices were evaluated for 2030, 2050, 2075, and 2100 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. The results revealed an alarming increase in the lengthening of the fire hazard period; the SSP1-2.6 maintained historical seasonality; SSP2-4.5 indicated a gradual transition, with increasing intensity and duration of the fire hazard; and SSP5-8.5 projected extreme and continuous risk, with temperatures close to 40°C and a drastic reduction in precipitation. Critical disruptions in rainfall seasonality were identified in Tocantins, where the risk window shifts to May-July; in Rondônia, it moves to April and May; and in Mato Grosso, the danger becomes permanent until 2100. Spatial vulnerability proved heterogeneous, with Maranhão, Piauí, and Tocantins registering lower rainfall totals and intense winds, which increase the flammability of vegetation. It is concluded that the FMA+ and P-EVAP indices are the most effective for assessing fire hazard. The results validate the HadGEM3-GC31-LL model's ability to satisfactorily represent the region's variability, confirming that projected climate change not only intensifies fire magnitude but also disrupts the seasonality of the fire regime, transforming the risk into an increasingly permanent condition. It is recognized that, although the western portion suffers from earlier moisture reduction, the entire region is unequivocally heading towards a future of extreme climate vulnerability and high flammability. This finding is fundamental to supporting public policies and strategies for continuous and adaptive monitoring, requiring the development of regionalized mitigation plans to reduce the impacts of climate change on the Cerrado-Amazon interface.

Keywords: Forest protection; vegetation fires; ERA5 Land; CMIP6; climate change.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Triângulo do fogo	18
Figura 2. Diagrama esquemático de um incêndio vertical espalhado por uma escada de incêndio de árvores e arbustos ao solo, e vice-versa.	21
Figura 3. Ciclo climático dos incêndios.	23
Figura 4. Uso e Cobertura do Solo na região de transição Cerrado-Amazônia (2025).	26
Figura 5. Diagrama da propriedade dos combustíveis florestais.	35
Figura 6. Fluxograma das etapas de elaboração do Índice Canadense de Incêndios Florestais (FWI)	39
Figura 7. Temperatura da superfície global (média anual) observada e simulada, considerando fatores humanos e naturais (1850 - 2040).....	49
Figura 8. Emissões de CO ₂ em gigatoneladas dos cenários SSPs do CMIP6/IPCC-AR6	52
Figura 9. Representação do buffer de 200 km a partir da transição Cerrado-Amazônia. A região abrange os estados de Rondônia (RO), Mato Grosso (MT), Tocantins (TO), Maranhão (MA), Pará (PA) e Piauí (PI), no Brasil (considerada área de estudo), com a localização das estações meteorológicas convencionais e automáticas avaliadas.	82
Figura 10. Distribuição mensal das variáveis meteorológicas medidas nas estações meteorológicas na região de transição Cerrado-Amazônia, no período de 2010–2022. Os <i>box plots</i> detalham o comportamento sazonal de: (A) chuvas totais mensais; (B) temperatura máxima diária do ar; (C) temperatura média diária do ar; (D) temperatura mínima diária do ar; (E) umidade relativa média diária do ar; (F) umidade relativa mínima diária do ar; e (G) velocidade média diária do vento – a 2,0 m de altura. A caixa do <i>boxplot</i> representa o intervalo interquartil; a linha no interior da caixa é a mediana; as hastes são os limites inferior e superior; os pontos externos à caixa são os valores anômalos; e o ponto interno é a média	93
Figura 11. Variação espacial observada (OVMS) dos elementos meteorológicos (chuva total média anual; temperaturas máxima, média e mínima diárias médias anuais) e dos indicadores estatísticos <i>Mean Bias Error</i> (MBE), <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) e índice de concordância de Willmott, entre os dados medidos nas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e na reanálise (ERA5 Land), na transição Cerrado-Amazônia, no período de 2010 a 2022. Representado por símbolos (círculos e triângulos) ...	96
Figura 12. Variação espacial observada (OVMS) dos elementos meteorológicos, em médias anuais de dados diários (umidade relativa do ar – média e mínima e velocidade média do vento), e dos indicadores estatísticos <i>Mean Bias Error</i> (MBE), <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) e índice de concordância de Willmott, entre os dados medidos nas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e na reanálise (ERA5 Land), na transição Cerrado-Amazônia, no período de 2010 a 2022	98
Figura 13. Índice de Precipitação Normalizado: comparação entre dados observados (INMET) e simulados (ERA5-Land) na transição Cerrado–Amazônia, apresentados por símbolos, em um gradiente de cores, sendo triângulo azul invertido os valores subestimados (< -1,0 grande, -1,0 a -0,40 média; -0,40 a -0,10 pequena), círculos sem preenchimento de cor (-0,10 a 0,10, normal) e triângulo vermelho os valores de superestimativa (0,10 a 0,40 pequena; 0,40 a 1,0 média; e ≥ 1,0 grande)	99

Figura 14. Categorias de Normalização (razão) das variáveis meteorológicas entre as médias obtidas nas estações meteorológicas e os dados de reanálise ERA-5, na transição Cerrado-Amazônia. Índice categorizado em uma escala de cores	100
Figura 15. Dispersão (a) e variação interanual (b) dos índices de perigo de incêndio obtidos a partir de dados medidos pela estação meteorológica e de reanálise para a estação de Vilhena (RO), na Transição Cerrado-Amazônia. Os gráficos das demais estações meteorológicas podem ser visualizados no material suplementar, nas Figuras S1(a) e (b)	103
Figura 16. Totais anuais de focos de calor na região de transição Cerrado-Amazônia, de 2010 a 2022.	104
Figura 17. <i>Boxplots</i> da distribuição mensal do número de focos de calor (<i>hotspots</i>) registrados nos estados da região que pertencem à área do <i>buffer</i> na transição Cerrado-Amazônia	105
Figura 18. Distribuição mensal dos focos de calor na transição Cerrado-Amazônia no período de 2010 a 2022.....	106
Figura 19. Distribuição espacial do total de focos de calor do período de 2010 a 2022, na transição Cerrado-Amazônia.	108
Figura 20. Espacialização dos acertos nas previsões de ocorrência de incêndios (AP), conforme o método <i>skill score</i> , da relação entre os índices de incêndio e os focos de incêndio, utilizando variáveis de estações meteorológicas e dados de reanálise	110
Figura 21. Espacialização da Porcentagem de Sucesso (PS) da relação entre os índices de perigo de incêndio e os focos de incêndio, utilizando variáveis provenientes de estações meteorológicas e de dados de reanálise	112
Figura 22. Distribuição das estações meteorológicas automáticas ao longo da área de transição Cerrado-Amazônia, utilizadas neste trabalho	137
Figura 23. Médias mensais das variáveis meteorológicas observadas nas estações e simuladas pela projeção, do ano médio para o período de 2015 a 2024	151
Figura 24. Gráfico das variáveis meteorológicas, chuva, temperatura, umidade relativa média e velocidade do vento, para o cenário SSP1-2.6, para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, além dos valores observados e simulados para o período de 2015 a 2024.....	153
Figura 25. Médias mensais de chuvas, temperatura do ar, umidade relativa média do ar e velocidade do vento, para o cenário SSP2-4.5, nos anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, além dos valores observados e simulados para o período de 2015 a 2024	155
Figura 26. Gráfico das variáveis meteorológicas, chuva, temperatura, umidade relativa média e velocidade do vento, para o cenário SSP5-8.5, para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, além dos valores observados e simulados para o período de 2015 a 2024.....	156
Figura 27. Gráfico da variação mensal dos Índices de Perigo FMA+ e P-EVAP no estado de Mato Grosso, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados	161
Figura 28. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP no estado do Maranhão, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados.	163
Figura 29. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP para o estado do Pará, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1- 2.6, SSP2- 4.5 e SSP5- 8.5), com	

projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados	165
Figura 30. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP para o estado do Piauí, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1- 2.6, SSP2- 4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados	166
Figura 31. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP para o estado do Rondônia, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1- 2.6, SSP2- 4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados	168
Figura 32. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP no estado do Tocantins, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados	169
Figura 33. Mapa do índice de perigo de incêndio FMA+ com base nos dados observados (INMET) do ano médio referente ao período de 2015 a 2024	171
Figura 34. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP, com base nos dados observados (INMET), para o ano médio do período de 2015 a 2024	173
Figura 35. Mapas do índice de perigo de incêndio FMA+ para os cenários SSP1-2.6 de projeção futura para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100	175
Figura 36. Mapas do índice de perigo de incêndio FMA+ para os cenários SSP2-4.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100	177
Figura 37. Mapa do índice de perigo de incêndio FMA+ para os cenários SSP5-8.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100	179
Figura 38. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP para os cenários SSP1-2.6 de projeção futura para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100	181
Figura 39. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP para os cenários SSP2-4.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100	183
Figura 40. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP para os cenários SSP5-8.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala de perigo do Índice de FWI	39
Tabela 2. Restrições do índice de Nesterov em função da quantidade de chuva do dia	41
Tabela 3. Escala de perigo do Índice de Nesterov	41
Tabela 4. Restrições da fórmula de Monte Alegre (FMA) em função da quantidade de chuva do dia	42
Tabela 5. Escala de perigo da Fórmula de Monte Alegre (FMA)	42
Tabela 6. Restrições da Fórmula de Monte Alegre alteradas em função da quantidade de chuva do dia	43
Tabela 7. Escala de perigo da Fórmula de Monte Alegre Alterada	43
Tabela 8. Restrições do índice P-EVAP e do EVAP/P em função da quantidade de chuva do dia	44
Tabela 9. Cenários, narrativas e emissões negativas nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5	53
Tabela 10. Restrição à aplicação dos índices de perigo de incêndio: FMA, FMA+, P-EVAP e EVAP/P	88
Tabela 11. Agrupamento em classes de perigo de incêndio de acordo com o índice de perigo	89
Tabela 12. Contingência do <i>Skill Score</i>	89
Tabela 13. Resultados do Teste de Mann-Whitney para as variáveis meteorológicas obtidas por medições em estações meteorológicas (observadas) e por reanálise (estimadas), nos estados de Mato Grosso (MT), Tocantins (TO), Maranhão (MA), Pará (PA), Piauí (PI) e Rondônia (RO) inseridos na faixa de transição Cerrado-Amazônia	92
Tabela 14. Desempenho estatístico (MBE, RMSE e d'Willmott) dos índices FMA, FMA+, Angstrom, P-EVAP e EVAP/P, estimados com dados de estação meteorológica e de reanálise, para a Transição Cerrado-Amazônia, que abrange partes dos territórios dos estados de MA, MT, PA, PI, RO e TO	102
Tabela 15. Média do <i>Skill Score</i> dos índices de perigo de incêndio na área de estudo	115
Tabela 16. Estações meteorológicas automáticas do INMET (EMAs) localizadas na região de transição Cerrado-Amazônia utilizadas no estudo	137
Tabela 17. Características e fatores de conversão das variáveis meteorológicas do CMIP6	139
Tabela 18. Índice de determinação de perigo de incêndio	143
Tabela 19. Restrição à aplicação dos índices de perigo de incêndio: FMA+ e P-EVAP	144
Tabela 20. Agrupamento em classes de perigo de incêndio de acordo com o índice de perigo	144
Tabela 21. Valores médios do teste de Mann-Whitney das variáveis, por Estado, no ano médio dos dados observados e dos simulados da área de estudo	147
Tabela 22. Indicadores estatísticos (MBE, RMSE, Willmott e Pearson) para os dados observados no INMET e para as projeções simuladas do ano médio (2015-2024).....	149
Tabela 23. Número de dias de acordo com as classes de perigo de incêndios florestais, calculado com base nos índices observados em 2020 e no ano simulado, correspondentes à média específica do INMET e às projeções para o ano médio do período de 2015 a 2024, para a transição Cerrado-Amazônia	157

Tabela 24. Porcentagem das classes de índice para os dados médios observados e simulados na transição Cerrado-Amazônia	158
Tabela 25. Média mensal do número de dias, no período de 2015 a 2024, referente aos índices de perigo de incêndio observados na transição Cerrado–Amazônia	159

LISTA DE SIGLAS

AGRITEMPO - Sistema de Monitoramento Agrometeorológico

AP - Acerto nas previsões

APPs - Áreas de Preservação Permanente

BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

BDQUEIMADAS- Banco de Dados de Queimadas

BECCS - Bioenergia com Captura de Carbono

C3S - Copernicus Climate Change Service

CCS - captura e armazenamento de carbono

CDS - Climate Data Store

CFFDRS - Sistema Canadense de Avaliação de Risco de Incêndio

CMIP6 - Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 6

CO₂- Dióxido de Carbono

CPTEC - Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos

CRU - Climatic Research Unit

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,

ECS -Sensibilidade Climática de Equilíbrio

EMAs - Estações meteorológicas automáticas

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ES - Earth System

ESMs -Modelos de Sistema Terrestre

EVAP/P - Evaporação/Precipitação

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

FBP - Previsão do Comportamento do Fogo

FMA - Fórmula de Monte Alegre

FMA+ - Fórmulas de Monte Alegre Alterada

FWI - Índice Meteorológico de Incêndio

FWI - Índice Meteorológico de Incêndio

GCMs - Modelos de Circulação Geral

GCMs - Modelos Climáticos Globais

GEE - gases de efeito estufa

GPCC - Global Precipitation Climatology Centre

HadGEM3-GC31-LL - Hadley Centre Global Environmental Model

hurs - Umidade relativa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - inverso do quadrado da distância

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IRF - Índice de Resistência ao Fogo

MBE - Erro médio

MIF - Manejo Integrado do Fogo

NETs - Tecnologias de Emissão Negativa

NFDRS - Sistema nacional de avaliação de risco de incêndio

ODS - Desenvolvimento Sustentável

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OVMS - Variabilidade espacial observada

P-EVAP - Precipitação – Evaporação

pr - Precipitação

PS - Porcentagem de sucesso

RMSE - Raiz do erro quadrático médio

sfcWind - Velocidade do vento próxima à superfície

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

SPI - Índice de Precipitação Normalizada

SR - Sensoriamento Remoto

SSPs - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados

Tas - Temperatura do ar próximo à superfície

Tmax - Temperatura máxima

Tmed - Temperatura média

Tmin - Temperatura mínima

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

URmed - Umidade relativa média

Vmed - Velocidade média do vento

ZTE - Zona de Tensão Ecológica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2. DESENVOLVIMENTO	18
2.1 Fogo	18
2.2 Incêndio florestal	20
2.3 Incêndios na Transição Cerrado-Amazônia.....	25
2.4 Influência das variáveis meteorológicas nos incêndios florestais.....	28
2.4.1 Temperatura do ar	29
2.4.2 Umidade relativa do ar	30
2.4.3 Vento.....	32
2.4.4 Precipitação.....	33
2.4.5 Radiação	34
2.4.6 Material Combustível.....	34
2.5 Índices de perigo de incêndio	37
2.5.1 Índice FWI	38
2.5.2 Índice de Angstron.....	40
2.5.3 Índice de Nesterov	40
2.5.4 Índices Fórmula de Monte Alegre (FMA)	41
2.5.5 Índice Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+)	42
2.5.6. Precipitação – Evaporação (P-EVAP)	43
2.5.7. Evaporação/Precipitação (EVAP/P)	44
2.6 Uso de imagens de satélite e SIG na análise do perigo de incêndios	45
2.7 Mudanças Climáticas	48
2.8 Modelo Climático HadGEM3-GC31-LL no contexto do CMIP6 e Cenários Futuros...	51
2.9 REFERÊNCIAS	55
3. ARTIGO 01: ÍNDICES DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA COM BASE EM DADOS METEOROLÓGICOS <i>IN SITU</i> E DE REANÁLISE	77
3.1 Introdução	77

3.2 Materiais e Métodos	81
3.2.1 Preenchimento de falhas	86
3.2.2 Índices de perigo de incêndio	86
3.2.3 Estatística	89
3.3 Resultados	91
3.3.1 Estatística das variáveis meteorológicas obtidas em estações meteorológicas e por meio de reanálise	91
3.3.2 Indicativos estatísticos dos índices de perigo de incêndios entre os dados de reanálise e de estações meteorológicas	101
3.3.3 Distribuição Espacial e Sazonal dos Focos de Calor	103
3.3.4 Desempenho dos Índices de Perigo de Incêndios	108
3.4 Discussão	115
3.5 Conclusão	124
3.6 REFERÊNCIAS	125
4. Artigo 02: PREVISÃO DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM DIFERENTES CENÁRIOS NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA, BRASIL	133
4.1 Introdução	133
4.2 Material e Métodos	136
4.2.1 Preenchimento de falhas	142
4.2.2 Índices de perigo de incêndio	143
4.2.3 Espacialização dos Índices de Perigo de Incêndio	144
4.2.4 Estatística	145
4.3 Resultados	146
4.3.1 Estatística entre as variáveis meteorológicas dos dados obtidos nas estações meteorológicas do INMET e das projeções simuladas do ano médio referente ao período de 2015 a 2024	146
4.3.2 Análise dos dados das variáveis meteorológicas observadas nas estações meteorológicas e simuladas pelas projeções nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, referente ao ano médio de 2015-2024	149
4.3.3 Análise dos dados das variáveis meteorológicas simuladas obtidos das projeções nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, referentes aos anos de 2030, 2050, 2075 e 2100	152
4.3.4 Análise dos índices FMA+ e P-EVAP obtidos nas estações do INMET utilizando a média específica de 2015 a 2024	157

4.3.5. Desempenho dos índices FMA+ e P-EVAP na Transição Cerrado-Amazônia....	161
4.4 Discussão	186
4.5 Conclusão	195
5. CONSIDERAÇÕES GERAIS	196
6. REFERÊNCIAS	197

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios de vegetação, ou incêndios florestais, caracterizam-se por um processo de combustão descontrolada que se dissemina livremente por meio dos ecossistemas. Eles consomem biomassa vegetal, como gramíneas, folhagens, galhos e material em decomposição, podendo, inclusive, atingir a vegetação viva, conforme a intensidade (florestas, pastos ou plantações). Sua dinâmica é regida pela interação entre a carga de combustível, as variáveis meteorológicas e a topografia local, o que permite que o fogo responda às variações ambientais (Soares, Batista, Tetto, 2025). Embora influenciados por diversos fatores físicos, esses processos são predominantemente impulsionados por atividades antrópicas (Sari, 2021; Biazatti et al., 2021) e estão associados a perdas econômicas, ecológicas e humanas (Vallejo-Villalta et al., 2019; Johnston et al., 2020; Loiselle et al., 2020; Biazatti et al., 2021).

As descargas elétricas atmosféricas representam a única fonte natural de ignição no Brasil (Américo et al., 2021), e sua contribuição estatística é reduzida diante da predominância de ignições de origem antropogênica (Sant'Anna et al., 2020). Este fenômeno configura-se como um dos principais vetores de degradação da vegetação primária, resultando em perdas ecossistêmicas severas e emissões de dióxido de carbono (CO₂) em escala comparável à da queima de combustíveis fósseis (Ma et al., 2022; Sannigrahi et al., 2020).

A ocorrência de incêndio está relacionada à interação entre oxigênio, material combustível e fonte de calor (Ma et al., 2022; Arruda et al., 2021). Fatores como temperatura, radiação solar e vento contribuem para a inflamabilidade e a morfologia da área queimada, transportando gases e partículas que podem originar focos secundários (Américo et al., 2021; Silva et al., 2020).

Estudos indicam que existem duas situações limitantes na produção do fogo: em regiões áridas, a baixa produção de biomassa limita a propagação por falta de combustível; em regiões úmidas, a abundância de biomassa é compensada pelo elevado teor de umidade, que inibe a combustão (Loiselle et al., 2020; Mansoor et al., 2021). Em biomas como o Cerrado, a vegetação apresenta adaptações de resiliência ao fogo; contudo, regimes de queima alterados podem converter áreas arbóreas em gramíneas, comprometendo a estrutura do habitat (Santos, 2021; Peluzio et al., 2020).

No contexto da Amazônia, a perda de cobertura florestal eleva drasticamente a suscetibilidade ao fogo, agravando o cenário de degradação ambiental, pois reduz a umidade do ambiente, aumenta a exposição da vegetação ao sol e ao vento, acumula material combustível e quebra a resiliência natural da floresta contra incêndios (Xu et al., 2020; Silva et

al., 2020; Johnston et al., 2020). Por isso, políticas de prevenção e manejo precisam considerar a manutenção da cobertura florestal como barreira natural contra incêndios e integrar estratégias adaptativas de monitoramento e de resposta rápida (Aragão et al., 2023).

A zona de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia se destaca como uma região de elevada complexidade biofísica e sob forte pressão da fronteira agropecuária. Esta região caracteriza-se por um mosaico vegetacional heterogêneo, que abrange desde formações florestais densas até fisionomias savânicas (Marques et al., 2020; Oliveira et al., 2022), desempenhando um papel crucial na manutenção da biodiversidade e na regulação do equilíbrio ecossistêmico (Marimon et al., 2014; Marques et al., 2020). Contudo, este equilíbrio enfrenta ameaças crescentes decorrentes da intensificação das pressões antrópicas, notadamente por meio do desmatamento e da expansão da fronteira agropecuária. A conversão da cobertura vegetal nativa, aliada ao uso inadequado do solo, ocorre em um contexto de variabilidade climática (Silva et al., 2019; Marengo et al., 2021). Pois, a região apresenta diversidade climática e ecológica, caracterizada pela sazonalidade das chuvas, temperaturas elevadas e períodos prolongados de seca, o que favorece a ignição e a propagação do fogo (Brando et al., 2020).

Em 2024, a Organização das Nações Unidas (ONU) destacou a importância de ações voltadas ao desenvolvimento sustentável. Entre as metas prioritárias, destacam-se os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos na Agenda 2030. Diante dos impactos no clima e na saúde pública, o manejo do fogo está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3, 13 e 15.

Para atender a essas demandas, é fundamental o desenvolvimento de modelos matemáticos de perigo de incêndio que sejam coerentes com as realidades locais, aumentando a confiabilidade das previsões meteorológicas (Santos et al., 2021), tornando essencial para subsidiar políticas públicas e ações de prevenção e combate aos incêndios, conforme às demandas socioeconômicas e ambientais, principalmente em regiões com diferenças demográficas distintas e que sofrem efeitos de vários fatores meteorológicos conjuntos, como a transição Cerrado-Amazônia.

A integração de variáveis meteorológicas, como precipitação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, em índices de perigo de incêndios florestais permite estimar a probabilidade de ocorrência e determinar o grau de perigo (Cachoeira et al., 2020). Embora existam modelos globais de perigo, a calibração regional é essencial para reduzir as incertezas em áreas de transição vegetacional e de geomorfologia distinta (Santos et al., 2021).

Diante disso, este estudo propôs validar índices de perigo de incêndio na interface Cerrado-Amazônia, integrando dados meteorológicos observados, reanálises e projeções climáticas oriundas de Modelos de Circulação Geral (GCMs), do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 6 (CMIP6), nos cenários sócio-econômicos compartilhados (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com o objetivo de identificar os índices mais representativos para subsidiar políticas públicas de mitigação, prevenção e combate aos incêndios florestais na região.

1.1 Objetivo Geral

- ✓ Avaliar se dados climatológicos e cenários de mudança climática afetam as estimativas dos índices de perigo de incêndios florestais na região de transição Cerrado-Amazônia.

1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar o desempenho dos dados de reanálise ERA5 em índices de perigo de incêndio, a fim de identificar as melhores previsões da ocorrência de incêndios na região de transição Cerrado–Amazônia.
- ✓ Analisar se ocorrerão alterações sazonais anuais (atuais e futuras) nos índices de perigo de incêndio (FMA+ e P-EVAP), com base nas projeções climáticas do modelo HadGEM3-GC31-LL (CMIP6), para diferentes cenários de emissões (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), nos anos de 2030, 2050, 2075 e 2100.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Fogo

O fogo é um processo de combustão exotérmica no qual o material combustível, ao atingir a temperatura de ignição, reage com o oxigênio em uma oxidação rápida, liberando energia na forma de calor e luz (Loiselle et al., 2020). Sua ocorrência está relacionada à combinação de três fatores: oxigênio, material combustível e calor (Arruda et al., 2021; Ma et al., 2022), que se encontram em condições favoráveis à combustão e permitem não apenas o início, mas também a sustentação do processo (Parreira, 2019; Lecina-Díaz et al., 2021).

Conhecer os elementos do triângulo do fogo (Figura 1) torna-se necessário para aumentar a eficiência no combate e na mitigação de incêndios (Sant'Anna et al., 2020; Arruda et al., 2021). A manutenção da combustão depende do equilíbrio entre combustível, comburente (oxigênio) e fonte de calor; a redução de qualquer um desses componentes abaixo de um nível crítico inviabiliza a continuidade da reação, extinguindo o fogo (Silva et al., 2020; Griebeler et al., 2020).

Figura 1. Triângulo do fogo



Fonte: Adaptado de The University of Waikato (www.sciencelearn.org.nz).

A propagação do fogo é sustentada por uma reação em cadeia cuja viabilidade depende da interação sinérgica entre os três elementos do triângulo do fogo: o combustível, o comburente e o calor. O material combustível, constituído por biomassa orgânica que varia de detritos finos e gramíneas a estruturas lenhosas pesadas, apresenta inflamabilidade

condicionada ao seu teor hídrico, em que a redução da umidade diminui a energia necessária para a ignição (Loiselle et al., 2020). O comburente, representado pelo oxigênio atmosférico, tem sua oferta dinamizada pela ação dos ventos, que suprem a zona de combustão e pré-aquecem o material adjacente, inclinando as chamas (Santos et al., 2019; Lecina-Díaz et al., 2021).

Por fim, o calor atua como a energia de ativação indispensável para desencadear a pirólise e a subsequente liberação de gases inflamáveis, tornando o fogo um sistema autoalimentado por meio de processos de transferência de calor (condução, convecção e radiação). A ruptura desse equilíbrio, seja pela exaustão do combustível ou pela mitigação da energia térmica, constitui o princípio fundamental para a interrupção da combustão e o controle de incêndios em ecossistemas florestais (Silva et al., 2020; Griebeler et al., 2020).

Para compreender a dinâmica do fogo, é essencial considerar sua distribuição espacial e temporal (Silva et al., 2021a), à qual tem sido utilizada para diversas finalidades, seja, na limpeza de terrenos, justificada para uso agrícola ou pastagens em áreas de ampla extensão territorial, em monoculturas, ou em áreas de cultivo itinerante, realizadas por agricultores de subsistência que fazem uso da prática de corte e queima (Nascimento & Sena, 2020; Sari, 2021).

Entretanto, é essencial conhecer outros fatores relacionados ao comportamento do fogo, como as características do material combustível e as condições meteorológicas e topográficas da região, visto que a fitofisionomia da Amazônia e do Cerrado apresenta características estruturais distintas. Enquanto a Amazônia apresenta uma biomassa densa com alto teor de umidade e dossel fechado e microclima úmido, o Cerrado caracteriza-se por uma carga de combustível fino e aerado, composto por gramíneas e arbustos, que responde com maior celeridade às variações de umidade relativa do ar e temperatura, apresentando alta inflamabilidade durante o período de estiagem (Torres; Silva Júnior; Lima, 2019; Vicente-Serrano et al., 2020; Souto et al., 2021; Araújo et al., 2021)

Apesar do fogo ser utilizado de forma regularizada e autorizada perante os órgãos competentes, a maioria das queimadas atualmente é ilegal, principalmente quando relacionadas ao desmatamento e à supressão da vegetação nativa, como ocorre na região de transição dos biomas Amazônia-Cerrado (Américo et al., 2021; Pivello et al., 2021).

Os impactos do fogo são determinados pelo tipo de regime de fogo, sua frequência, sazonalidade, intensidade e extensão, sendo o regime de incêndio natural transformado pela ação humana, ao qual estão associadas as práticas de uso e ocupação do solo, ou por extremos climáticos relacionados às mudanças climáticas globais (Sant'Anna et al., 2020; Sannigrahi et al., 2020; Pivello, 2021; Ma et al., 2022).

2.2 Incêndio florestal

O Incêndio florestal é caracterizado como o fogo fora de controle em alguma vegetação, seja em áreas de floresta ou cultivo florestal, pastagem e plantações (Sannigrahi et al., 2020; Silva et al., 2020), podendo ser definido como uma combustão incontrolável que se propaga livremente consumindo qualquer tipo de combustível natural que tenha no ambiente, como: folhas, tocos, galhos, serapilheira, gramíneas e vegetação viva (Oliveira et al., 2020; Terrah et al., 2020).

As características físicas e químicas, bem como o teor de umidade do material combustível e sua distribuição, são condições que facilitam ou dificultam a ignição de um incêndio florestal e podem ser determinadas pelas condições meteorológicas locais (Americo et al., 2021; Biazatti et al., 2021; Ramalho et al., 2021). Não estar confinado e propagar-se livremente são as principais características dos incêndios. Responde livremente às variações do ambiente e, assim, pode permanecer em um determinado ponto ou adotar proporções incontroláveis (Fiedler et al., 2020a; Ramalho et al., 2021a).

Os incêndios florestais apresentam dois comportamentos: o primeiro ocorre na estação chuvosa e é provocado por raios, com baixa intensidade e menores danos à vegetação. O segundo ocorre na metade do período seco, com grande intensidade e alto poder de destruição, e é favorecido pelo acúmulo e pela menor umidade do material combustível (Souto et al., 2021). Neste período da estação seca há uma probabilidade maior de ocorrência de incêndios florestais, pois há uma redução de precipitação, contribuindo com um acúmulo de vegetação seca na superfície do solo, que se torna uma fonte de combustível (Pinto et al., 2021), atingindo principalmente as áreas com menor percentual de cobertura das copas das árvores (Souto et al., 2021), além de causar perdas no ciclo do carbono, no ciclo hidrológico e na biodiversidade.

Os incêndios envolvem processos naturais complexos associados a fatores de diversas origens, tais como atividades antrópicas, condições da vegetação e condições meteorológicas (Marques et al., 2020; Souto et al., 2021). O perigo de incêndio depende de vários elementos, alguns dos quais podem ser considerados pouco variáveis ao longo do tempo (Mansoor et al., 2021).

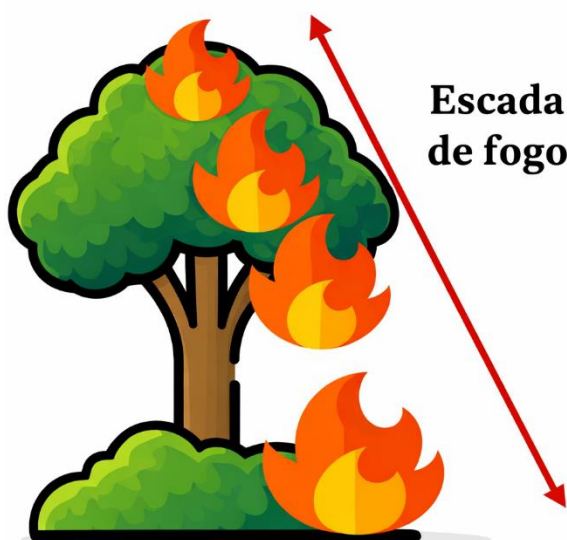
No entanto, fatores como a umidade do material combustível e as condições meteorológicas, como temperatura do ar, velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, precipitação, entre outros (Biazatti et al., 2021), podem variar muito em curto espaço de tempo e também em escala espacial (Griebeler et al., 2020; Canzian et al., 2020; Sari, 2021). Esses fatores influenciam de maneira distinta o risco de incêndio em um determinado local, tornando necessária sua compreensão para avaliar a periculosidade de incêndio de uma área

específica (Sant'Anna et al., 2020).

Nessas características, os incêndios de maior proporção atingem áreas extensas e têm alta probabilidade de reincidência; já os menores ocorrem em áreas com baixo percentual de cobertura das copas das árvores e não reincidentem no mesmo local (Xu et al., 2020; Loisel et al., 2020; Mansoor et al., 2021; Souto et al., 2021). Suas ocorrências constituem importantes fontes de perigo, acarretando consequências ecológicas, financeiras e sociais (Vallejo-Villalta et al., 2019; Johnston et al., 2020; Loisel et al., 2020) e podem ter origem natural ou humana.

Os tipos de incêndios florestais são determinados pelo grau de envolvimento do fogo em cada estrato do material combustível disponível, do solo ao topo das árvores (Figura 2). Nesse caso, são classificados em subterrâneos, superficiais e de copa (Mansoor et al., 2021).

Figura 2. Diagrama esquemático de um incêndio vertical espalhado por uma escada de incêndio de árvores e arbustos ao solo, e vice-versa.



Fonte: adaptado Mansoor (2021).

O incêndio superficial é o mais comum; ocorre no piso da floresta e é alimentado por material vegetal não decomposto, como folhas, galhos mortos, gramíneas e arbustos, ou seja, todo material até 1,80 m de altura (Silva et al., 2021b). Entre os tipos de incêndio, o superficial é o mais fácil de combater, porém, origina os outros dois tipos (Xu et al., 2020; Terrah et al., 2020).

O incêndio subterrâneo se propaga na camada formada por húmus e turfa sobre o solo mineral abaixo do piso florestal (Mansoor et al., 2021). Eles ocorrem em áreas que acumulam material orgânico e água na época de chuva e passam por longos períodos de estiagem, formando uma camada de material combustível fino e compacto, com quase nenhum contato

com a atmosfera, capaz de destruir as raízes de todas as plantas ao redor e a microbiologia do solo (Terrah et al., 2020; Mansoor et al., 2021).

O incêndio de copa é aquele que se propaga pelas copas das árvores ou a uma altura superior a 1,80 m, independentemente do fogo superficial (Mansoor et al., 2021). Em alguns casos, o início desses incêndios pode ser causado por raios e não por incêndios superficiais. Para que ocorra esse tipo de incêndio, é necessário que a floresta apresente características peculiares, como folhagem densa e inflamável (Terrah et al., 2020).

Esse tipo de incêndio ocorre em uma estrutura florestal com alta continuidade vertical, na qual a vegetação do sub-bosque, formada por arbustos, conecta o solo às copas, e com continuidade horizontal, permitindo que o fogo se propague entre as copas de forma ininterrupta (Mansoor et al., 2021). A folhagem densa atua como uma camada de combustível suspenso com alta relação superfície-volume, facilitando a ignição e a rápida liberação de energia (Souto et al., 2021).

Como causa natural, os raios são a única fonte de ignição no Brasil, capaz de originar incêndios (Américo et al., 2021; Mansoor et al., 2022), o que explica o baixo percentual que representam entre as principais causas de incêndios florestais no mundo (Sant'Anna et al., 2020). No entanto, o mais comum é que os incêndios tenham origem da atividade humana, que tem contribuído de forma expressiva para a elevação do número de incêndios, através da prática do desmatamento para obtenção de novas áreas para desenvolvimento de atividades agropecuárias, utilizando o fogo de forma desordenada possibilitando condições propícias para o surgimento de incêndios (Cammelli et al., 2020; Silva et al., 2020; Nascimento & Sena, 2020).

O nível de propagação de um incêndio pode ser classificado com base nas condições ambientais que favorecem a evolução do fogo (Loiselle et al., 2020; Santos et al., 2019; Mansoor, 2021; Silva et al., 2021b). Os fatores que mais contribuem para a propagação de incêndios florestais são: a) tipo do material combustível, que determina a facilidade de ignição; b) topografia, por influenciar as características dos ventos e a propagação do fogo; c) tipo de uso e cobertura do solo, que também influenciam a possibilidade de ignição e a propagação do fogo; d) condições atmosféricas (Xu et al., 2020; Loiselle et al., 2020). O clima é o principal responsável por controlar os eventos de incêndios de vegetação em nível regional, pois determina o teor de umidade do material combustível e dos tipos de vegetação, além de apresentar caráter dinâmico (Torres; Silva Júnior; Lima, 2019).

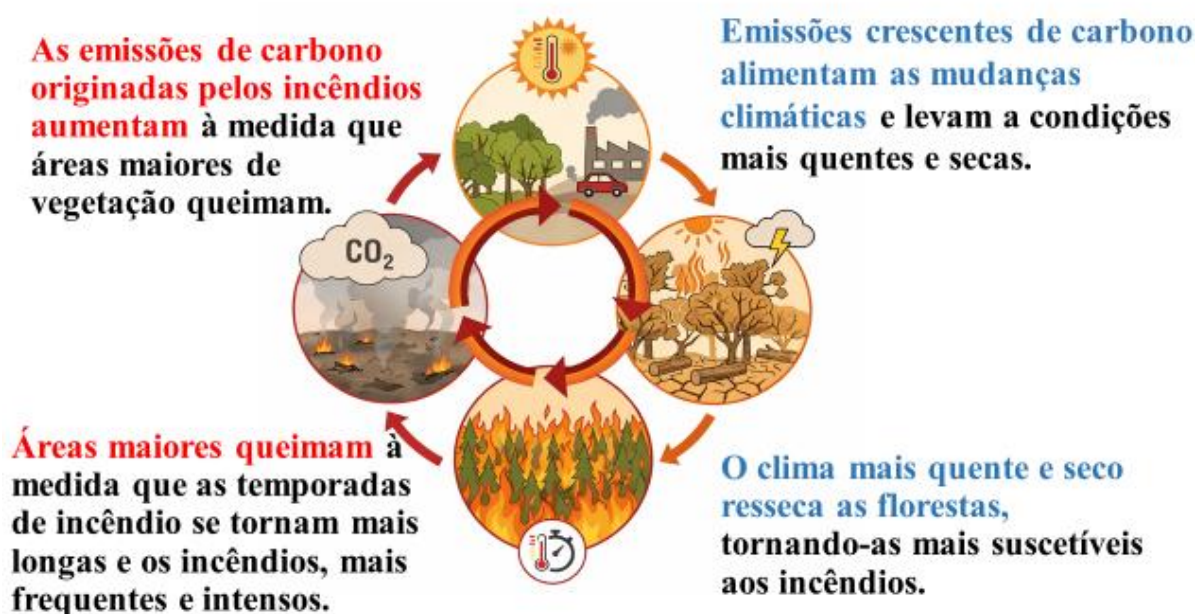
Os dados estatísticos sobre a ocorrência de incêndios florestais no Brasil e em diversos outros países demonstram que o maior número de incêndios se origina de fontes

antropogênicas, direta ou indiretamente (Vallejo-Villalta et al., 2019; Silva et al., 2020; Nascimento & Sena, 2020; Souto, 2021; Aragão et al., 2023). Pode-se citar, como causa de natureza humana, que resultam em incêndios florestais, operações florestais, originados por trabalhadores florestais em alguma atividade dentro da floresta; os incendiários que ateiaram fogo intencionalmente; os fumantes, originados por pontas de cigarro ou fósforo jogados pelos fumantes no ambiente sem os devidos cuidados; fogos de recreação, originados de fogueiras usadas por campistas para recreação e que não são apagadas devidamente; estrada de ferro, originado de fagulhas geradas entre o atrito dos trilhos com as rodas do trem; os descartes de resíduos sólidos, como vidros e latas descartados inadequadamente no ambiente, podem aquecer sob alta incidência de radiação solar e atuar como potenciais focos de ignição por refração (Soares; Batista; Tetto, 2025; Fiedler et al., 2020c). Entretanto, diversas outras atividades humanas também contribuem para a ocorrência de incêndios florestais, principalmente devido ao descarte incorreto de materiais inflamáveis e ao uso inadequado do fogo (Gomes et al., 2020a; Marques et al., 2020).

Esses eventos estão associados às atividades criminais e agrícolas, que utilizam o fogo como parte do processo de mudança, alterando a cobertura do solo (Silva et al., 2020; Morello et al., 2020; Oliveira et al., 2020; Penha et al., 2020). Tendo como consequências, ainda, o aumento das emissões de gases de efeito estufa, a redução da biodiversidade dos ecossistemas, a poluição do ar e o aumento dos índices de doenças respiratórias (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021; Ma et al., 2022) (Figura 3).

Nesse sentido, a queima controlada é reconhecida pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) como uma estratégia fundamental para a redução da pobreza e a promoção da segurança alimentar em comunidades rurais e tradicionais. A utilização técnica do fogo permite a renovação de pastagens naturais, o controle de pragas e a preparação de solos para a agricultura de subsistência de baixo impacto, atividades que sustentam a economia local em regiões como o Cerrado. Ao legitimar o manejo tradicional e integrá-lo às políticas públicas, o Estado não apenas mitiga o risco de incêndios, mas também garante a manutenção dos meios de vida de populações vulneráveis, reduzindo sua exposição a perdas econômicas severas e fortalecendo a resiliência social diante das mudanças climáticas (Soares; Batista; Tetto, 2025; Oliveira et al., 2022).

Figura 3. Ciclo climático dos incêndios.



Fonte: Adaptado de Global Forest Watch, 2024 (<https://www.globalforestwatch.org>).

A ocorrência de incêndios florestais em vários países do mundo são evidenciados, por exemplo, em estudos de Sari (2021); Szpakowski et al. (2021); Ciesielski et al. (2022) e em diferentes regiões do Brasil, pode-se citar como exemplo os trabalhos de Vallejo-Villalta et al. (2019); Canzian et al. (2020); Kovalsyki et al. (2020); Sant'Anna et al. (2020); Biazatti et al. (2021); Américo et al. (2021); Lacerda, et al. (2022) que demonstram a ocorrência de incêndios estão associados as ações humanas e condições meteorológicas.

Os incêndios comprometem a integridade dos serviços ecossistêmicos, a estabilidade econômica e o bem-estar social em áreas de florestas nativas (naturais) e de florestas plantadas (silvicultura) em todo o mundo (Oliveira et al., 2020; Penha et al., 2020).

Na Amazônia, os incêndios estão relacionados a períodos de seca severa e a práticas de corte para a limpeza de terras, afetando todo o ecossistema (Silva et al., 2020; Ferrante & Fearnside, 2020; Lemos e Cunha, 2021; Libonati et al., 2021). Suas áreas florestais sofreram perdas, tornando-as mais suscetíveis a incêndios (Lemos e Cunha, 2021). Assim, quando 80% da cobertura florestal é perdida, a suscetibilidade da região aumenta em 40% devido ao aumento do fogo (Marques et al., 2020; Xu et al., 2020).

No bioma Cerrado, a baixa densidade do dossel nas fitofisionomias savânicas permite que a radiação solar incida diretamente sobre a biomassa seca, promovendo um aquecimento radiativo que eleva a temperatura da vegetação e reduz a energia de ignição necessária. Esse processo torna o material combustível mais suscetível, facilitando o desencadeamento e a propagação do fogo em períodos de estiagem, quando a umidade relativa do ar é baixa e as

temperaturas superficiais são elevadas (Angelini et al., 2021). Esse cenário, aliado à dinâmica dos ventos, favorece a rápida propagação do fogo por meio da continuidade horizontal do estrato herbáceo, no qual a vegetação apresenta rápida resposta às variações do teor de umidade, tornando-se altamente inflamável durante o período de estiagem, transformando o fogo de um fator de renovação em uma ameaça à biodiversidade regional (Cachoeira et al., 2020; Américo et al., 2021).

2.3 Incêndios na Transição Cerrado-Amazônia

Os incêndios que ocorrem na região de transição Cerrado-Amazônia ameaçam igualmente ambos os domínios fitogeográficos, Cerrado e Amazônia (Marques et al., 2020). A utilização do fogo para a conversão de áreas florestais em áreas agricultáveis (Campanharo et al., 2019; Barlow et al., 2019; Azevedo-Ramos et al., 2020) foi destaque no período de colonização e na ocupação das terras e, atualmente, ainda é uma prática constante para a limpeza de áreas para plantio e/ou para a limpeza de terrenos (Cammelli et al., 2020; Li et al., 2020).

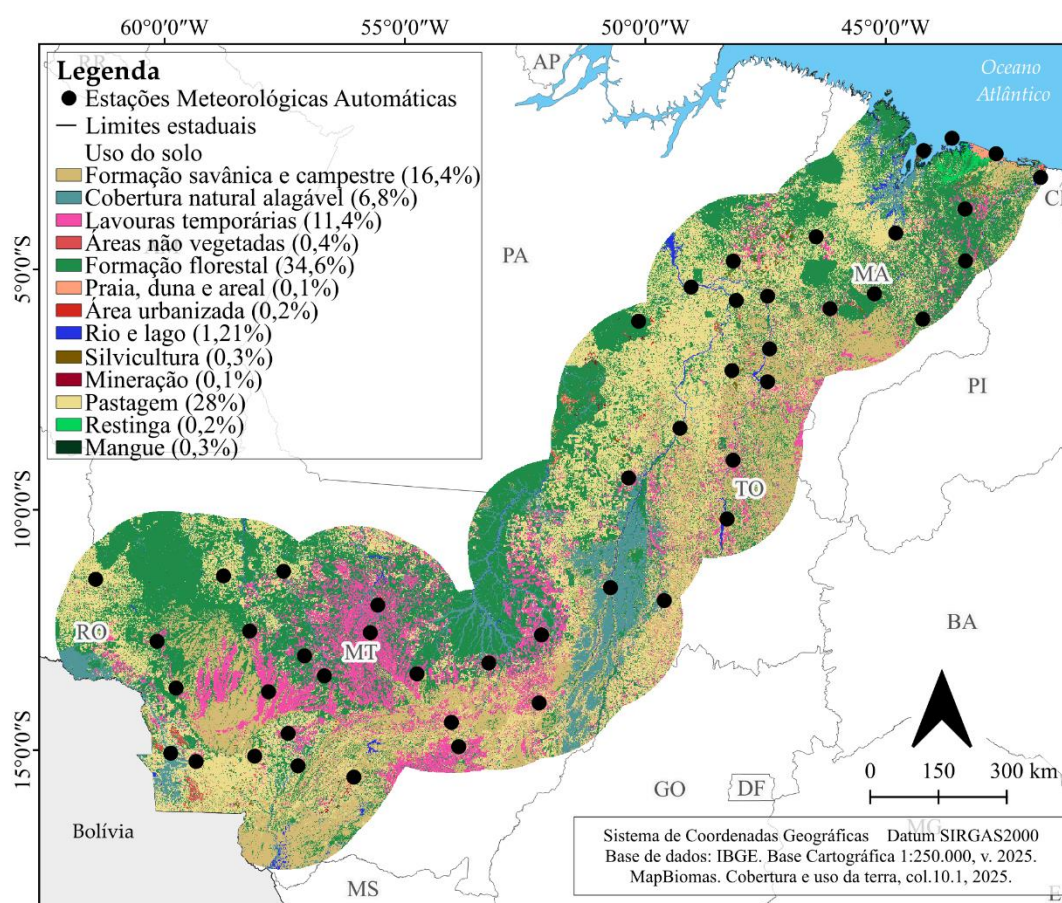
O aumento do desmatamento, incêndios ilegais (Campanharo et al., 2019; Barlow et al., 2019), a construção de redes de estradas de comunicação e o crescimento da densidade populacional (Azevedo-Ramos et al., 2020) promovem a fragmentação da vegetação, transformando a região de transição Cerrado-Amazônia em um mosaico disperso e mal conectado (Marques et al., 2020), o que impacta diretamente o ecossistema local.

A estruturação da cobertura e do uso do solo na transição Cerrado-Amazônia, conforme a Figura 4, revela uma configuração espacial de alta vulnerabilidade a incêndios, na qual aproximadamente 87% do território é composto por fitofisionomias com potencial inflamável. A paisagem é predominantemente composta por formações florestais (34,60%), que representam os maiores estoques de biomassa pesada e respondem a incêndios de alta severidade e de longa persistência térmica sob condições de estresse hídrico extremo. Adjacentes a esse estrato, as áreas de pastagem (28,01%), as formações savânicas e campestres (16,35%) e as lavouras temporárias (11,43%), que englobam cultivos de soja, algodão, arroz, cana e mosaicos de usos, constituem uma matriz de 55,79% da paisagem, dominada por combustíveis finos (MapBiomass, 2025).

Nesse mosaico, a periculosidade local é acentuada pela conectividade entre as classes. Enquanto as pastagens e as formações campestres funcionam como vetores de ignição e de rápida propagação devido à baixa densidade do material e à elevada sensibilidade às variações da umidade relativa, as formações florestais e as coberturas naturais alagáveis

(6,82%) atuam como acumuladores de matéria orgânica (Figura 4). Dessa forma, a continuidade espacial entre os remanescentes de vegetação nativa e os polígonos de uso antrópico intensivo define a carga e a conectividade hídrica do combustível, estabelecendo corredores de propagação que ampliam a vulnerabilidade regional e desafiam as estratégias de manejo e combate vigentes (Cachoeira et al., 2020; Xu et al., 2022).

Figura 4. Uso e Cobertura do Solo na região de transição Cerrado-Amazônia (2025).



Fonte: MapBiomias (2025)

As diferentes formas de uso da terra, as práticas agrícolas e condições de déficit de precipitação e baixa umidade relativa do ar, veem contribuindo significativamente com o perigo de incêndios na área de transição do Cerrado-Amazônia (Marques et al., 2020) colaborando para um processo de degradação do solo, perda da biodiversidade e desequilíbrio do ambiente (Morello et al., 2020; Oliveira et al., 2020; Pivello et al., 2021; Marengo et al., 2022).

Os incêndios florestais liberam diversos gases e partículas na atmosfera, dentre eles, o dióxido de carbono (CO_2), considerado o principal gás liberado, que contribui para o aquecimento global (Campanharo et al., 2019; Azevedo-Ramos et al., 2020; Carvalho et al.,

2020), promovendo uma modificação do meso e microclima, tornando-o mais propício a incêndios (Oliveira et al., 2020; Kelley et al., 2021).

A transição Cerrado-Amazônia no Brasil é considerada a maior transição savana-floresta do mundo (Marques et al., 2020) e é identificada como Zona de Tensão Ecológica (ZTE) devido à instabilidade e à variação climáticas permanentes e à hiperdinâmica da vegetação (Souto et al., 2021). Além destas particularidades, a região está localizada na fronteira agrícola brasileira e é conhecida internacionalmente como o “Arco do Desmatamento” (Marques et al., 2020).

A proteção ambiental na região é sustentada pela articulação entre o Código Florestal, a Lei nº 12.651/2012 (Brasil, 2012) e a recente Lei do Manejo Integrado do Fogo (Lei nº 14.944/2024; Brasil, 2024). Enquanto o Código Florestal estabelece as diretrizes de conservação permanente e de reserva legal, fundamentais para a manutenção da umidade e dos fragmentos florestais que barram a propagação das chamas, a Lei 14.944/2024 introduz uma mudança de paradigma essencial: a transição da proibição absoluta para a gestão estratégica (Soares; Batista; Tetto, 2025). Ao institucionalizar o Manejo Integrado do Fogo (MIF), a nova legislação reconhece as particularidades ecológicas do Cerrado e das áreas de transição, permitindo o uso do fogo prescrito como ferramenta para a redução de biomassa e a quebra da continuidade de combustíveis. Essa integração entre a proteção estrutural da vegetação e o controle operacional do fogo é determinante para mitigar incêndios catastróficos, protegendo a biodiversidade e os estoques de carbono em uma das fronteiras agrícolas mais vulneráveis do país (Hoki et al., 2023; Aragão, 2023).

A região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia apresenta sazonalidade climática anual, com seca e chuva (Marques et al., 2020). Além disso, essa região é suscetível a anomalias climáticas, como o *El Niño*, que intensifica a seca, eleva a temperatura do ar e os níveis de evapotranspiração (De Andrade et al., 2020; Aragão et al., 2023). Tais condições estão associadas a diferentes fatores de origem, como o clima, as atividades antrópicas e a fitofisionomia da vegetação (Sari, 2021; Biazatti et al., 2021).

A Amazônia e o Cerrado apresentam respostas contrastantes ao fogo (Marques et al., 2020). No Cerrado, há uma marcada estacionalidade climática que favorece adaptações morfofisiológicas da vegetação, como cascas espessas e gemas subterrâneas, que permitem rebrote pós-queimada, conferindo ao fogo um papel potencialmente regulador em intensidade moderada (Cachoeira et al., 2020). Em contrapartida, a Amazônia é caracterizada por elevada umidade e dossel contínuo; não possui mecanismos adaptativos ao fogo, de modo que os incêndios, geralmente associados a atividades humanas, resultam em danos severos e

duradouros (Souto et al., 2021). Assim, enquanto no Cerrado o fogo pode integrar a dinâmica ecológica, na Amazônia ele representa um distúrbio exógeno que compromete a resiliência florestal e intensifica processos de degradação ambiental (Marques et al., 2020; Xu et al., 2020).

2.4 Influência das variáveis meteorológicas nos incêndios florestais

As condições meteorológicas estão diretamente associadas à frequência e à ocorrência de incêndios em determinadas regiões (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021). O elo entre as variáveis meteorológicas e os incêndios florestais é visto como uma relação de produção de fogo, com dois cenários de propagação mínima. O primeiro apresenta escassez de precipitação, criando condições áridas e limitando a propagação dos incêndios devido à redução da produção de material combustível pela vegetação (Santos et al., 2019; Marengo et al., 2022). No segundo cenário, há um acumulado expressivo de precipitação e de material combustível; porém, a alta umidade do material combustível prejudica ou impede a propagação dos incêndios (Cachoeira et al., 2020). Diante disso, é de extrema necessidade analisar os índices de perigo de incêndio que utilizam variáveis meteorológicas em seu cálculo, pois essas variáveis influenciam diretamente a ignição e a propagação dos incêndios.

As condições meteorológicas são responsáveis pela ocorrência e propagação de incêndios na vegetação (Vicente-Serrano et al., 2020; Souto et al., 2021; Araújo et al., 2021). Tendo em conta a velocidade de propagação e a intensidade do incêndio, a ligação direta com as precipitações acumuladas, a temperatura do ar e a umidade relativa (Torres; Silva Júnior; Lima, 2019; Souto et al., 2021). Por meio da análise meteorológica local, é possível determinar os períodos com maior probabilidade de ocorrência de incêndios; porém, autores como Ramalho et al. (2021a) e Sari (2021) ressaltam que não basta que todas as condições meteorológicas estejam favoráveis à ocorrência de incêndio para que o fogo se inicie; também é necessário que haja uma fonte de ignição (Ramalho et al., 2021a).

Isso demonstra que, ao analisar a influência das variáveis meteorológicas sobre os incêndios, é preciso entender o comportamento de todas as variáveis meteorológicas e qual o papel de cada uma na interação com o material combustível (Souto et al., 2021; Araújo et al., 2021), pois a explicação do aumento ou não dos incêndios pode estar relacionada ao conjunto das variáveis meteorológicas (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021). Por esse motivo, é importante conhecer as principais variáveis meteorológicas e suas relações com os incêndios, o que aumenta a eficiência na elaboração de planos de mitigação e de combate a incêndios florestais (Vicente-Serrano et al., 2020; Souto et al., 2021). Com base no conhecimento das condições

meteorológicas, é possível identificar os dias do ano com maior probabilidade de ocorrência de incêndios florestais, o que permite direcionar corretamente as atividades de combate a incêndios (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021).

Costa et al. (2022) observaram que, nos meses mais secos, a incidência de focos de calor aumenta, sendo os meses de agosto a novembro os mais críticos entre 2016 e 2019 no estado do Pará. No entanto, não há um padrão anual; os fatores climáticos, como o fenômeno do El Niño, devem ser considerados na tomada de decisão sobre queimadas e incêndios florestais (Silva Júnior et al., 2019; Costa et al., 2022). O uso de dados meteorológicos concisos é importante para a elaboração de um programa, a prevenção e o combate aos incêndios de vegetação, bem como para a tomada de decisões rápidas e assertivas (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021), pois há períodos do ano em que os elementos meteorológicos contribuem para a ocorrência e a propagação do fogo (Vicente-Serrano et al., 2020). A precipitação e a umidade relativa do ar se destacam entre as variáveis meteorológicas mais empregadas (Souto et al., 2021), enquanto as altas temperaturas e baixas umidades relativas do ar são fatores-chave para a ignição de incêndios (Souto et al., 2021; Araújo et al., 2021).

2.4.1 Temperatura do ar

A temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos mais estudados atualmente; representa o grau de agitação molecular (energia cinética) de determinada substância, medido em uma escala finita. Usados quase como sinônimos, o calor difere da temperatura do ar por ser a energia em movimento, e não o grau de agitação das moléculas, como a temperatura (Xu et al., 2020; Souto et al., 2021; Delgado et al., 2022).

A temperatura do ar é resultado da radiação solar que atinge a superfície terrestre; por isso, sofre variações sazonais ao longo do ano e é determinada pelas características astronômicas (fotoperíodo, ângulo zenital, elevação solar, excentricidade da órbita da Terra, declinação e elevação solar), geográficas (latitude e altitude) e climáticas (transmissividade atmosférica) (Muniz e Caracristi, 2021).

Nos incêndios florestais, a temperatura do ar influencia a quantidade de calor necessária para que o material combustível entre em ignição, o que depende da temperatura inicial do material e da temperatura do ar à sua volta (Xu et al., 2020; Loiselle et al., 2020). De forma indireta, a temperatura do ar também influencia os incêndios por meio da alteração de outros elementos meteorológicos, como a velocidade e a direção do vento e a umidade do ar (Fiedler et al., 2020c). Altas temperaturas em períodos prolongados podem agravar a seca (Xu et al., 2020; Delgado et al., 2022), e não é apenas a quantidade de chuvas que é responsável

pelo aumento de incêndios (De Sales et al., 2020; Angelini et al., 2021).

A temperatura do ar influencia diretamente a umidade do material combustível, pois, quanto mais elevada, maior é a taxa de evaporação da água presente na biomassa, reduzindo sua umidade e tornando-a mais suscetível à ignição, variando conforme a exposição do terreno e a hora do dia (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021). Depois que um incêndio é iniciado, a influência da temperatura sobre ele é quase nula; porém, em locais com temperaturas elevadas do ar e do material combustível, o perigo de incêndio é maior (Araújo et al., 2021; Sari, 2021).

2.4.2 Umidade relativa do ar

A água pode ser encontrada na natureza em três estados diferentes: sólido, líquido e gasoso, podendo mudar de estado continuamente, o que influencia diretamente o clima (Araújo et al., 2021). A umidade do ar está relacionada à quantidade de vapor de água no estado gasoso presente em uma determinada camada de ar (De Sales et al., 2020; Angelini et al., 2021).

A umidade atmosférica é um dos fatores de maior importância na propagação de incêndios florestais, sendo que, em períodos extremamente secos, a baixa umidade pode afetar o conteúdo de umidade do material combustível vivo (Ramalho et al., 2020; Araújo et al., 2021), pois o material seco absorve umidade da atmosfera úmida e libera água quando o ar está seco (Cachoeira et al., 2020; Souto et al., 2021). Nesse sentido, a quantidade de umidade que o material morto pode absorver e reter do ar depende, basicamente, da umidade relativa do ar (Santos et al., 2019; Sant'Anna et al., 2020).

A quantidade de vapor da água na camada de ar é bastante variável, tanto no espaço quanto no tempo, misturando-se ao ar por difusão turbulenta e sendo transportada pelas correntes aéreas por longas distâncias, podendo voltar ao seu estado original quando se encontram condições favoráveis (Cachoeira et al., 2020). Na atmosfera, o vapor da água é considerado um transportador de calor (Angelini et al., 2021), pois, na passagem do estado sólido ou líquido para o gasoso, o vapor da água carrega consigo o calor latente consumido no processo de mudança de estado, transportando energia das partes mais quentes para as mais frias (Canzian et al., 2020; Silva et al., 2020; Johnston et al., 2020).

Desta forma, a umidade do material combustível nas florestas é controlada pela umidade relativa do ar, a não ser quando ocorre precipitação (Silva et al., 2020), estando diretamente associada às características físicas da biomassa (Souto et al., 2021).

O tempo que os materiais combustíveis florestais mortos levam para absorver ou

perder umidade varia conforme o tipo e o tamanho do material. Combustíveis finos, como folhas secas e gramíneas, apresentam secagem rápida, ajustando seu teor de água em poucas horas diante de reduções na umidade atmosférica, o que os torna altamente inflamáveis em períodos de estiagem (Soares; Batista; Tetto, 2017; Angelini et al., 2021). Em contrapartida, combustíveis grossos, como galhos e troncos, possuem maior capacidade de inércia hídrica, demandando dias ou semanas para atingir o equilíbrio com as condições ambientais. Essa diferença evidencia que a dinâmica da umidade do combustível é função tanto da variabilidade meteorológica quanto da morfologia vegetal, condicionando o risco de ignição e a intensidade dos incêndios florestais (Santos et al., 2019; Soares; Batista; Tetto, 2025).

Quando a camada de ar se encontra aquecida, a pressão de vapor exercida sobre ela diminui, o que aumenta o déficit de pressão de vapor da água e, consequentemente, a velocidade de absorção da água na superfície do material combustível (Santos et al., 2019; Sant'Anna et al., 2020). A umidade relativa do ar é um dos principais fatores na propagação de incêndios, exercendo maior influência no Brasil durante o inverno (Souto et al., 2021). Quando a umidade relativa do ar atinge níveis inferiores a 30%, torna-se extremamente difícil combater o incêndio (Cachoeira et al., 2020; Ramalho et al., 2021a).

A umidade relativa e a temperatura do ar desempenham papéis distintos, mas complementares, na dinâmica do fogo em ambientes florestais. A temperatura atua diretamente sobre a intensidade e a propagação das chamas, enquanto a umidade regula indiretamente o teor de água dos combustíveis. A combinação de altas temperaturas com baixa umidade relativa cria condições ideais para a ignição e propagação de incêndios, convertendo a vegetação em combustível disponível e aumentando a vulnerabilidade das áreas afetadas (Santos et al., 2019; Soares; Batista; Tetto, 2025).

A transição para um regime de perigo permanente resulta da interação entre a dessecação do material combustível vivo e os processos físico-químicos da atmosfera (Mansoor, 2021; Silva et al., 2021b). Diferentemente do material combustível morto (serrapilheira e galhos secos), que responde rapidamente às variações horárias das condições meteorológicas, o material combustível vivo dispõe de mecanismos fisiológicos de retenção hídrica. Sua inflamabilidade é determinada pelo teor de umidade do combustível vivo, que depende do equilíbrio entre a absorção radicular e a evapotranspiração. A dependência inversa entre a umidade relativa e a temperatura do ar dita esse processo: à medida que a temperatura aumenta, a capacidade do ar de reter umidade aumenta, o que leva a uma queda drástica na umidade relativa e intensifica a evapotranspiração vegetal (Cachoeira et al., 2020). Esse cenário promove o estresse hídrico severo nas plantas, reduzindo seu teor de umidade interna

a níveis críticos, o que transforma a vegetação viva, historicamente uma barreira natural ao fogo, em um vetor de propagação altamente inflamável, ampliando a continuidade horizontal e vertical dos incêndios (Soares; Batista; Tetto, 2017).

2.4.3 Vento

O vento é considerado o vetor de velocidade do ar, tendo como principais parâmetros a direção e a velocidade. Esses parâmetros são considerados grandezas pontuais, dependentes das condições atmosféricas e que variam no tempo e no espaço (Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020). Na camada limite entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorre a maior influência da geografia local sobre o vento (Cachoeira et al., 2020).

O vento fornece oxigênio aos incêndios, acelerando a perda de água do material combustível (Souto et al., 2021). Quando o vento passa pela floresta, o processo de evaporação é intensificado, tornando o material combustível mais seco (Cachoeira et al., 2020; Sari, 2021). O vento pode forçar as chamas sobre o material combustível adjacente, acelerando a propagação do incêndio (Cachoeira et al., 2020; Souto et al., 2021). Também pode ocorrer que o vento transporte fagulhas incandescentes a longas distâncias, formando novos focos de incêndio e dificultando as atividades de combate (Marques et al., 2021).

Devido à variabilidade no curto prazo, determinar o comportamento do vento é um desafio nos estudos sobre incêndios florestais (Cachoeira et al., 2020; Ramalho, 2020).

Souto et al. (2021), ao estudar o comportamento do fogo no estado de Minas Gerais, correlacionaram a velocidade do vento com as variáveis do incêndio e com outras variáveis meteorológicas, encontrando correlação predominantemente positiva e significativa, e observaram que, quanto maior a velocidade do vento, maior o número de focos de calor, uma vez que o vento é o principal elemento de propagação do fogo (Souto et al., 2021).

Gonçalves e Dias (2020) avaliaram a correlação entre os elementos meteorológicos e o número de ocorrências de incêndios no município de Jataí, em Goiás, e encontraram baixa correlação com a velocidade do vento. Segundo os autores, a não significância da correlação entre os incêndios e a velocidade do vento pode ser explicada pela maior movimentação do vento no verão; no entanto, nesse período, é frequente a ocorrência de chuvas, o que impede incêndios. Ainda segundo os autores, não se pode afirmar que o vento não influencia a ocorrência de incêndios, pois a análise aplicada pode não ser suficiente para detectá-la (Gonçalves e Dias, 2020).

2.4.4 Precipitação

A influência da precipitação sobre a dinâmica dos incêndios florestais é amplamente reconhecida em diversos estudos, como os de Beutling & Batista (2019), Torres, Silva Júnior e Lima (2019) e Marengo et al. (2022). Nos períodos prolongados de seca, o perigo de incêndios aumenta exponencialmente (Sari, 2021), devido à secagem do material combustível, tanto morto quanto vivo, o que facilita a ignição e acelera a propagação dos incêndios (Cachoeira et al., 2020).

A análise feita sobre o efeito da precipitação em relação as ocorrências de incêndios não podem ser baseadas somente ao somatório da precipitação (Souto et al., 2021), é importante que se estude também sua distribuição e frequência, pois o material combustível quando atinge umidade muito baixa não absorve água com tanta facilidade, podendo estar seco com poucas horas de exposição ao sol (Torres; Silva Júnior; Lima, 2019; Marengo et al., 2022).

Nos dias em que a precipitação (entrada de água no sistema) é menor que a evapotranspiração (saída de água do sistema), ocorre déficit hídrico, ou seja, a superfície passa a perder mais água para o ambiente do que recebe (Coutinho et al., 2020). Por esse motivo, regiões distintas que apresentam o mesmo total anual de precipitação podem ter comportamento de perigo de incêndios distintos (De Sales et al., 2020; Carvalho et al., 2021), pois os lugares que apresentam menor quantidade de precipitação, mas uniformemente distribuídas apresentam menor perigo de incêndio do que regiões com alto índice precipitações acumuladas em curto período do ano (Soares; Batista; Tetto, 2017; Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021).

Entende-se que a ocorrência dos incêndios está associada às condições de precipitação, pois longos períodos sem chuva poderiam favorecer a incidência de ocorrências, porém ao se avaliar o efeito da precipitação sobre o potencial de propagação do fogo em uma região, é necessário levar em consideração não apenas a quantidade de chuva, mas também sua distribuição estacional e espacial (Torres; Silva Júnior; Lima, 2019; Souto et al., 2021; Ma et al., 2022)

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utiliza o número de dias sem chuva como fator para determinar o perigo de incêndio na vegetação e adotou um sistema de classificação do risco (INPE, 2023). Casavecchia et al. (2019), ao avaliarem o índice de perigo de incêndio na transição dos biomas Cerrado-Amazônia, destacam que as mudanças nos regimes pluviométricos e na umidade relativa do ar são os fatores que mais influenciam o desempenho dos índices, o que ressalta a importância de adequá-los às condições

meteorológicas locais.

2.4.5 Radiação

A radiação solar é um componente meteorológico que influencia processos em diferentes escalas, desde a micrometeorológica, quando se refere aos fluxos turbulentos, até a macroescala, capaz de promover um aquecimento específico, com particularidades no planeta, o que origina a circulação geral da atmosfera (Zamadei et al., 2021; Ma et al., 2022).

A relação entre radiação e incêndio está interligada à condição do dossel da vegetação, pois este intercepta boa parte da radiação solar que atinge a biomassa vegetal, sendo a radiação a principal fonte de energia que aquece e seca os materiais combustíveis (Zamadei et al., 2021).

Estudos como os de Xu (2020), Zamadei et al. (2021), Ma et al. (2022), Cachoeira et al. (2020), que relacionam as variáveis meteorológicas, as condições do material combustível e os incêndios, demonstram a necessidade de previsão de perigo e de adoção de medidas de prevenção.

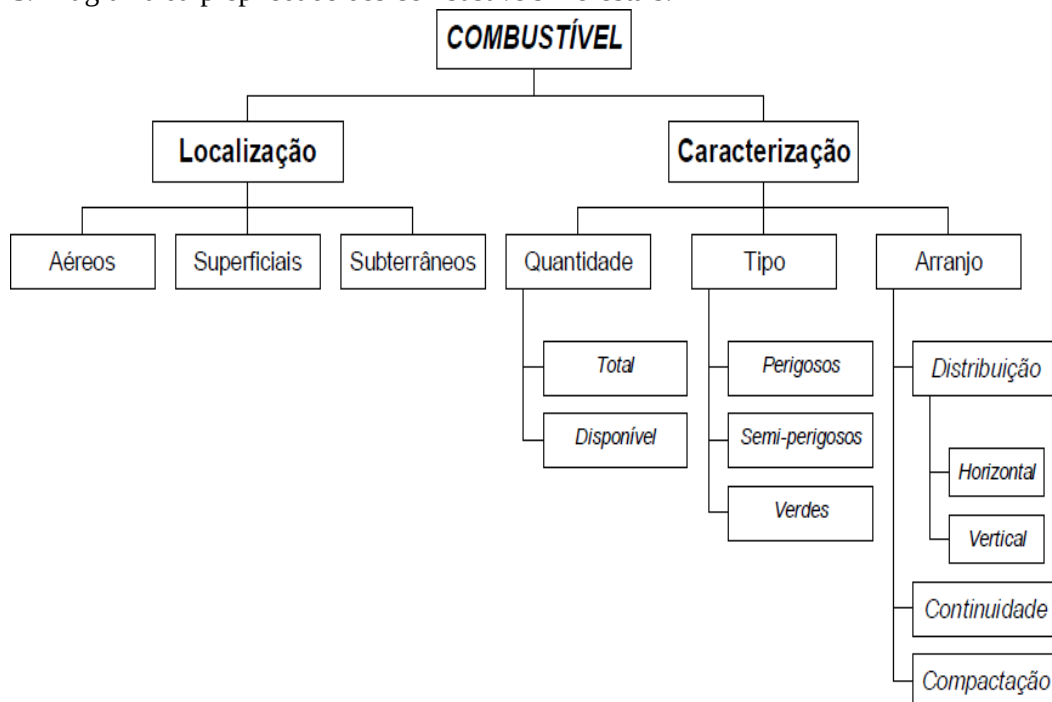
A análise realizada por Zamadei et al. (2021) na região de transição Cerrado-Amazônia, no estado de Mato Grosso, com raio de abrangência de 250 km e tendo como ponto de referência o município de Sinop/MT, buscou avaliar a sazonalidade da transmissividade atmosférica e da radiação solar (global e difusa), com os valores mais expressivos de radiação global ocorrendo durante o período seco, de maio a setembro. A radiação difusa apresentou comportamento oposto, com valores máximos no período chuvoso, de outubro a abril, evidenciando uma sazonalidade semelhante à da radiação global, dependente das condições atmosféricas. O comportamento da radiação direta teve seu pico de maio a setembro, durante a estação seca, o que contribuiu para o aumento do perigo de incêndio.

2.4.6 Material Combustível

O material combustível faz parte do triângulo do fogo; por isso, é indispensável para que o incêndio ocorra na vegetação. O combustível vegetal é qualquer material orgânico, vivo ou morto, com capacidade de ignição e de queima, sendo o material morto o principal responsável pela ocorrência e propagação dos incêndios, por conter menor quantidade de água do que o material vivo (Soares; Batista; Tetto, 2025; Cammelli et al., 2020; Souto et al., 2021). Assim, o tipo de vegetação influencia diretamente a propagação do fogo, sendo considerado uma variável determinante para a compreensão dos padrões e das probabilidades de ocorrência e de propagação dos incêndios florestais (Sant'Anna; Fiedler; Ramalho, 2020).

Com base na localização e na caracterização, os materiais combustíveis podem ser divididos em três classes: subterrâneo, superficial e aéreo, e suas subclassificações, tanto na caracterização quanto na localização (Figura 5), pois esses são os principais fatores que conduzem o fogo, lembrando ainda que as variáveis meteorológicas, a topografia e a umidade do material combustível também interferem na propagação do fogo (Beutling , 2005).

Figura 5. Diagrama da propriedade dos combustíveis florestais.



Fonte: Adaptado de Beutling (2005).

Os materiais combustíveis subterrâneos são constituídos por materiais abaixo da linha do solo, podendo ser formados por matéria orgânica, húmus e raízes, e podem dar origem a incêndios subterrâneos (Beutling 2005; Schumacher 2018). Os materiais combustíveis superficiais são todos aqueles localizados sobre ou acima do solo, podendo ser formados por materiais vivos ou mortos, como galhos, folhas, troncos caídos, gramíneas, ervas, arbustos, húmus e turfa (Santos et al., 2019).

Os combustíveis aéreos são formados por copas e galhos das árvores, tocos, musgos e arbustos altos (acima de 1,80 m), podendo ser vivos ou mortos e estar fisicamente separados do solo, constituindo o dossel da floresta (Santos et al., 2019; Loisel et al., 2020). O tipo de incêndio depende da quantidade e da distribuição do material combustível na floresta; incêndios superficiais podem adquirir alta intensidade e transformar-se em incêndio de copa, se a quantidade e a distribuição do material combustível aéreo forem suficientes para isso (Schumacher, 2018; Santos et al., 2019; Loisel et al., 2020; Mansoor et al., 2021; Biazatti et

al., 2021).

Além da localização, os materiais combustíveis podem ser classificados em função de suas características presentes no estrato florestal (Loiselle et al., 2020), em conjunto com as variáveis meteorológicas e topográficas e a umidade do material combustível (Santos et al., 2019), e são responsáveis pelo comportamento e pela propagação dos incêndios na vegetação (Souza & Vale, 2019; Loiselle et al., 2020).

Por fazer parte do triângulo do fogo, o material combustível é fundamental para a combustão, e a intensidade do fogo é diretamente proporcional à quantidade de material combustível (Santos et al., 2019). Segundo Arruda et al. (2021), com o conhecimento do comportamento do fogo e das condições ambientais, é possível distinguir as partes de um incêndio. No entanto, as mudanças no comportamento do fogo não são regidas apenas pelas características do tempo; há também influência da troca de material combustível (Cammelli et al., 2020; Souto et al., 2021). Cabe destacar que as chuvas, a umidade relativa do ar e a temperatura do ar são os fatores meteorológicos que mais influenciam a umidade do material combustível (Santos et al., 2019) e, por esse motivo, devem ser monitorados constantemente para determinar o perigo de incêndio florestal (Cammelli et al., 2020; Souto et al., 2021).

No que se refere à disponibilidade de materiais combustíveis, a expansão da agricultura e da pecuária apresenta o grau mais elevado de perigo de incêndios, sobretudo em condições secas e com manejo inadequado (Silva et al., 2020). Assim, a variação da cobertura vegetal implica mudanças nos aspectos relacionados ao comportamento do fogo, especialmente no que se refere ao combustível e às condições meteorológicas (Prudente, 2016; Santos et al., 2019). Com base no uso e na cobertura vegetal, é possível delimitar o tipo de material combustível presente em cada porção da área de interesse (Ramalho, 2020), por meio da classificação e do mapeamento do perigo de incêndio (Santos et al., 2019; Kovalskyki et al., 2020; Araújo et al., 2021).

Estudos de Xu et al. (2020) na Amazônia indicaram redução da umidade do combustível florestal no sub-bosque, devido à perda do dossel da floresta, o que permite que a radiação solar aqueça a vegetação do sub-bosque e seque o combustível da serapilheira, contribuindo para a ocorrência de incêndios em mais da metade das regiões da Amazônia, com perdas significativas de cobertura da vegetal.

Arruda et al. (2021) enfatizam que, embora os incêndios florestais tenham historicamente desempenhado um papel na dinâmica ecológica do Cerrado, as alterações recentes no regime de fogo intensificaram seus efeitos negativos. Nas últimas décadas, observa-se um aumento significativo dos impactos ambientais, das perdas econômicas, da

poluição atmosférica e das emissões de gases de efeito estufa, o que evidencia que a frequência e a intensidade dos incêndios ultrapassaram os limites de resiliência do bioma.

2.5 Índices de perigo de incêndio

A utilização e a elaboração de índices como indicadores de perigo de incêndio tiveram início em meados dos anos de 1930, no Canadá e nos Estados Unidos. No Brasil, a partir da década de 1960, com o incêndio na Fazenda Monte Alegre, no estado do Paraná, surgiu o primeiro índice, baseado em dados meteorológicos, com a finalidade de proteger a região contra incêndios. Nos Estados Unidos, foi desenvolvido o sistema nacional de avaliação de risco de incêndio (NFDRS), que combina vários índices, considerando o efeito do teor de umidade do material combustível, as variáveis meteorológicas e a inclinação sobre a taxa de propagação do fogo, por meio de um modelo de propagação semifísica (Silva et al., 2020).

O Serviço Florestal do Canadá, desde 1960, tem utilizado o Sistema Canadense de Avaliação de Risco de Incêndio (CFFDRS), que se fundamenta em dois conceitos: o Índice Meteorológico de Incêndio (FWI) e a Previsão do Comportamento do Fogo (FBP), sendo que o FWI procura antecipar o potencial de ignição diária do incêndio e o FBP é responsável por estimar o modelo de evolução do fogo causado de uma única fonte (Silva et al., 2020).

Diversos países recomendaram, por meio de agências governamentais ou de pesquisadores independentes, um sistema de informação sobre incêndios florestais, com base em índices de risco ou de perigo (Silva et al., 2020). Esses índices são classificados em métodos cumulativos e não cumulativos. Os índices considerados não cumulativos utilizam as condições climáticas vigentes no dia, enquanto os cumulativos consideram as condições das variáveis meteorológicas ao longo de uma sucessão de dias.

Diversos índices utilizam, em seus cálculos, dados diários de variáveis meteorológicas para avaliar o grau de perigo de incêndio. Dentre eles, o Índice de Resistência ao Fogo (IRF), o Índice Meteorológico de Incêndio (*Fire Weather Index* - FWI) (Van Wagner, 1987), as Fórmulas de Monte Alegre (FMA) e (FMA+), Nesterov (G) e Angström (B) podem indicar, como resposta, o melhor índice, grau e correlação entre os elementos observados para cada região em estudo.

Mundialmente são utilizados vários modelos para índices de risco/perigo de incêndio, destacam-se o de Nesterov (Nesterov, 1949), Angström (Chandler, 1961), Munger (Munger, 1916), *Telicyn* (Telicyn, 1970), Fórmula de Monte Alegre (FMA) (Soares, 1972), *Equilibrium Moisture Content* (EMC) (Bradshaw et al., 1983), *Fosberg Fire Weather Index* (FFWI) (Fosberg, 1983; Preisler, 2008), *Fire Weather Index* (FWI) (Van Wagner, 1987), *Initial Spread*

Index (ISI) (Van Wagner, 1987), *Buildup Index* (BUI) (Van Wagner, 1987), *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC) (Van Wagner, 1987), *Duff Moisture Code* (DMC) (Van Wagner, 1987), *Drought Code* (DC) (Van Wagner, 1987), IFA (Portugal), Fórmula de Monte Alegre Modificada (FMA⁺) (Nunes et al., 2006), relações entre Precipitação e Evaporação (Sampaio, 1999).

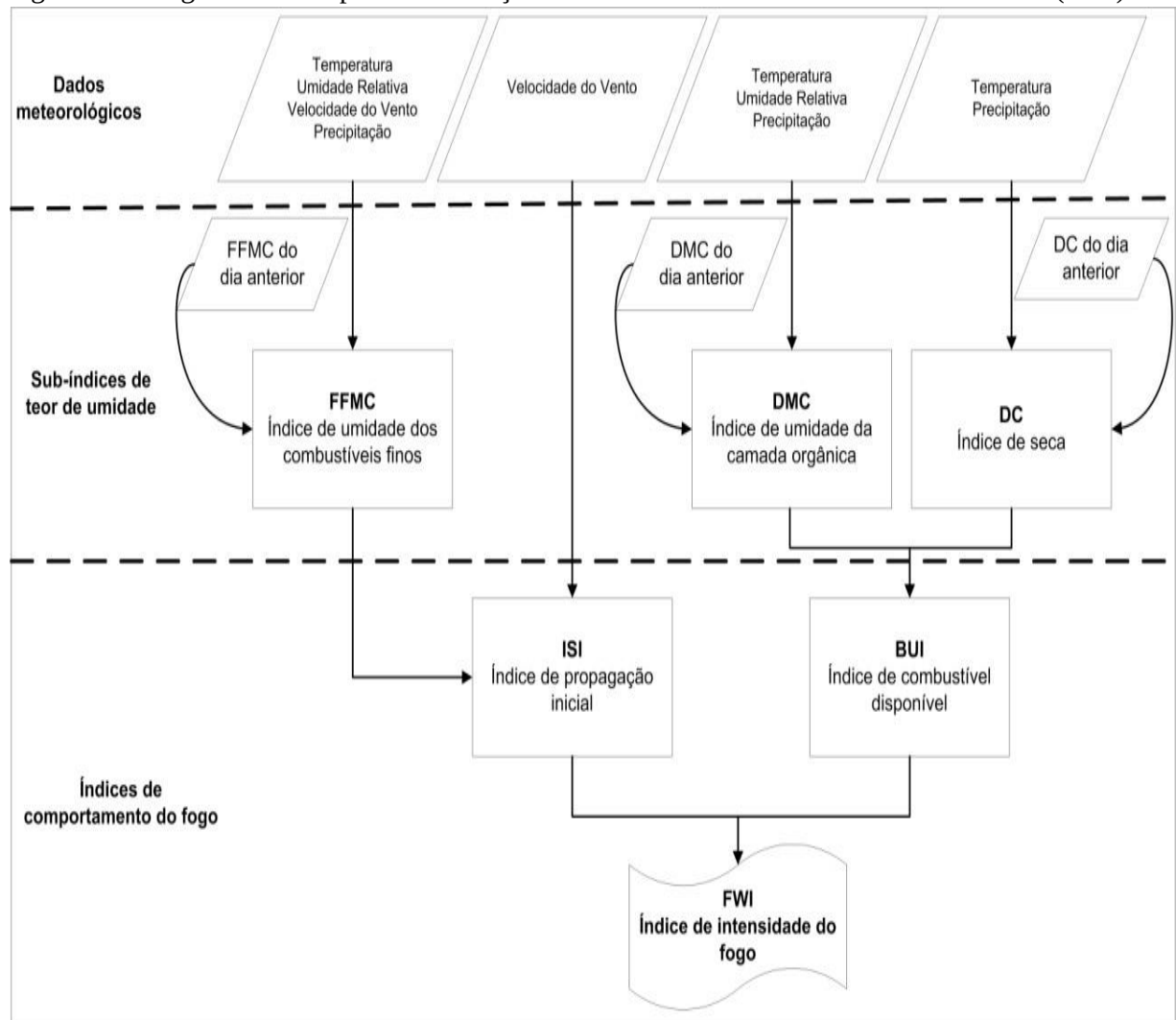
No Brasil, os índices de Angstron, Nesterov, Fórmula de Monte Alegre (FMA) e Fórmula de Monte Alegre Modificada (FMA⁺) são os mais utilizados para prever o perigo de incêndio de vegetação (Nunes e Soares; Batista, 2007; Gonçalves e Dias, 2020; Delgado et al., 2022; Almeida et al., 2022).

2.5.1 Índice FWI

O índice meteorológico de incêndios florestais do Canadá (FWI) é fundamentado nas condições de diversos combustíveis presentes no solo florestal, sendo determinado de forma indireta a partir de leituras momentâneas de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento ao meio-dia, horário local, e de precipitação acumulada nas últimas 24 horas, antevendo o perigo de incêndio durante o período de pico entre 14h00 e 16h00 (horário local).

O FWI é composto por seis componentes: três de umidade do combustível e três de comportamento do fogo, fundamentados na dinâmica do vento e no teor de umidade do material combustível. Nos três primeiros, observa-se a influência das condições meteorológicas no teor de água dos tipos de combustível, enquanto os três últimos componentes avaliam a quantidade de umidade acumulada e as características do comportamento do incêndio (Figura 6), os quais são calculados com base nos valores das referidas variáveis meteorológicas, por meio de uma classificação numérica do potencial de intensidade de incêndios em um determinado tipo de combustível. Seus resultados são classificados em seis classes de perigo, definidas em níveis, com valores de FWI e grau de perigo que variam de muito baixa a extremamente alta (Souto et al., 2021).

Figura 6. Fluxograma das etapas de elaboração do Índice Canadense de Incêndios Florestais (FWI)



Fonte: Adaptado de Van Wagner (1987)

A definição do grau de perigo estimado pelo índice é feita por meio de uma escala, conforme a Tabela.

Tabela 1. Escala de perigo do Índice de FWI

Valor de FWI	Grau de Perigo
$FWI < 52$	Muito baixa
$5,2 \leq FWI < 11,2$	Baixa
$11,2 \leq FWI < 21,3$	Moderada
$21,3 \leq FWI < 38,0$	Alta
$38,0 \leq FWI < 50,0$	Muito alta
$FWI \geq 50,0$	Extrema

Fonte: adaptado de Souto et al. (2021)

Souto et al. (2021) utilizaram o FWI da base de dados do *Copernicus Climate Change Service* (C3S) para avaliar a influência das condições meteorológicas atuais e futuras sobre os incêndios florestais no estado de Minas Gerais, bem como dos fatores relacionados à ação

humana. O estudo apresentou valores de correlação positivos e significativos entre FWI e a pressão superficial, a velocidade do vento e a temperatura do ar no período de 2015 a 2019.

Torres & Lima (2019), em um estudo sobre o perigo de incêndio florestal no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro, em Minas Gerais, observaram que o FWI é considerado eficiente para prever incêndios na região de estudo, respondendo melhor à temperatura máxima diária do ar e à umidade relativa do ar às 15h00.

2.5.2 Índice de Angstrom

De acordo com Soares (1985), esse índice foi desenvolvido na Suécia e baseia-se fundamentalmente na temperatura e na umidade relativa do ar, ambas medidas diariamente às 13h00. É um índice não-acumulativo e a sua equação, conforme Eq.1:

$$B = 0,05.H.0,1(T - 27) \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: B = índice de Angstrom; H = umidade relativa do ar em %; T = temperatura do ar em °C.

A interpretação do índice é feita da seguinte maneira: sempre que o valor de “B” for menor que 2,5, haverá perigo de incêndio, isto é, as condições atmosféricas do dia estarão favoráveis à ocorrência de incêndios.

2.5.3 Índice de Nesterov

Segundo Soares (1985), este índice foi desenvolvido na ex-União das Repúblicas Socialistas Soviéticas e aperfeiçoado na Polônia. Apresenta como variáveis a temperatura e o déficit de saturação do ar, ambos medidos diariamente às 13h00.

O índice de Nesterov, que é acumulativo, tem a seguinte equação básica, Eq. 2:

$$G = \sum_{i=1}^n di.ti \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: G = Índice de Nesterov; d = déficit de saturação do ar, em mbar; t = temperatura do ar, em °C; n = número de dias sem chuva com menos de 10,0 mm.

O déficit de saturação do ar, por sua vez, é igual à diferença entre a pressão máxima de vapor d'água e a pressão real de vapor d'água, podendo ser calculado por meio da seguinte expressão, Eq.3:

$$d = E (1 - H/100) \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: d = déficit de saturação do ar, em mbar; E = pressão máxima de vapor de água, em mbar; H = umidade relativa do ar, em %.

No índice de Nesterov, a continuidade do somatório é limitada pela ocorrência das restrições apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Restrições do índice de Nesterov em função da quantidade de chuva do dia

Chuva do dia (mm)	Modificação no cálculo
≤ 2,0	Nenhuma.
2,1 a 5,0	Abater 25 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
5,1 a 8,0	Abater 50 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
8,1 a 10,0	Abandonar a somatória anterior e recomeçar o cálculo, isto é, G = (d.t) do dia.
> 10,0	Interromper o cálculo (G = 0) e recomeçar a somatória no dia seguinte ou quando a chuva cessar.

A interpretação do grau de perigo estimado pelo índice é feita por meio de uma escala de perigo, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Escala de perigo do Índice de Nesterov

Valor de G	Grau de Perigo
≤ 300	Nenhum risco
301 a 500	Risco pequeno
501 a 1000	Risco médio
1001 a 4000	Risco grande
> 4000	Risco altíssimo

Fonte: adaptado de Nunes (2005)

Os melhores resultados para o índice Nesterov, em termos de perigo de incêndio florestal no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro/MG, foram obtidos com a média diária dos dados meteorológicos (Torres & Lima, 2019).

2.5.4 Índices Fórmula de Monte Alegre (FMA)

A FMA é um índice acumulativo que utiliza duas variáveis: uma, de forma direta, a umidade relativa do ar, medida às 13h00; e outra, de forma indireta, a precipitação diária e o número de dias sem chuva, para seu cálculo (Soares, 1998).

Sua equação básica, conforme Eq. 4:

$$FMA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

FMA = Fórmula de Monte Alegre

Em que: H = umidade relativa do ar, em (%), medida às 13h00; n = número de dias sem chuva com precipitação igual ou superior a 13,0 mm.

Por ser acumulativo no que se refere à umidade relativa do ar, o índice está sujeito a restrições de precipitação, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Restrições da fórmula de Monte Alegre (FMA) em função da quantidade de chuva do dia

Chuva do dia (mm)	Modificação no cálculo
≤ 2,4	Nenhuma.
2,5 a 4,9	Abater 30% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
5,0 a 9,9	Abater 60% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
10,0 a 12,9	Abater 80% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
> 12,9	Interromper o cálculo (FMA = 0) e recomeçar a somatória no dia seguinte.

Fonte: Nunes (2005)

A interpretação do grau de perigo estimado pela Fórmula de Monte Alegre é feita por meio de uma escala, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Escala de perigo da Fórmula de Monte Alegre (FMA)

Valor de FMA	Grau de Perigo
≤ 1,0	Nulo
1,1 a 3,0	Pequeno
3,1 a 8,0	Médio
8,1 a 20,0	Alto
> 20,0	Muito Alto

Fonte: Nunes (2005)

A Fórmula de Monte Alegre (FMA) é atualmente utilizada em diversos locais do Brasil (Torres & Lima, 2019; Gonçalves & Dias, 2020; Almeida et al., 2022; Beu, 2022; Miranda et al., 2022; Delgado et al., 2022). Contudo, outros índices de perigo de incêndio que utilizam dados meteorológicos também são importantes e eficazes; no entanto, dependendo da região de estudo, é necessário ajustar as classes de perigo (Casavecchia et al., 2019).

2.5.5 Índice Fórmula de Monte Alegria Alterada (FMA+)

A Fórmula de Monte Alegre (FMA) foi modificada pela inclusão da variável de velocidade do vento no índice. A Fórmula de Monte Alegria Alterada (FMA+) adotou um caráter que também lhe permite indicar o perigo de propagação do fogo. A FMA+ inclui a variável velocidade do vento em seu índice (Nunes, 2005).

O cálculo da FMA+ é feito por meio da fórmula da Eq.5:

$$FMA^+ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H} \right) e^{0,04v} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: FMA+ = Fórmula de Monte Alegre Alterada; H = umidade relativa do ar em %, medida às 13h00; n = número de dias sem chuva com precipitação igual ou superior a 13,0 mm; v = velocidade do vento em m.s⁻¹, medida às 13h00; e = base do logaritmo natural (2,718282).

O cálculo da Fórmula de Monte Alegre Alterada também utiliza, em suas análises, a quantidade de chuva diária (Tabela 6).

Tabela 6. Restrições da Fórmula de Monte Alegre alteradas em função da quantidade de chuva do dia

Chuva do dia (mm)	Modificação no cálculo
≤ 2,4	Nenhuma.
2,5 a 4,9	Abater 30% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
5,0 a 9,9	Abater 60% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
10,0 a 12,9	Abater 80% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
> 12,9	Interromper o cálculo (FMA = 0) e recomeçar a somatória no dia seguinte.

Fonte: Nunes (2005)

A análise de perigo estimada pela Fórmula de Monte Alegre Alterada é realizada por meio de uma escala que representa o grau de perigo, apresentada na Tabela 7.

Tabela 7. Escala de perigo da Fórmula de Monte Alegre Alterada

Valor de FMA+	Grau de Perigo
≤ 3,0	Nulo
3,1 a 8,0	Pequeno
8,1 a 14,0	Médio
14,1 a 24,0	Alto
> 24,0	Muito alto

Fonte: Nunes (2005)

2.5.6. Precipitação – Evaporação (P-EVAP)

O índice de perigo de incêndio é acumulativo; foi proposto por Sampaio (1999) e considera a relação entre a precipitação (P) e a evapotranspiração (EVAP), ambas medidas diariamente em milímetros. Fundamenta-se no princípio do balanço hídrico simplificado para determinar o estado de dessecação dos combustíveis florestais. Diferentemente de índices puramente pluviométricos, o P-EVAP integra a perda de umidade por evapotranspiração, permitindo uma estimativa mais fiel do déficit hídrico acumulado na biomassa (Torres & Ribeiro, 2008). O índice utiliza as restrições do índice de Nesterov.

O índice é obtido conforme Eq. 6.

$$P - EVAP = \sum_{i=1}^n P - EVAP \quad \text{Eq. 6}$$

Em que: P = precipitação total diária, em mm; Evap = evaporação potencial diária, em mm; n = número de dias com precipitação total diária maior que 15 mm.

2.5.7. Evaporação/Precipitação (EVAP/P)

O índice baseado na razão entre Evaporação e Precipitação tem raízes na climatologia clássica, sendo uma derivação do Índice de Aridez de Budyko ou do Índice de Aridez da UNEP. Enquanto o (EVAP) indica o volume de água perdida, o (P) indica a eficiência da precipitação em manter o ambiente úmido. O índice é acumulativo e utiliza ambas as variáveis (precipitação e evapotranspiração); os valores são expressos em milímetros e no tempo diário (Torress & Ribeiro, 2008). As restrições do índice constam na Tabela 8.

A obtenção do índice é realizada por meio do cálculo, conforme a Eq.7.

$$\frac{EVAP}{P} = \sum_{i=1}^n \frac{EVAP}{P} \quad \text{Eq. 7}$$

Os índices de perigo de incêndio P-EVAP e EVAP/P apresentam restrições de aplicação nas fórmulas (Tabela 8).

Tabela 8. Restrições do índice P-EVAP e do EVAP/P em função da quantidade de chuva do dia

Chuva do dia (mm)	Modificações nos cálculos EVAP/P
< 1,0	Não entra no cálculo.
1,0-15,0	Dividir a EVAP/P da véspera pela chuva do dia.
>15	Interromper o cálculo e recomeçar no dia seguinte ou quando a chuva cessar. No dia da chuva, EVAP/ P=0,00.
P-EVAP	
≤ 2,0	Nenhuma
2,1 a 5,0	Abater 25 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
5,1 a 8,0	Abater 50 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
8,1 a 10,0	Abandonar a somatória anterior e recomeçar o cálculo, isto é, G = (d.t) do dia.
> 10,0	Interromper o cálculo (G=0), recomeçando a somatória no dia seguinte ou quando a chuva cessar.

Fonte: Casavechia et al. (2019)

Para calcular a evaporação potencial, considerou-se como referência a evapotranspiração potencial obtida pelo modelo de Camargo (1999) (Eq. 8), por exigir poucos dados de entrada e por apresentar bons resultados na região de estudo (Tanaka, 2016).

$$ET_0 = F \cdot H_o \cdot T_{med} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração potencial, em mm; F é o fator de correção do modelo; H_o é a radiação extraterrestre, em MJ m².dia⁻¹ e T_{med} é a temperatura média diária, em °C.

Os índices permitem avaliar o perigo de incêndio, pois são considerados instrumentos eficientes para prevenir incêndios florestais e podem ser utilizados no planejamento e no monitoramento de áreas de maior suscetibilidade (Vallejo-Villalta et al., 2019; Silva et al., 2020). Casavecchia et al. (2019) observaram que os índices de perigo obtidos na Fórmula de Monte Alegre (FMA) e na Fórmula de Monte Alegre Modificada (FMA+), na transição Cerrado-Amazônia, apresentaram dependência cumulativa do número de dias sem chuva, o que pode causar erros de predição quando ocorrem acumulados de precipitação menores. As mudanças nos regimes de chuvas e na umidade relativa do ar foram os fatores que mais influenciaram o desempenho dos índices.

Torres & Lima (2019) utilizaram os índices de perigo de incêndio FMA e FMA+ para prever o perigo de incêndio na vegetação do Parque Estadual da Serra de Brigadeiro, no município de Viçosa, e observaram sua eficiência, com resultados satisfatórios ao empregar dados meteorológicos médios diários.

Beu (2022), ao avaliar o perigo de incêndios na Floresta Nacional de Ipanema (Flona de Ipanema/SP) com dados meteorológicos da estação automática do INMET, indicou que a Fórmula de Monte Alegre Alterada é uma ferramenta adequada para as atividades de prevenção e combate a incêndios florestais. O autor sugere a instalação de estações meteorológicas na Flona Ipanema para o monitoramento das condições ambientais e a operacionalização da FMA+.

Casavechia (2019) avaliou a eficácia de diferentes índices de risco de incêndios florestais. O Índice de Angstron apresentou o melhor desempenho na predição de focos de calor na região norte-mato-grossense. Complementarmente, o uso de índices baseados no balanço hídrico, como o P-EVAP, proporcionou uma visão mais robusta ao acumular o déficit entre a precipitação e a evapotranspiração. Essa abordagem permitiu identificar quando a carga total de biomassa se converte em carga disponível, refletindo o estado real de dessecação da vegetação sob a influência da alta demanda evaporativa tropical.

2.6 Uso de imagens de satélite e SIG na análise do perigo de incêndios

A utilização de dados de Sensoriamento Remoto (SR) e de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) é considerada uma importante ferramenta, capaz de identificar locais que haverá maior probabilidade de ocorrer focos de calor (Santos et al., 2020; Oliveira et al., 2020; Arruda et al., 2021), permitindo anteceder as regiões de maior perigo, para que assim os serviços de combate aos incêndios possam estruturar suas ações (Vallejo-Villalta et al., 2019; Szpakowski et al., 2021).

Dados de Sensoriamento Remoto (SR) contribuem para a compreensão de padrões e processos, bem como para a calibração e validação dos resultados da abordagem de modelagem (Szpakowski et al., 2021). Assim, características da cobertura do dossel e o índice de área foliar (Coutinho et al., 2020), provenientes de sensoriamento remoto, são frequentemente utilizados para avaliar a distribuição da vegetação e sua capacidade de resiliência em função das condições externas (Santos et al., 2020; Arruda et al., 2021).

Os dados obtidos por sensoriamento remoto têm desempenhado um papel importante nos estudos da ciência da Terra. Isso ocorre devido ao uso de diferentes sensores capazes de superar a capacidade de percepção do olho humano na caracterização de objetos ou fenômenos terrestres (Szpakowski et al., 2021; Arruda et al., 2021). Os sensores embarcados em satélites ou aeronaves são capazes de detectar a energia refletida (visível e infravermelho), emitida (infravermelho térmico) ou retroprojetada (micro-ondas) pela atmosfera ou pela superfície de objetos em diferentes porções do espectro eletromagnético (Arruda et al., 2021).

Modelos numéricos e computacionais possibilitam compreender e prever fenômenos ambientais complexos, sendo necessário estimar o grau de confiabilidade dos resultados (Vallejo-Villalta et al., 2019; Santos et al., 2020; Xu et al., 2020; Souto et al., 2021; Araújo et al., 2021). Desta forma, a validação consiste em ampliar a confiança nos resultados obtidos pelo modelo (Kovalsyki et al., 2020; Camelo et al., 2020).

Vários autores utilizam em suas análises os fatores e sua hierarquização, em classes e pesos para definição da suscetibilidade ao fogo Chuvieco & Congalton (1989); Vettorazzi & Ferraz (1998); Ribeiro et al., (2008); Chuvieco et al., (2010); Prudente (2010); Barbosa (2010); White et al. (2016); Juvanhol et al., (2016); Pereira & Dutra (2017); Camelo et al., (2020); Moreira et al., (2020); Kovalsyki et al., (2020); Juvanhol et al., (2021). Os autores destacam ainda que as técnicas de sensoriamento remoto e dados vetoriais possibilitam o mapeamento com o objetivo de dar suporte as medidas de prevenção e combate aos incêndios florestais (Ghorbanzadeh, 2019; Kovalsyki et al., 2020), pois cada nível de informação além de ter um peso, recebe também um coeficiente, conforme uma classificação de perigo (alto, médio e baixo) de incêndio (Chuvieco et al., 2010; Juvanhol et al., 2021), posterior a essa análise pode-se realizar o cruzamento dos dados obtidos (Camargo et al., 2019; Kovalsyki et al., 2020; Camelo et al., 2020).

A utilização de técnicas de geoprocessamento tem sido amplamente utilizada em vários trabalhos, como exemplo, os estudos (Vallejo-Villalta et al., 2019; Santos et al., 2020; Xu et al., 2020; Santos, 2020; Griebeler et al., 2020; Arruda et al., 2021; Szpakowski et al., 2021;

Mansoor et al., 2021; Santana et al., 2021; MA, 2022; Lacerda et al., 2022). Empregando variáveis meteorológicas, morfológicas, disponibilidade de combustível e ação antrópica (Oliveira, 2020) para a detecção das áreas com maior suscetibilidade a incêndios, com o objetivo de desenvolver uma alternativa de monitoramento ambiental que possibilite a melhoria no gerenciamento desses locais (Camelo et al., 2020; Arruda et al., 2021; Lacerda et al., 2022).

No Brasil, desde a década de 1980, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vem investindo em sistemas de identificação de focos de calor e de áreas de queimadas, com base em imagens de sensores a bordo de satélites polares e geoestacionários. Os satélites realizam o reconhecimento de focos de calor a partir de pontos geográficos da superfície do solo, por meio de sensores espaciais (INPE, 2021). Atualmente, todo o território brasileiro e parte da América do Sul estão cobertos por imagens geradas pelas estações do INPE. Desde junho de 1998, o INPE é referência no monitoramento de queimadas e incêndios florestais, com informações disponíveis ao usuário, de forma pública e gratuita, em sua plataforma, cerca de 20 minutos após a passagem dos satélites (INPE, 2022).

A caracterização dos regimes de fogo pode ser realizada com base na área afetada, sazonalidade, padrão espacial, frequência, gravidade e intensidade (Xu et al., 2020; Ma, 2022). Com o sensoriamento remoto é possível levantar essas características, observando as resoluções (espaciais, espectrais, temporais e radiométricas) do sensor utilizado pelo sistema. Arruda et al. (2021) destacam que sensores com alta resolução temporal são mais indicados para a detecção de focos de calor; já para detectar a área afetada pela queima, são necessárias altas resoluções temporal e espacial (Szpakowski et al., 2021; Arruda et al., 2021).

Deste modo, é importante que existam ferramentas que auxiliem em planos de mitigação e prevenção de incêndios florestais (Vallejo-Villalta et al., 2019), pois, uma vez instalado o incêndio, os prejuízos podem ser catastróficos (Arruda et al., 2021; Mansoor et al., 2021). Para que essas atividades sejam eficazes, é necessário conhecer as origens dos incêndios, a cobertura florestal e as condições meteorológicas (Santos et al., 2021; Griebeler et al., 2020; Mansoor et al., 2021).

O uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) permite a aquisição de mapas com maior agilidade e precisão ao cruzar diversos tipos de dados (Vallejo-Villalta et al., 2019; Szpakowski et al., 2021), sendo considerado um instrumento de baixo custo e alta eficiência, pois possibilita identificar os locais com maior probabilidade de incêndio (Camelo et al., 2020; Oliveira et al., 2020). A associação destas informações em um único banco de dados permite estimar as áreas com maior risco de incêndio, facilitando o estabelecimento de prioridades para

essas regiões e a estruturação do desenvolvimento de estratégias nos serviços de combate e prevenção de incêndios florestais (Santos et al., 2021; Szpakowski et al., 2021).

Um estudo realizado no Parque Estadual de Vila Velha, município de Ponta Grossa, estado do Paraná por Kovalsyki et al. (2020), considerou que a interação de fatores ambientais (físicos, biológicos - topográficos, meteorológicos e vegetacionais) e socioeconômicos (humanos) são base para incêndios de vegetação, onde os autores obtiveram no período estudado alta incidência de incêndios de abril a setembro, com perigo predominante dos dados em classe “muito alta” para a avaliação de perigo de incêndios (Kovalsyki et al., 2020). Na área de Transição Cerrado-Amazônia, na Ilha do Bananal/Tocantins, a pesquisa de Aragão et al. (2023) observou um comportamento homogêneo em toda a área. Resultados semelhantes também foram observados em outros ambientes do Cerrado e da Mata Atlântica, descritos nos estudos de Sant’Ana et al. (2021) e de Lacerda et al. (2022).

2.7 Mudanças Climáticas

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), em seu sexto relatório de avaliação, lançado em agosto de 2021, destaca um cenário de atenção às mudanças climáticas e aos seus impactos, caso as emissões de gases de efeito estufa não diminuam. O grupo de trabalho II, que compõe o sexto relatório, indica que haverá impactos de maior intensidade relacionados às mudanças climáticas, bem como riscos futuros, o que aumenta o risco global de episódios extremos de incêndios florestais (IPCC, 2022).

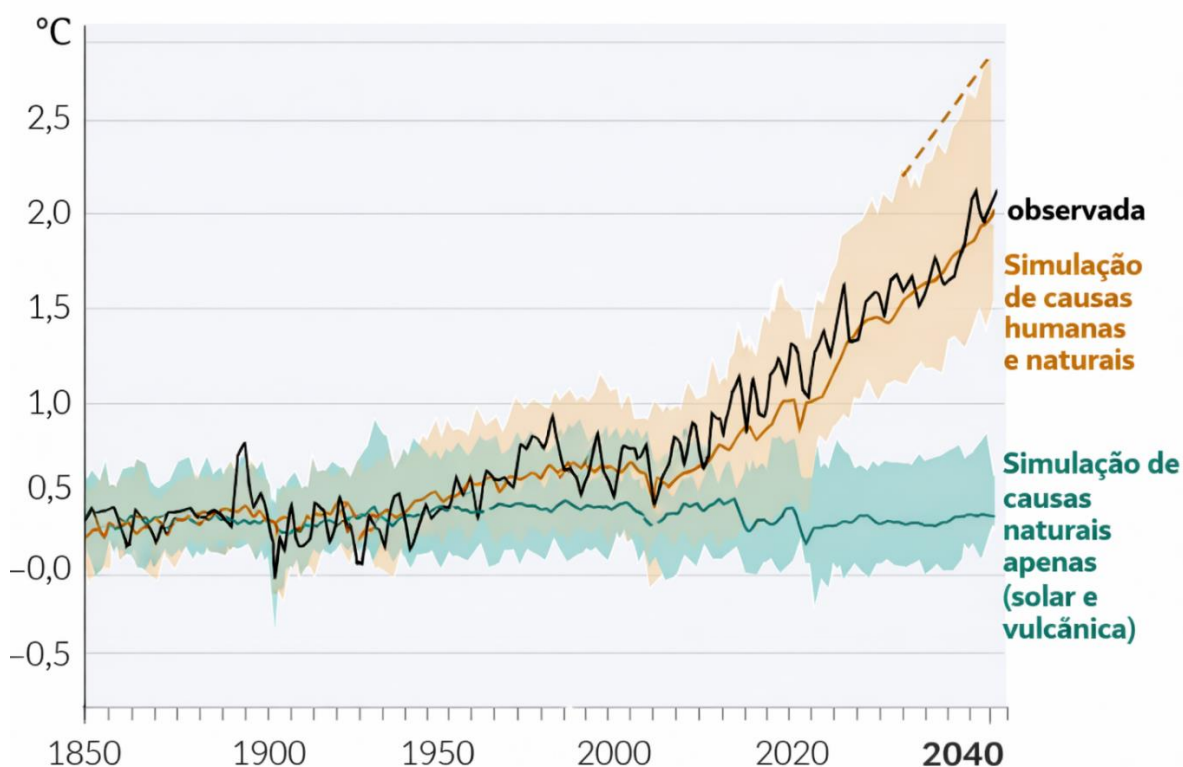
Ao longo do século, o relatório demonstra que ocorrerão eventos anticiclônicos e ventos ainda mais quentes, o que ocasionará um acréscimo potencial de eventos de incêndio (Duane et al., 2019), pois as condições das variáveis meteorológicas são consideradas fator principal na propagação do fogo e os padrões de incêndio apresentam elevada sensibilidade à variabilidade climática regional (Da Silva et al., 2019; Eugenio et al., 2019). Além de alertar sobre o crescente perigo de incêndios, destaca a necessidade de avaliar a viabilidade, a eficácia e o potencial de diversas medidas de adequação para mitigar os riscos climáticos associados a eventos de seca, calor extremo, inundações e incêndios e alcançar melhores resultados, como a equidade social, a adaptação baseada em ecossistemas e a implementação de novas tecnologias (IPCC, 2022).

As variações climáticas já vêm produzindo perturbações em escala mundial, com um aquecimento de 1,1 °C, secas e inundações recorde e calor extremo em diferentes partes do globo terrestre, o que promove alterações na dinâmica de todo o ecossistema (Cammelli et al., 2020). Atualmente, populações já enfrentam crise hídrica em determinados períodos do ano, e

incêndios florestais estão atingindo áreas cada vez mais extensas, provocando alterações na paisagem (Cammelli et al., 2020; Li et al., 2020; Mansoor et al., 2022).

Para o IPCC, os gases de efeito estufa (GEE) presentes na atmosfera e a tendência de aumento das emissões levarão à ocorrência de impactos climáticos expressivos até 2040, e o aquecimento global colocará em risco a saúde, a segurança alimentar e a extinção de espécies (IPCC, 2022; Mansoor et al., 2022). Neste período, haverá maior frequência de temperaturas mais elevadas, conforme apresentado na Figura 7, o que, consequentemente, contribuirá para a ocorrência de incêndios (IPCC, 2021).

Figura 7. Temperatura da superfície global (média anual) observada e simulada, considerando fatores humanos e naturais (1850 - 2040)



Fonte: IPCC (2021)

O Acordo de Paris, firmado em 2015, estabeleceu como meta global limitar o aumento da temperatura média do planeta a bem menos de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para não ultrapassar 1,5 °C (ONU, 2015). Essa condição foi reconhecida como essencial para mitigar os riscos mais graves das mudanças climáticas, como eventos extremos, perda de ecossistemas e impactos sociais severos (BRASIL, 2017). O IPCC (2022) alerta que o aumento da temperatura média global em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais já representa riscos graves para ecossistemas, sociedades e economias. Esse limite é considerado crítico porque, mesmo abaixo de 2 °C, os impactos sobre a biodiversidade, a

segurança alimentar, a saúde pública e os eventos extremos se intensificam significativamente. As projeções climáticas indicam que, caso o aquecimento ultrapasse esse limite, haverá maior probabilidade de tempestades intensas, secas prolongadas e ondas de calor mais duradouras, resultando na perda de cobertura florestal e no aumento do risco de múltiplas catástrofes concentradas em uma mesma região (Vallejo-Villalta et al., 2019; Xu et al., 2020; Mansoor et al., 2022).

O Brasil é considerado um dos países com maior vulnerabilidade e que podem ser fortemente impactados, caso se concretizem as projeções de mudanças climáticas (Xu et al., 2020). Em um panorama pessimista, as regiões tropicais serão as mais afetadas, promovendo modificações na variabilidade interanual da precipitação, na temperatura do ar e na umidade do solo (Xu et al., 2020; Vicente-Serrano et al., 2020), e na região de transição Cerrado-Amazônia, pode haver um agravamento pela expansão de áreas agrícolas (Marques et al., 2020; Xu et al., 2020) com aumento do perigo de incêndios devido às condições meteorológicas (temperaturas mais altas, umidade relativa mais baixa e mudanças nos regimes de precipitação) que podem afetar e colocar em risco a produção agrícola e a subsistência dos agricultores.

Diversos estudos têm abordado as mudanças climáticas em diferentes escalas, bem como o perigo de incêndios e as condições meteorológicas que podem comprometer a vegetação em distintas regiões do globo. Entre eles destacam-se as pesquisas de Campanharo et al. (2019), Vicente-Serrano et al. (2020), Xu et al. (2020), Azevedo-Ramos et al. (2020), Carvalho et al. (2020), Oliveira et al. (2020), Cammelli et al. (2020), Li et al. (2020) e Kelley et al. (2021).

O trabalho de Mansoor et al. (2022) avaliou a elevação das frequências de incêndios florestais em relação às mudanças climáticas em escala global, afirmando que o planeta vem sofrendo imensa pressão devido às atividades antrópicas e que, desde 1984, a ocorrência de incêndios florestais dobrou, estando estes relacionados ao aquecimento global. Mansoor et al. (2021), ao analisar a elevação das frequências de incêndios florestais em relação às mudanças climáticas, concluíram que o planeta vem sofrendo uma grande pressão decorrente das atividades antrópicas, fator que contribui para o aquecimento global e para as mudanças climáticas, entre as quais os incêndios florestais são um dos principais resultados. Os autores destacam, ainda, que, devido à maior frequência desses incêndios, a vegetação em todo o planeta vem passando por uma ampla perturbação.

Nesse sentido, adotar medidas preventivas para reduzir os riscos de incêndios florestais, como uma gestão eficiente do uso do solo, investimentos em capacitação das equipes que atuam no combate aos incêndios, bem como políticas públicas de prevenção, tanto em áreas rurais

quanto urbanas, podem se configurar como medidas eficazes na minimização dos impactos climáticos globais (Xu et al., 2020; Vicente-Serrano et al., 2020; Mansoor et al., 2021).

2.8 Modelo Climático HadGEM3-GC31-LL no contexto do CMIP6 e Cenários Futuros

A sexta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6) difere das fases anteriores e foi estruturada como um conjunto descentralizado de experimentos, reunindo mais de uma centena de modelos climáticos globais, desenvolvidos por cerca de 50 instituições internacionais, que são utilizados para simular o clima passado, presente e futuro sob diferentes cenários socioeconômicos e de forçante radiativa.

O CMIP6 não é um conjunto estático de modelos, mas sim uma infraestrutura de colaboração internacional coordenada pelo Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP). De acordo com Eyring et al. (2016), o projeto da fase 6 foi estruturado em torno de um núcleo comum de experimentos (*DECK - Design, Evaluation, and Characterization of Klima*) e de 23 Projetos de Intercomparação de Modelos Específicos (MIPs), cada um focado em diferentes aspectos do sistema terrestre, como o ciclo do carbono, os aerossóis e o uso da terra.

O CMIP6 possui um conjunto de projeções climáticas, composto por mais de 100 modelos climáticos globais, sendo classificados em duas categorias, sendo os Modelos Climáticos Globais (GCMs - *Global Climate Models*) que focam na física da atmosfera e do oceano, como o HadGEM3-GC31-LL e os Modelos de Sistema Terrestre (ESMs- *Earth System Models*) que incorporam processos biológicos e químicos complexos, como o ciclo do nitrogênio e o crescimento interativo da vegetação, como exemplo, menciona-se o UKESM1-0-LL, ambos são modelos desenvolvidos pelo *Met Office Hadley Centre*, no Reino Unido. Entretanto, a inclusão em massa de ESMs no CMIP6 permitiu uma avaliação mais precisa dos *feedbacks* entre o clima e a biosfera (IPCC, 2021).

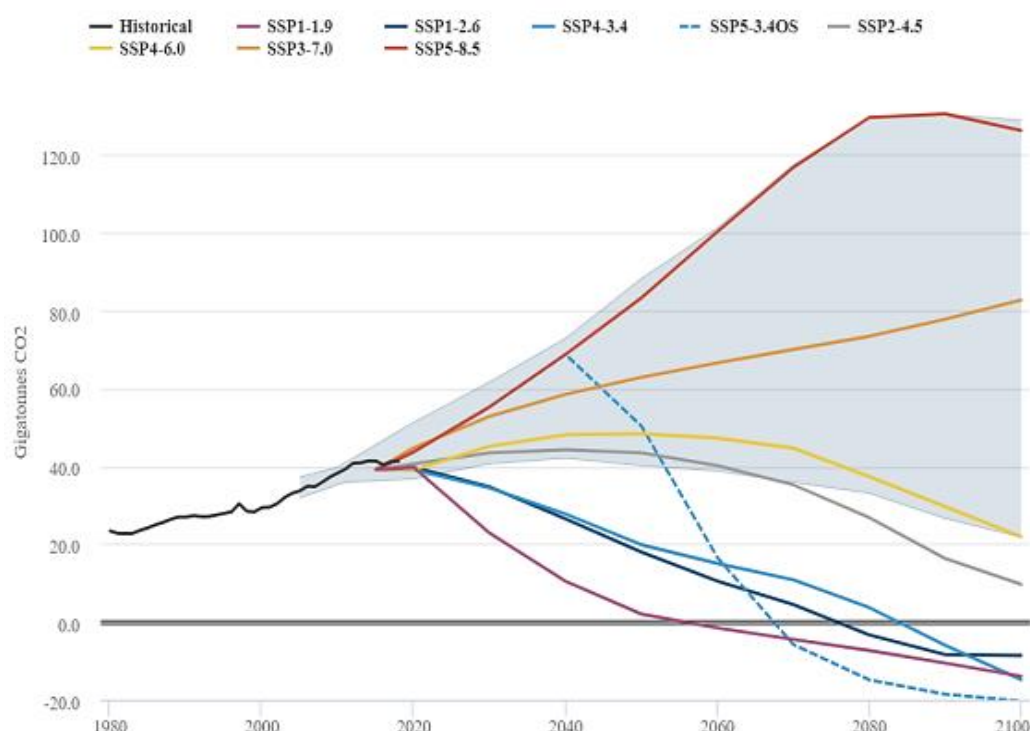
Esses modelos variam quanto à resolução, aos esquemas físicos e aos componentes biogeoquímicos. Cerca de 40 centros de modelagem globais de aproximadamente 20 países (incluindo o Reino Unido, com o HadGEM3-GC31-LL, os EUA, com o CESM, e a China, com o FGOALS), contribuíram com dados (IPCC, 2021). Esta diversidade é significativamente superior à do CMIP5, que contava com aproximadamente 40 modelos, distribuídos em 20 grupos de pesquisa. O aumento no CMIP6 permitiu o que os cientistas chamam de "*Multi-Model Ensemble*", uma abordagem estatística que utiliza a média de vários modelos para reduzir as incertezas individuais de cada simulação (Tebaldi et al., 2021).

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) introduziu uma mudança importante na modelagem climática global

ao incorporar os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs - *Shared Socio-economic Pathways*). Ao contrário dos relatórios anteriores, os SSPs apresentam uma estrutura que incorpora dimensões socioeconômicas do desenvolvimento humano, como educação, crescimento populacional e avanços tecnológicos, articuladas às trajetórias de forçante radiativa, que influenciarão as emissões e os esforços de mitigação até 2100, possibilitando uma análise mais abrangente e integrada das incertezas associadas aos cenários futuros (O'Neil et al., 2016).

Os cenários climáticos no CMIP6 são estruturados a partir dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs), que combinam trajetórias socioeconômicas com diferentes níveis de forçante radiativa ao final do século XXI. Esses cenários incluem o SSP1-1.9 e o SSP1-2.6, associados a trajetórias de desenvolvimento sustentável e baixas emissões de gases de efeito estufa; o SSP2-4.5, que representa um cenário intermediário de continuidade das tendências socioeconômicas atuais; o SSP3-7.0, caracterizado por elevada fragmentação regional e altas emissões; e o SSP5-8.5, que reflete um cenário de desenvolvimento intensivo em combustíveis fósseis e elevadas emissões (Figura 8). Associadamente, esses cenários fornecem uma base robusta para a avaliação das respostas do sistema climático global e dos impactos futuros associados às mudanças climáticas, incluindo o aumento do risco de eventos extremos, como incêndios florestais (IPCC, 2021).

Figura 8. Emissões de CO₂ em gigatoneladas dos cenários SSPs do CMIP6/IPCC-AR6



Fonte: IPCC (2021)

No contexto do CMIP6, esses cenários fornecem base para as projeções climáticas modernas e desempenham papel fundamental na projeção do balanço de gases de efeito estufa (GEE), sendo organizados em diferentes níveis de forçante radiativa. Para atingir essas metas, este cenário necessita da implementação de Tecnologias de Emissão Negativa (NETs), como a captura e armazenamento de carbono (CCS) e a Bioenergia com Captura de Carbono (BECCS), com o objetivo de remover o dióxido de carbono (CO_2) já existente na atmosfera (Fuss et al., 2018; Rogelj et al., 2018).

O cenário SSP1-2.6 corresponde à trajetória de sustentabilidade, na qual a cooperação global possibilita a definição de um limite de aquecimento de 2°C . No entanto, os cenários SSP2-4.5 e SSP-8.5 apresentam um caminho intermediário de desenvolvimento histórico, com alta dependência de combustíveis fósseis e crescimento acelerado (Riahi et al., 2017; Riahi et al., 2021). No cenário SSP5-8.5, a falta de políticas climáticas eficazes resulta em uma forçante radiativa de $8,5 \text{ W/m}^2$ até o fim do século XXI (Tabela 9), caracterizando o limite superior de risco para os ecossistemas tropicais (Lapola et al., 2023).

Tabela 9. Cenários, narrativas e emissões negativas nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5

Cenário	Forçante Radiativa (2100)	Narrativa Socioeconômica	Papel das Emissões Negativas

SSP1-2.6	2,6 W m ⁻²	Desenvolvimento sustentável: foco em energias renováveis e em baixo consumo de materiais.	Essencial: requer a efetivação, em larga escala, da remoção de CO ₂ para manter o aquecimento abaixo de 2 °C.
SSP2-4.5	4,5 W m ⁻²	Caminho intermediário: tendências históricas de desenvolvimento persistem; redução moderada das emissões.	Complementar: utiliza a captura de carbono para estabilizar as emissões na segunda metade do século.
SSP5-8.5	8,5 W m ⁻²	Desenvolvimento via combustíveis fósseis: crescimento econômico.	Complementar: utiliza a captura de carbono para estabilizar as emissões na segunda metade do século.

Fonte: Adaptado do IPCC (2022)

A integração dos modelos de circulação geral do CMIP6, como o HadGEM3-GC31-LL (Sellar et al., 2019), com os cenários socioeconômicos compartilhados (SSPs) permite uma análise bem fundamentada das trajetórias climáticas (Williams et al., 2018; Brando, 2020). Enquanto o cenário SSP1-2.6 pressupõe a implementação de tecnologias de emissões negativas para estabilizar o balanço de carbono global (Fuss et al., 2018; Riahi et al., 2021), o cenário SSP5-8.5 projeta um aquecimento crítico baseado em combustíveis fósseis. Para a região de transição Cerrado-Amazônia, tais projeções indicam alterações severas nos regimes de fogo (Brando et al., 2020; Nóbrega et al., 2023).

Na simulação dessas complexas interações, o modelo de Sistema terrestre HadGEM3-GC31-LL (*Hadley Centre Global Environmental Model version 3 - Global Configuration 3.1 - Low Resolution*) desenvolvido pelo *Met Office Hadley Centre*, do Reino Unido, com o sufixo LL (Baixa resolução) indica que tanto a atmosfera quanto o oceano operam em resoluções que, embora chamadas de "baixas" no contexto global, oferecem um equilíbrio ideal entre custo computacional e precisão para simulações de longo prazo. Considerado um dos pilares do CMIP6, é amplamente reconhecido por sua alta sensibilidade climática e representação avançada de processos biogeoquímicos, apresentando uma Sensibilidade Climática de Equilíbrio (ECS) superior a 5 °C, o que o torna mais elevado do que seus predecessores, o que significa que o modelo projeta aquecimentos mais intensos em resposta ao aumento das concentrações de CO₂ (Williams et al., 2018; Andrews et al., 2019).

Os Modelos Climáticos Globais (GCM) apresentam comportamentos distintos conforme o tipo de clima (Li et al., 2022). Nesse sentido, adotar um modelo consensual é uma alternativa para reduzir as incertezas decorrentes das projeções futuras (Fan et al., 2020). O modelo HadGEM3-GC31-LL (*Hadley Centre Global Environmental Model*), em suas

configurações de *Earth System* (ES), representa um avanço significativo na simulação de processos biogeoquímicos. Ao contrário de modelos atmosféricos simples, as versões "ES" (como o HadGEM3-GC31-LL) acoplam o ciclo do carbono, a dinâmica da vegetação e a química atmosférica de forma interativa. Desta forma, o modelo GCM do HadGEM3-GC31-LL apresenta boa capacidade de simulação climática em diversos locais do mundo (Babaousmail et al., 2021), na América do Sul (Fan et al., 2020), na Amazônia (Brando et al., 2020; Bultan, 2025), em áreas semiáridas e áridas e no Nordeste brasileiro (Dantas et al., 2022).

Para a América do Sul, resume-se a projeções com maior capacidade de capturar eventos extremos de seca e ondas de calor, variáveis consideradas os principais estímulos meteorológicos para incêndios florestais (Fan et al., 2020). Na região de transição Cerrado-Amazônia, essa sensibilidade tem particular importância. A sinergia entre o desmatamento local e as alterações climáticas globais projetadas pelo CMIP6 pode acelerar a degradação das florestas e modificar drasticamente os regimes de incêndio (Lapola et al., 2023). A interface entre os biomas é altamente vulnerável ao estresse hídrico (Flores et al., 2024), em que a frequência e a intensidade dos incêndios florestais tornam-se mecanismos de retroalimentação, podendo levar o sistema a um “ponto de não retorno” biológico (Brando et al., 2020).

2.9 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Diego Freire *et al.* Performance of the FMA+ forest fire hazard index for the Serra do Tombador Natural Reserve, Goiás, Brazil. **Floresta**, v. 52, n. 4, p. 484–491, 2022. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/80322/47149>. Acesso em: 27 mar. 2024.

AMERICO, Núria *et al.* Avaliação da inflamabilidade de espécies vegetais do Cerrado. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 9, n. 2, p. 187–191, 2021. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/10479>. Acesso em: 15 mar. 2023.

ANDREWS Timothy *et al.* Forcings, Feedbacks, and Climate Sensitivity in HadGEM3-GC3.1 and UKESM1. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 12, p. 4377–4394, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2019MS001866>. Acesso em: 30 mar. 2024.

ANGELINI, Lucas Peres *et al.* Surface Albedo and Temperature Models for Surface Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration Using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil. **Sensors**, v. 21, n. 21, p. 7196, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/21/7196> Acesso em: 25 mar. 2024.

ARAGÃO, Mariana de Aquino *et al.* Risk of forest fires occurrence on a transition island, Amazon-Cerrado: Where to act? **Forest Ecology and Management**, v. 536, p. 120858, 2023.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112723000919>
Acesso em: 25 mar. 2024.

ARAÚJO, Igor *et al.* Trees at the Amazonia-Cerrado transition are approaching high temperature thresholds. *Environmental Research Letters*. v. 16, n.316, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abe3b9>. Acesso em: 23 set. 2025

ARRUDA, Vera Laísa da Silva *et al.* An alternative approach for mapping burn scars using Landsat imagery, Google Earth Engine, and Deep Learning in the Brazilian Savanna. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100472, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000082?via%3Dihub>. Acesso em: 25 mar. 2024.

AZEVEDO-RAMOS, Claudia *et al.* Lawless land in no man's land: The undesignated public forests in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 99, n. C, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837720302180>. Acesso em: 25 mar. 2024.

BABAOUSMAIL, Hassen *et al.* Evaluation of the Performance of CMIP6 Models in Reproducing Rainfall Patterns over North Africa. **Atmosphere**, v. 12, n. 4, p. 475, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/4/475>. Acesso em: 25 mar. 2024.

BARLOW, Jos *et al.* Clarifying Amazonia's burning crisis. **Global Change Biology**, v. 26, n. 2, p. 319–321, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.14872>
Acesso em: 25 mar. 2024.

BARNI, Paulo Eduardo *et al.* Logging Amazon forest increased the severity and spread of fires during the 2015–2016 El Niño. **Forest Ecology and Management**, v. 500, p. 119652, 15 nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721007428>. Acesso em: 26 mar. 2024.

BEU, Cássia Maria Leme. Avaliação da Fórmula de Monte Alegre modificada aplicada aos dados da Flona de Ipanema, MERRA-2 e produtos de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 857–878, 2022. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/15774/9135>. Acesso em: 10 abr. 2024.

BEUTLING, Alexandre. **Caracterização para modelagem de material combustível superficial em reflorestamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 126p. 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/1659>. Acesso em: 05 mar. 2026.

BEUTLING, Alexandre; BATISTA, Antonio. Protocolo para avaliação de retardantes químicos. *Biodiversidade Brasileira*. V.9 n.1, 2019. Disponível em: <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/index.php/BioBR/article/view/975>. Acesso em: 26 nov. 2024.

BIAZATTI, Leonardo Duarte *et al.* Influência do Uso e Ocupação da Terra no Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 16, n. 4, p. 155–160, 2020. Disponível em: <https://acsa.revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/1306/pdf>. Acesso em: 26

abr. 2024.

BIAZATTI, Leonardo Duarte *et al.* Mapping the risk of forest fires in the Rio Preto National Forest in the Atlantic Forest. **Floresta**, v. 51, n. 4, p. 1062–1072, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/76806/44844>. Acesso em: 26 abr. 2024.

Bradshaw, Larry S *et al.* The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. General Technical Report INT-169. Ogden, UT: U.S. **Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station**. 44 p., v. 169, 1984. Disponível em: <https://research.fs.usda.gov/treearch/29615>. Acesso em: 26 abr. 2024

BRANDO, Paulo Monteiro *et al.* The gathering firestorm in southern Amazonia. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 736–741, 2020. Disponível em: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aay1632>. Acesso em: 20 dez. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017**. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 de dezembro de 2015. Brasília, DF: Presidência da República, 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm. Acesso em: 12 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 13 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024**. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo; e altera as Leis nºs 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, 9.433, de 8 de janeiro de 1997, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 9.985, de 18 de julho de 2000, 10.410, de 11 de janeiro de 2002, 11.952, de 25 de junho de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012, e 13.021, de 8 de agosto de 2014. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14944.htm. Acesso em: 13 mar. 2026.

BROWN, James Kenneth; OBERHEU, Rick D; JOHNSTON, Cameron M. **Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West**. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/29401>. Acesso em: 27 jan. 2024.

BULTAN, Selma *et al.* Amazon forest faces severe decline under the dual pressures of anthropogenic climate change and land-use change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 122, n. 50, p. e2418813122, 2025. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2418813122>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CACHOEIRA, Jader Nunes *et al.* Predição das variáveis do comportamento do fogo em Cerrado sensu stricto no sul do Tocantins. **Avanços na Ciência Florestal**, v. 7, n. 2, p. 939–

946, 2020. Disponível em:

<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/6854>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CAMARGO, Ângelo Paes de; SENTELHAS, Paulo César. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5\(1\)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5(1)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf). Acesso em: 13 nov. 2025.

CAMARGO, Leandro de Souza. *et al.* Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Incêndios Florestais do Município de Petrópolis. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 1, p. 630–641, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/30831/17433>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CAMELO, Ana Paula Silva; SANCHES, Keila; NAKAGOMI, Bruno. Zoneamento de incêndios florestais na Estação Ecológica Águas Emendadas, Distrito Federal (Brasil). **Territorium**, n. 27(II), p. 67–79, 2020. Disponível em: https://impactum-journals.uc.pt/territorium/article/view/1647-7723_27-2_6/6646. Acesso em: 13 nov. 2025.

CAMMELLI, Federico *et al.* Fire risk perpetuates poverty and fire use among Amazonian smallholders. **Global Environmental Change**, v. 63, p. 102096, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378019307733>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CAMMELLI, Federico; ANGELSEN, Arild. Amazonian farmers' response to fire policies and climate change. **Ecological Economics**, v. 165, n. C, p. 1–1, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800918308632>. Acesso em: 13 nov. 2024.

CAMMELLI, Federico; COUDEL, Emilie; DE FREITAS Navegantes Alves, Livia. Smallholders' Perceptions of Fire in the Brazilian Amazon: Exploring Implications for Governance Arrangements. **Human Ecology**, v. 47, n. 4, p. 601–612, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10745-019-00096-6>. Acesso em: 10 mai. 2024.

CAMPANHARO, Wesley A. *et al.* Translating Fire Impacts in Southwestern Amazonia into Economic Costs. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 764, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/7/764>. Acesso em: 10 mai. 2024.

CANZIAN, Weslen Pintor *et al.* Análise de causa e influência de elementos meteorológicos em ocorrências de incêndios em florestas de produção. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 835–844, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/T8xfZTrK3TkGschC9YYkMGH/?lang=pt> Acesso em: 15 mar. 2024.

CARVALHO, Elildo Alves Ribeiro *et al.* Effects of illegal logging on Amazonian medium and large-sized terrestrial vertebrates. **Forest Ecology and Management**, v. 466, p. 118105, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037811272030080>. Acesso em: 15 mar. 2024.

CARVALHO, Nathália S. *et al.* Spatio-temporal variation in dry season determines the Amazonian fire calendar. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 12, p. 125009, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac3aa3/pdf> Acesso em: 15 mar. 2024.

CASAVECCHIA, Bruno Henrique *et al.* Índices de perigo de incêndios em uma área de transição Cerrado-Amazônia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, p. 842–854, 2019. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/17756/14465> Acesso em: 15 mar. 2024.

CAVALCANTE, Rosane B. L. *et al.* Assessment of fire hazard weather indices in the eastern Amazon: a case study for different land uses. **Acta Amazonica**, v. 51, p. 352–362, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/cNvt5k4w5dJrrbX6zSGrmFb/?format=pdf&lang=en> Acesso em: 10 abr. 2023.

CHADWICK, Robin *et al.* Separating the Influences of Land Warming, the Direct CO₂ Effect, the Plant Physiological Effect, and SST Warming on Regional Precipitation Changes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 2, p. 624–640, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018JD029423>. Acesso em: 15 set. 2023.

CHANDLER, Tony John. The Changing Form of London's Heat-island. **Geography**, v. 46, n. 4, p. 295–307, 1961. Disponível em: https://urban-climate.org/wp-content/uploads/2023/10/Chandler_etal_1970_wmo_276_en.pdf Acesso em: 15 jun. 2023.

CIESIELSKI, Mariusz *et al.* Contribution of anthropogenic, vegetation, and topographic features to forest fire occurrence in Poland. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 15, n. 4, p. 307, 2022. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/pdf/?id=ifor4052-015>. Acesso em: 15 mar. 2024.

COUTINHO, Maria Janiele Ferreira *et al.* Crescimento e produção do capim massai sob déficit hídrico / Growth and production of grass massai under water deficit. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 35690–35700, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/11374/9487>. Acesso em: 15 mar. 2025.

COSTA, Renan *et al.* Análise dos focos de calor no estado do Pará no período de 2016 a 2019. **Research, Society and Development. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**. v. 11, n. 6, p. e31611625793, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/25793>. Acesso em: 11 mar. 2026.

DA SILVA, Antonio Samuel Alves *et al.* Comparison of Interpolation Methods for Spatial Distribution of Monthly Precipitation in the State of Pernambuco, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 3, p. 04018068, 2019. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.000175>. Acesso em: 05 abr. 2024.

LEMOS, Natasha Sousa Araujo; CUNHA, José Mauricio. Projected changes in the fire danger over the Brazilian Amazon and Cerrado biomes based on CMIP6 models.

International Journal of Climatology, v. 42, n. 16, p. 8234-8249, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/mrQ6GQ5HVNxR558FPPQFrDk/?lang=en>. Acesso em: 20 dez. 2025.

DANTAS, M. P. et al. Projected changes in the fire danger over the Brazilian Amazon and Cerrado biomes based on CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8234-8249, 2022. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/joc.7725>. Acesso em: 20 dez. 2025.

DELGADO, Rafael Coll et al. Assessment of a new fire risk index for the Atlantic Forest, Brazil. **Forests**, v.13, n.11, 1844, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/11/1844>. Acesso em: 1 set. 2025.

DE ANDRADE, Caio F. *et al.* Fire regime in Southern Brazil driven by atmospheric variation and vegetation cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 295, p. 108-194, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192320302963>. Acesso em: 20 dez. 2025.

DE SALES, Fernando *et al.* Impacts of Protected Area Deforestation on Dry-Season Regional Climate in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 16, p. e2020JD033048, 2020. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020JD033048>. Acesso em: 20 out. 2024.

DENNING, Scott. Southeast Amazonia is no longer a carbon sink. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 354–355, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34262216/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

DERECZYNSKI, Claudine *et al.* Downscaling of climate extremes over South America – Part I: Model evaluation in the reference climate. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, p. 100273, 2020. Disponível em: <https://http://www.elsevier.com/locate/wace>. Acesso em: 20 mar. 2024.

DIEL, Debora *et al.* Distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas de cultivos exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 639–647, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/PBy4dD4LGLp3JSRHY3G3Pps/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 20 dez. 2024.

DUANE, Andrea *et al.* Adapting prescribed burns to future climate change in Mediterranean landscapes. **Science of The Total Environment**, v. 677, p. 68–83, 10 ago. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971931890X?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2025.

DUANE, Andrea; CASTELLNOU, Marc; BROTONS, Luís. Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events. **Climatic Change**, v. 165, n. 3, p. 43, 5 abr. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-021-03066-4>. Acesso em: 13 nov. 2025.

EUGENIO, F. C. *et al.* Space-time distribution of fire foci and risk mapping for the state of Mato Grosso, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 6, p. 1-13, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/10661/articles?filter-by-volume=191&sortBy=oldestFirst&filterOpenAccess=false&IFA=&page=2>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ELLWANGER, Joel Henrique *et al.* Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, p. e20191375, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/fRVhxyPq4NLCsK TZPJMzV8J/?lang=en&format=pdf>. Acesso em: 28 abr. 2024.

EYRING, Veronika *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/gmd-9-1937-2016.html>. Acesso em: 20 dez. 2025.

FAN, Xuewei *et al.* Evaluation of CMIP6 models in simulating the statistics of extreme precipitation: A comparison with CMIP5. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105031, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/getaccess/pii/S0169809520302209/purchase>. Acesso em: 20 dez. 2025.

FERRANTE, Lucas; FEARNSIDE, Philip Martin. The Amazon's road to deforestation. **Science**, v. 369, n. 6504, p. 634, 2020. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abd6977>. Acesso em: 20 dez. 2025.

FERREIRA FILHO, João Eufrásio; ARAÚJO, Alexandre Costa. Análise de Ocorrências de Incêndios Florestais na área do Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza, CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 563–569, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/43gxJSZsT3wCdCpfZzBThJS/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 20 dez. 2024.

FIEDLER, Nilton César *et al.* Firefighting combat with fire retardants at different concentrations. **Floresta**, v. 50, n. 1, p. 1107–1112, 2020a. Disponível em: <https://www.cabidigitalibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203499755>. Acesso em: 20 abr. 2023.

FIEDLER Nilton César *et al.* Métodos de detecção e técnicas de combate aos incêndios florestais. In: Fiedler NC, Sant'Anna C de M, Ramalho AHC (eds.), **Incêndios Florestais**, 1ª. ed. UFES, Jeronimo Monteiro - ES, Capítulo 14, p. 84–107, 2020b.

FIEDLER Nilton César, SANT'ANNA Clovis de Melo, TEDALDI Ana Luiza, et al. Causas e classificação dos incêndios florestais. In: Fiedler NC, Sant'Anna C de M, Ramalho AHC (eds.). **Incêndios Florestais**. 1ª. ed. UFES, Jeronimo Monteiro - ES, capítulo 6, p.30–35, 2020c.

Mariana de Aquino Aragão, Nilton Cesar Fiedler, Antonio Henrique Cordeiro Ramalho, FLANNIGAN, Mike D. *et al.* Implications of changing climate for global wildland fire. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, n. 5, p. 483–507, 2009. Disponível em: <https://connectsci.au/wf/article-abstract/18/5/483/23220/Implications-of-changing-climate-for-global?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 20 out. 2024.

FLORES, Bernado Montoya et al. Transições críticas no sistema florestal amazônico. **Nature**, 626, 555–564. 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06970-0#:~:text=For%2065%20million%20years%2C%20Amazonian,parts%20of%20the%20system1>. Acesso em: 10 mar. 2025.

MORELLO, Thiago Fonseca *et al.* Predicting fires for policy making: Improving accuracy of fire brigade allocation in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, v. 169, p. 106501, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800918312023>. Acesso em: 20 out. 2024.

FRANÇA, Carlos David Veiga *et al.* Modelo espacial de risco de incêndio intraurbano: fatores de população e carga de incêndio. **Territorium**, n. 27(II), p. 81–91, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/aqlsb/Downloads/Dialnet-ModeloEspacialDeRiscoDeIncendioIntraurbano-10102353.pdf>. Acesso em: 20 out. 2024.

FUSS, Sabine *et al.* Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 063002, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f/pdf>. Acesso em: 20 dez. 2023.

GHORBANZADEH, Omid *et al.* Forest fire susceptibility and risk mapping using social/infrastructural vulnerability and environmental variables. **Fire**, v. 2, n. 3, p. 50, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/2/3/50>. Acesso em: 20 dez. 2023.

GOMES, Letícia *et al.* Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117804, 2020a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112719315828>. Acesso em: 20 dez. 2024.

GOMES, Wesley de Brito *et al.* Water budget changes in the Amazon basin under RCP 8.5 and deforestation scenarios. **Climate Research**, v. 80, n. 2, p. 105–120, 2020b. Disponível em: <https://www.int-res.com/articles/cr2019/80/c080p105.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2024.

GONÇALVES, Darliane Mariano; DIAS, Daniela Pereira. Eficiência de cinco índices de perigo de incêndios para o município de Jataí - GO. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, 2020. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr127/2318-1222-scifor-48-127-e3362.pd>. Acesso em: 20 dez. 2024.

GRIEBELER, Adriana Maria *et al.* Caracterização quali-quantitativa do material combustível e estoque de carbono em vegetação de capoeira, Santa Maria, RS. Quali-quantitative characterization of fuel material and carbon stock in capoeira vegetation, Santa Maria, RS. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 11038–11046, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/7477/6511>. Acesso em: 20 set. 2024.

ILORI, Christopher O.; PAHLEVAN, Nima; KNUDBY, Anders. Analyzing Performances of Different Atmospheric Correction Techniques for Landsat 8: Application for Coastal Remote

Sensing. **Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 469, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/4/469>. Acesso em: 20 dez. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Focos de Queimadas e Incêndios. Disponível em: https://www.gov.br/inpe/pt-br/copy41_of_capa-principal-inpe. Acesso em: 27 jan. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento dos Focos Ativos por Estado, Região ou Bioma**: Programa Queimadas. São José dos Campos: INPE. Disponível em: https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/. Acesso em: 27 jan. 2024

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Programa BDQueimadas**. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>. Acesso em: 27 jan. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021a. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: impacts, adaptation and vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

JOHNSTON, Lynn M. *et al.* Wildland fire risk research in Canadá. **Environmental Reviews**, v. 28, n. 2, p. 164–186, jun. 2020. Disponível em: <https://cdnsiencedpub.com/doi/abs/10.1139/er-2019-0046>. Acesso em: 20 dez. 2023.

JUVANHOL, Ronie Silva. *et al.* Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. e20190726, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/pWwFwbLtJr5YxG3s5rzxHZx/?format=html&lang=en> Acesso em: 20 dez. 2023.

KELLEY, Douglas Ivan. *et al.* Technical note: Low meteorological influence found in 2019 Amazonia fires. **Biogeosciences**, v. 18, n. 3, p. 787–804, 2021. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/18/787/2021/>. Acesso em: 20 out. 2023.

KOVALSYKI, Bruna *et al.* FOREST FIRE RISK ZONING FOR THE VILA VELHA STATE PARK AND ITS SURROUNDINGS (PONTA GROSSA, PARANÁ). **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1818–1826, 29 set. 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/65974/41712>. Acesso em: 20 out. 2023.

LACERDA, Heitor Carvalho *et al.* Susceptibility to wildfire in a conservation unit located in the transition region of Cerrado and Atlantic Forest Biomes, Brazil. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 451–473, 2022a. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/bvXSGC7Dcs93RfWFXs38YFr/?lang=en>. Acesso em: 20 dez. 2023.

LAPOLA, David Montenegro *et al.* The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, n. 6630, 2023. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abp8622>. Acesso em: 20 dez. 2024.

LAWRENCE, Deborah *et al.* The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, 2022. Disponível em: www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2022.756115/full. Acesso em: 20 dez. 2025.

LECINA-DIAZ, Judit *et al.* Characterizing forest vulnerability and risk to climate-change hazards. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 19, n. 2, p. 126–133, 2021. Disponível em: https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fee.2278?utm_medium=article&utm_source=researchgate.net. Acesso em: 13 nov. 2025.

LE MOS, Natasha Sousa Araujo; CUNHA, José Mauricio. Analysis of fire risk in the Amazon: a systematic review. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, p. e2706, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/mrQ6GQ5HVNxR558FPPQFrDk/?format=html&lang=en>. Acesso em: 20 dez. 2023.

LEVIN, Kelly; WASKOW, David; GERHOLDT, Rhys. Mudanças Climáticas: veja 5 grandes resultados do relatório do IPCC. 2020. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/mudancas-climaticas-alarmanter-veja-5-grandes-resultados-do-relatorio-do-ipcc>. Acesso em: 20 dez. 2025.

LI, Xiaodong; SONG, Kaishan; LIU, Ge. Wetland Fire Scar Monitoring and Its Response to Changes of the Pantanal Wetland. **Sensors**, v. 20, n. 15, p. 4268, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/15/4268>. Acesso em: 20 dez. 2025.

LI, Fang. *et al.* Historical and projected changes in global fire weather in a warmer world. **Communications Earth & Environment**, v. 3, n. 1, p. 1–12, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/commsenv/research-articles?year=2022>. Acesso em: 20 dez. 2025.

LIBONATI, Renata dos Santos. *et al.* Twenty-first-century droughts have not increasingly exacerbated fire season severity in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 4400, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-82158-8>. Acesso em: 20 dez. 2024.

LIMA, Fillipe Tamiozzo Pereira Torres; Gumercindo Souza. Forest Fire Hazard in the Serra do Brigadeiro State Park (MG). **Forest Fire Hazard in the Serra do Brigadeiro State Park (MG)**, v. 26, n. 2, p. 0–0, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/5TFSxDrrsBNm8jhSS75ZXXf/?format=pdf&lang=en>.

Acesso em: 20 dez. 2024.

LIMA, Mayara Barbosa *et al.* Aspectos sazonais de um índice de risco de incêndios florestais na região Norte do Brasil por meio de dados meteorológicos. **Biodiversidade Brasileira**, v. 11, n. 4, p. 46–59, 2021. Disponível em: <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/index.php/BioBR/article/view/1781/1291>. Acesso em: 10 jun. 2024.

LOISELLE, Danielle *et al.* Projecting impacts of wildfire and climate change on streamflow, sediment, and organic carbon yields in a forested watershed. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125403, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420308635> Acesso em: 20 jun. 2024.

MA, Yuanfan *et al.* Emissions of gaseous pollutants released by forest fire in relation to litter fuel moisture content. **Atmospheric Environment**, v. 284, p. 119215, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231022002801>. Acesso em: 08 nov. 2023.

MACHADO, Nadja Gomes; SILVA, Francisco Carlos Paiva da; BIUDES, Marcelo Sacardi. Efeito das condições meteorológicas sobre o risco de incêndio e o número de queimadas urbanas e focos de calor em Cuiabá-MT, Brasil. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 459–469, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/11892/pdf>. Acesso em: 08 nov. 2023.

MANSOOR, Sheikh *et al.* Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113769, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721018314>. Acesso em: 20 dez. 2025.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (Coleção 10.1)**. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 14 mar. 2026.

MARENGO, Jose Antônio *et al.* Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. **Natural Hazards**, v. 116, n. 3, p. 3617–3644, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-023-05827-z?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 25 out. 2025.

MARENGO, José Antônio *et al.* Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 457, 2022. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8748735/pdf/41598_2021_Article_4241.pdf. Acesso em: 20 dez. 2024.

MARIMON, Beatriz Schwantes *et al.* Disequilibrium and hyperdynamic tree turnover at the forest–cerrado transition zone in southern Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 7, n. 1–2, p. 281–292, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17550874.2013.818072>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MARQUES, Eduardo Queiroz. *et al.* Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1501–1517, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-019-01720-z?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 10 set. 2023.

MARQUES, Rafael; SOBRINHO, Werton. Detecção das ocorrências de focos de queimadas e produção de mapas de calor em Timon, MA. **REVISTA GEONORTE**, v. 11, p. 210–228, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/342966947>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MARQUES, Juliana Fazolo *et al.* Fire dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. **Journal of Environmental Management**, v. 299, p. 113586, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721016480?via%3DiHub>. Acesso em: 15 ago. 2025

MARTIM, Charles Campoe *et al.* Coeficientes de Angstrom-Prescott e a evapotranspiração de referência na transição Cerrado-Amazônia do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/62369/40752>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MARTINS Neto, FERREIRA, Francisco. **Ciência do solo: classificação**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 208 p. 2019.

MATTHEWS, Stuart. Dead fuel moisture research: 1991–2012. **International Journal of Wildland Fire**, v. 23, n. 1, p. 78–92, 2013. Disponível em: <https://10.1071/WF13005>. Disponível em: <https://connectsci.au/wf/article/23/1/78/23503/Dead-fuel-moisture-research-1991-2012>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MAZZEO, Giuseppe *et al.* Integrated Satellite System for Fire Detection and Prioritization. **Remote Sensing**, v. 14, n. 2, p. 335, 2022. Disponível em: <https://10.3390/rs14020335>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/2/335>. Acesso em: 20 dez. 2025.

MENDES, Lourival Marin.; ARCE, Júlio. Eduardo. Análise comparativa das equações utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio da madeira. **Cerne**, Lavras, 141–152, 2003. Universidade Federal de Lavras - Lavras, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/server/api/core/bitstreams/e68f5bdb-2c15-4d8d-8d72-badf89538152/content>. Acesso em: 20 dez. 2025.

MIRANDA, Guido José Donagemma *et al.* Large fires and fire danger indices in governador indigenous territory, Maranhão State. **Floresta**, v. 52, n. 1, p. 083–092, 2022. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/78027/45607>. Acesso em: 20 dez. 2025.

MUNIZ, Francisco Gerson Lima; CARACRISTI, Isorlanda. Análise da variação da temperatura e umidade no período de pré-estação chuvosa na cidade de Sobral/CE. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e214101724780, 2021. Disponível em: <file:///C:/Users/aqlsb/Downloads/dorlivete,+e214101724780.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2025.

NASCIMENTO, Gustavo Corrêa; SENNA, Mônica Carneiro Alves. A Influência de Eventos El Niño e La Niña na Avaliação dos Riscos de Ocorrência de Incêndios no Pará. **Anuário do**

Instituto de Geociências, v. 43, n. 4, p. 189_201-189_201, 2020. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/16586/Gustavo%20Corr%c3%aa%20Nascimento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 dez. 2025.

NELSON JR., Ralph McCoy. A method for describing equilibrium moisture content of forest fuels. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, n. 4, p. 597–600, 1984. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/x84-108>. Acesso em: 20 dez. 2025.

NESTEROV, Valentin Grigorievich. Forest Fire Danger and Methods of Its Determination. USSR State **Industry Press: Goslesbunizdat, Moscow**, Russia, 1949. p. 1–76. Disponível em: https://sibran.ru/upload/medialibrary/Forest_NV.pdf. Acesso em: 20 dez. 2025.

NETO, Austecínio Lopes de Farias *et al.* Efeito do retardo na colheita na qualidade de grãos de cultivares de soja. **Nativa**, v. 10, n. 1, p. 47–53, 2022. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/12265/12656>. Acesso em: 20 dez. 2025.

NICOLAU, Andrea Puzzi *et al.* Assessing SAR C-band data to effectively distinguish modified land uses in a heavily disturbed Amazon forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 94, p. 102214, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243420302579?via%3Dihub>. Acesso em: 20 dez. 2025.

NOBRE, Carlos Afonso. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1605516113>. Acesso em: 20 dez. 2025.

NOBRE, Carlos Afonso. *et al.* Amazon Dieback Revisited: The Role of Fire and Deforestation. **Journal of Climate**, v. 29, 1991. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/37679188_Amazonian_Deforestation_and_Regional_Climate_Change. Acesso em: 20 dez. 2025.

NÓBREGA, Mauro Ricardo Roxo *et al.* Impacto das Mudanças Climáticas na Aridez da Bacia Estendida do rio São Francisco, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 38, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/TnVSFc7pLFWdnkzGXY3xQZF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 dez. 2025.

NUNES, José Renato Soares. **FMA+**: um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná – Brasil. 2005. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/39446>. Acesso em: 22 mar. 2025.

NUNES, Renato Soares; SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos. Ajuste da Fórmula de Monte Alegre alterada (FMA+) para o Estado do Paraná. **Floresta**, v. 37, n. 1, p.1-14, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/7834/5528>. Acesso em: 20 dez. 2025.

OLIVEIRA, Víncler Fernandes Ribeiro de *et al.* Geoprocessamento aplicado ao mapeamento

de risco a incêndios. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1194–1212, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/243340/35335>. Acesso em: 20 dez. 2025.

OLIVEIRA, Ubirajara *et al.* Determinants of Fire Impact in the Brazilian Biomes. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2022.735017/full>. Acesso em: 20 dez. 2025.

O'NEILL, Brian Charles *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/>. Acesso em: 20 dez. 2025.

O'NEILL, Brian Charles *et al.* The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169–180, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378015000060?via%3Dihub>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Acordo de Paris sobre o Clima. Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil – UNIC Rio, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91318-acordo-de-paris-sobre-o-clima> (brasil.un.org in Bing). Acesso em: 15 mar. 2026.

PACHECO, Abílio Pereira; RODRIGUES, José Coelho; BORGES, Jose G. Cohesive fire management within an uncertain environment: A review of risk handling and decision support systems. **Forest Ecology and Management**, v. 347, 1-17, ISSN 0378-1127, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112715001073>

PACHECO, Abílio Pereira. *et al.* Detecção de incêndios florestais por satélites. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020. p. 99–116. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228701399_Deteccao_de_Incendios_Florestais_por_Satelites. Acesso em: 20 dez. 2025.

PARREIRA, Ana Gabriela Borges *et al.* Water Balance Climatological To The County Of Rio Verde. **Científic@ - Multidisciplinary Journal**, v. 6 n. 1, p. 26-33, 2019. Disponível em: periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/cientifica/article/view/3653. Acesso em: 20 dez. 2025.

PENHA, Thales Vaz *et al.* Burned Area Detection in the Brazilian Amazon using Spectral Indices and GEOBIA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 2, p. 253–269, 2020. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/48726>. Acesso em: 20 dez. 2025.

PIMENTA, Lianne Borja *et al.* Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações (Campo Grande)**, v. 20, p. 407–420, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/czmJyn93szNcX5jfXjpPR8M/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 dez. 2025.

PINTO, Dayane Lopes *et al.* PERIODS OF HIGHEST OCCURRENCE OF FOREST FIRES IN BRAZIL. **Floresta**, v. 51, n. 2, p. 484–491, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/70286/43218>. Acesso em: 20 dez. 2025.

PIVELLO, Vânia Regina *et al.* Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 233–255, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2530064421000560>. Acesso em: 20 dez. 2025.

PREISLER, Haiganoush Krikorian *et al.* Wildland fire probabilities estimated from weather model-deduced monthly mean fire danger indices. **International Journal of Wildland Fire**, v. 17, n. 3, p. 305–316, 2008. Disponível em: <https://connectsci.au/wf/article-abstract/17/3/305/23048/Wildland-fire-probabilities-estimated-from-weather?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 20 dez. 2025.

PRUDENTE, Tatiana Diniz. **Risco integrado de incêndio florestal em áreas de Cerrado: contribuições metodológicas**. 2016. 226 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16019>. Acesso em: 5 set. 2022.

PRUDENTE, Tatiana Diniz; ROSA, Roberto. Detecção de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e área de entorno. **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 35, p. 209–221, 2010. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16162/9098>. Acesso em: 05 set. 2022.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro *et al.* Geotechnology applied to predict the risk of occurrence of fire in the Atlantic Forest. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, p. 707–720, 2020. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.001.0057>. Acesso em: 05 set. 2022.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro *et al.* Geotechnology applied to predict the risk of occurrence of fire in the Atlantic Forest. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 707–720, 2021a. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350336487_Geotechnology_applied_to_predict_the_risk_of_occurrence_of_fire_in_the_Atlantic_Forest. Acesso em: 05 set. 2022.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro *et al.* Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113122, 15 out. 2021b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721011841?via%3DiHub>. Acesso em: 05 set. 2022.

RIAH, Keywan *et al.* Cost and attainability of meeting the Paris Agreement in the context of the sixth assessment report. **Revista Nature Climate Change**, v. 11, p. 1063–1069, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01215-2>. Acesso em: 13 nov. 2025.

RIAH, Keywan *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153–168, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681>. Acesso em: 27 jan. 2026.

RIAH, Keywan *et al.* Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. **ResearchGate**, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01215-2>. Acesso em: 27 jan. 2026.

RIVERA, Juan Antonio; ARNOULD, Gabriel. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble in representing the climatology of dry spells over Central-Western South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 152, p. 1021–1038, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809519317259?via%3DiHub>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ROGELJ, Joeri. *et al.* Mitigation Pathways Compatible with 1.5 °C in the Context of Sustainable Development. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways**. Geneva: IPCC, 2018. p. 93-174. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf. Acesso em: 20 dez. 2025.

ROTHERMEL, Richard Chase. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p., v. 115, 1972. Disponível em: <https://research.fs.usda.gov/treearch/32533>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SANT'ANNA, Clovis de Melo; FIEDLER, Nilton César; RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro. Métodos de propagação dos incêndios florestais e fatores influentes. In: **Incêndios Florestais**. Fiedler, N. C.; Sant'Anna, C. de M.; Ramalho, A. H. C. (Eds.). 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020. p. 33–46.

SANT'ANNA, Clovis de Melo; RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, p. 55–64, 2020c.

SAMPAIO, Otávio Bezerra. **Análise da eficiência de quatro índices na previsão de incêndios florestais na região de Agudos - SP**. 1999. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/1884/25618>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SANNIGRAHI, Srikanta *et al.* Examining the effects of forest fire on terrestrial carbon emission and ecosystem production in India using remote sensing approaches. **Science of the Total Environment**, v. 725, p. 138331, 2020. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720318441. Acesso em: 20 dez. 2025.

SANTOS, Humberto Gonçalves *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2025.

SANTOS, Micael Moreira *et al.* Modelagem para estimativa de carga e umidade do material combustível em área de Cerrado. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, n. 1, p. 249–256, 2019. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/7398>. Acesso em: 20 dez. 2025.

SANTOS, Micael Moreira *et al.* Characterization and dynamics of surface fuel of Cerrado grassland in Jalapão region – Tocantins, Brazil. **Floresta**, v. 51, n. 1, p. 127–136, 2021. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20210067756>. Acesso em: 20 dez. 2025.

SANTOS, William de Sousa; SOUTO, Patrícia Carneiro; SOUTO, Jacob Silva. Riscos de incêndios florestais em Unidades de Conservação no bioma Mata Atlântica, Paraíba, Brasil. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 4, p. 297–304, 2018. Disponível em: <https://acsa.revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/1030/pdf>. Acesso em: 20 dez. 2024.

SARI, Fatih. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **Forest Ecology and Management**, v. 480, p. 118644, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112720314134>. Acesso em: 20 dez. 2024.

SCHUMACHER, Mauro Valdir; DICK, Grasiela. **Incêndios florestais**. 3ª ed. Rev. Santa Maria: UFSM, CCR, Departamento de Ciências Florestais, 2018. 153p. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-fluminense/gestao-da-seguranca-e-do-meio-ambiente/caderno-didatico-incendios-florestais/67708997>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SELLAR, Alistair A. *et al.* UKESM1: Description and Evaluation of the U.K. Earth System Model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 12, p. 4513–4558, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019MS001739>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVA, Claudia Arantes *et al.* Fire Occurrences and Greenhouse Gas Emissions from Deforestation in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 376, 2021a. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/3/376?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVA, Sonaira Souza da *et al.* Burning in southwestern Brazilian Amazonia, 2016-2019. **Journal of Environmental Management**, v. 286, p. 112189, 2021b. Disponível em: https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/Publicacoes-Impacto/material3os/2021_Silva_et_al_SouthwesternBrazilian_JEM_DE3os.pdf. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVA, Igor David de Barros *et al.* A Wildfire warning system applied to the state of Acre in the Brazilian Amazon. **Applied Soft Computing**, v. 89, p. 106075, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494620300156?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVA-JÚNIOR, Celso Henrique Leite *et al.* Forest Fragmentation and Fires in the Eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. **Fire**, v. 5, n. 3, p. 77, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/3/77>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVÉRIO, Divino Vicente. *et al.* Agricultural expansion dominates climate change in southeastern Amazonia. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 10, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/10/104015>. Acesso em: 20 dez. 2025.

SIMARD, Albert Joseph. Teor de umidade em combustíveis florestais - II: Comparação das variações de umidade acima do ponto de saturação das fibras entre diversos tipos de combustível. **Sistema de Intercâmbio de Pesquisa e Gestão de Incêndios**. Disponível em: <https://www.frames.gov/catalog/6209>. Acesso em: 27 jan. 2024.

SIMPSON, WILLIAM. Turner. Equilibrium Moisture Content Prediction For Wood. Chemical Equilibrium, Temperature. **Forest Products Journal**, v. 21, 48–49, 1971. Disponível: <https://www.scribd.com/document/863778220/Equilibrium-Moisture-Content-Prediction-for-Wood>. Acesso em: 27 jan. 2025.

SOARES, R. V. Desempenho da “Fórmula de Monte Alegre” índice brasileiro de perigo de incêndios florestais. **Cerne**, v. 04, n. 1, p.87-99. 1998. Disponível em: <https://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/602/512>. Acesso em: 20 set. 2024.

SOARES, Ronaldo Viana. Incêndios florestais: Controle e uso do fogo. Curitiba: **Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná**, 1985. 213p. Disponível em: Acesso em: 13 nov. 2025.

SOARES, Ronaldo Viana. Índices de perigo de incêndio. **Floresta**, v. 3, n. 3, 1972. <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/5732/4172>. Disponível em: Acesso em: 13 nov. 2025.

SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos; TETTO, Alexandre França. **Manual de prevenção e combate aos incêndios florestais**. 3. ed. Curitiba: Ed. dos Autores, 2025. Disponível em: <https://online.pubhtml5.com/ynsa/ikjv/>. Acesso em 05 março 2026.

SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos; TETTO, Alexandre França. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. 2. ed. rev. Curitiba. 2017. 255 p. Disponível em: <https://online.pubhtml5.com/ynsa/yrtg/>. Acesso em 05 março 2026.

SORIANO, Balbina Maria Araújo; DANIEL, Omar; SANTOS, Sandra Aparecida. Eficiência de índices de risco de incêndios para o Pantanal sul-mato-grossense. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 809–816, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/DWLchpQCnNdPB4xDrmShpJN/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SOUTO, Claudilene Aparecida; FREITAS, Ana Carolina Vasques; MARTINS, Guilherme. Influência das Condições Meteorológicas Atuais e Futuras na Ocorrência de Queimadas e Incêndios Florestais no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 2755–2770, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/249490/39493>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SOUZA, Adilson Pacheco de *et al.* Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 215–227, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/JCmVwSyNRGmtJsQ3STFrTVB/?lang=en>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SOUZA, Adilson Pacheco de; CASAVECCHIA, Bruno Henrique; STANGERLIN, Diego Martins. Avaliação dos riscos de ocorrência de incêndios florestais nas regiões Norte e Noroeste da Amazônia Mato-grossense. **Scientia Plena**, v. 8, n. 5, 2012. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/553/491>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SOUZA, Adilson Pacheco *et al.* Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34–43, 2013. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/1334/pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SOUZA, Michel Aquino; VALE, Ailton Teixeira. Levantamento de plantas de baixa inflamabilidade em áreas queimadas de Cerrado no Distrito Federal e análise das suas propriedades físicas. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 181–192, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/22416/pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SZPAKOWSKI, David Michael. *et al.* A study of the relationship between fire hazard and burn severity in Grand Teton National Park, USA. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 98, p. 102305, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030324342100012X?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2024.

TARIFA, Carlos Sánchez; TORRALBO, Angel Muñoz. Flame propagation along the interface between a gas and a reacting medium. **Symposium (International) on Combustion**, v. 11, n. 1, p. 533–544, 1967. Disponível em: https://oa.upm.es/6447/1/Tarifa_65.pdf. Acesso em: 13 nov. 2024.

TEBALDI, Claudia. *et al.* Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. **Earth System Dynamics**, v. 12, n. 1, p. 253–293, 2021. Disponível em: <https://esd.copernicus.org/articles/12/253/2021/>. Acesso em: 13 nov. 2024.

TELICYN, Georgiy Petrovich. Logarithmic Fire Danger Index, Lesnoy e Khozyaystvo, Rússia, v. 11 pp. 6-10. 1970.

TERRAH, Sami Mohammed. *et al.* Nonexistence of critical fuel moisture content for flammability. **Fire Safety Journal**, v. 111, p. 102928, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711219302991?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jun. 2023.

THORNTHWAITE, Charles Warren; MATHER, John Russell. **The Water Balance**. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/The_Water_Balance.html?hl=pt-BR&id=DTdtcgAACAAJ&redir_esc=y. Acesso em: 20 set. 2023.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; RIBEIRO, Guido Assunção. Índices de risco de incêndios florestais em Juiz de Fora/MG. Seropédica: **Floresta e Ambiente**, v.15 n.2, p.30-39, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/ptCgMMHQCHnfHqqhS7qVTLS/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2023.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira *et al.* Mapeamento do Risco de Incêndios Florestais Utilizando Técnicas de Geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/PTZgzwgsGYRPZf4S4pSCZqn/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 15 jun. 2023.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; SILVA JÚNIOR, Milton Ribas da; LIMA, Gumercindo Souza. Influência dos elementos meteorológicos sobre o comportamento do fogo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 1, p. 33-41, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334014>. Acesso em: 21 mar. 2026.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; RIBEIRO, Guido Assunção. Índices de risco de incêndios florestais em Juiz de Fora/MG. Seropédica: **Floresta e Ambiente**, v.15 n.2, p.30-39, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/ptCgMMHQCHnfHqqhS7qVTLS/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **The closing window: climate crisis calls for rapid transformation of societies**. Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: https://newclimate.org/sites/default/files/2022-10/egr2022_esen.pdf. Acesso em: 13 nov. 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **World atlas of desertification**. 2. ed. London: Edward Arnold, 1997. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/245955>. Acesso em: 15 set. 2023.

VALLEJO-VILLALTA, Ismael; RODRÍGUEZ-NAVAS, Estefanía; MÁRQUEZ-PÉREZ, Joaquín. Mapping Forest Fire Risk at a Local Scale—A Case Study in Andalusia (Spain). **Environments**, v. 6, n. 3, p. 30, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/6/3/30>. Acesso em: 13 nov. 2023.

VAN DER WERF, Guido Robert. *et al.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 23, p. 11707–11735, 2010. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/10/11707/2010/acp-10-11707-2010.html>. Acesso em: 13 nov. 2023.

VAN WAGNER, Charles Edward. Conteúdo de umidade em equilíbrio de alguns líquidos finos e combustíveis florestais no leste do Canadá. **Relatório de Informações, Estação Experimento da Floresta de Petawawa**, n.º PS-X-36, 1972. Disponível em: https://digitalcommons.usu.edu/aspen_bib/5370. Acesso em: 13 nov. 2023.

VAN WAGNER, Charles Edward. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System Can. For. Serv., **Forestry Tech.** Rep. 35, Ottawa. 1987. 35 p.

Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19910646918>. Acesso em: 13 nov. 2023.

VAN WAGNER, Charles Edward. **Equilibrium Moisture Contents of Some Fine Forest Fuels in Eastern Canada**. Petawawa: Estação Experimental Florestal de Petawawa, 1972. (Relatório informativo, n. PS-X-36). Disponível em: https://digitalcommons.usu.edu/aspen_bib/5370. Acesso em: 19 mar. 2023.

VETTORAZZI, Carlos Alberto; FERRAZ, S. F. B. Uso de sistemas de informações geográficas aplicados à prevenção e combate a incêndios em fragmentos florestais. **Série Técnica IPEF**, v. 12, n. 32, p. 111–115, 1998. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr32/cap11.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.

VICENTE-SERRANO, Sergio Martín *et al.* A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? **Earth-Science Reviews**, v. 201, p. 102953, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825218306421?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2023.

WILLIAMS, Keith David *et al.* The Met Office Global Environmental Model family: HadGEM3-GC31-LL -GC31. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, n. 7, p. 1547–1563, 2018. Disponível em: https://centaur.reading.ac.uk/74261/8/Williams_et_al-2018-Journal_of_Advances_in_Modeling_Earth_Systems.pdf. Acesso em: 13 nov. 2023.

WHITE, Benjamin Leonardo Alves *et al.* Caracterização do material combustível superficial no Parque Nacional Serra de Itabaiana - Sergipe, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 24, p. 699–706, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/4663>. Acesso em: 13 nov. 2023.

WHITE, Benjamin Leonardo Alves. Modelos matemáticos para a previsão do teor de umidade de materiais combustíveis florestais finos e mortos. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 432–445, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/31622>. Acesso em: 13 nov. 2023.

SIMPSON, William Tuner. Previsão do teor de umidade de equilíbrio da madeira. **Forest Products Journal**, v. 21, n. 5, p. 48–49, 1971. Disponível em: <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplrn/fplrn268.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2024.

WILLIAMS, Keith David *et al.* The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, n. 2, p. 357–380, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017MS001115>. Acesso em: 01 out. 2022.

WILLMOTT, Cort James *et al.* Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995–9005, 1985. Disponível em: <https://kus scholarworks.ku.edu/server/api/core/bitstreams/a2639bee-fbbd-4080-bfef-5d6c5e33c972/content>. Acesso em: 01 out. 2022.

WILLMOTT, Cort James. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/02723646.1981.10642213?needAccess=true>. Acesso em: 13 nov. 2022.

WU, Zechuan *et al.* Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence. **Ecological Indicators**, v. 136, p. 108653, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X22001248?via%3DiHub>. Acesso em: 13 nov. 2025.

XU, Xiyan *et al.* Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 26, n. 10, p. 5874–5885, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15279>. Acesso em: 10 dez. 2025.

XU, Kun; HUANG, Shongming; HE, Fangliang. Modeling fire hazards for the maintenance of long-term forest inventory plots in Alberta, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 513, p. 120206, 2022. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4010378. Acesso em: 13 nov. 2025.

ZAMADEI, Tamara *et al.* Radiação global e difusa diária na região de transição Cerrado-Amazônia brasileira. **Ciência e Natura**, v. 43, p. e37–e37, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/39775>. Acesso em: 13 nov. 2025.

3. ARTIGO 01: ÍNDICES DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA COM BASE EM DADOS METEOROLÓGICOS *IN SITU* E DE REANÁLISE

Artigo publicado na Forests (v. 17, n. 4, e437, 2026; <https://doi.org/10.3390/f17040437>), como parte das exigências do Regimento Interno do PPGFA

Resumo: Os índices de perigo de incêndio são fundamentais para mitigar os danos socioeconômicos e ambientais. Este estudo avaliou o desempenho dos índices Angstron, FMA, FMA+, EVAP/P e P-EVAP na região de transição Cerrado-Amazônia (2010–2022), no Brasil, utilizando dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e de reanálise (Copernicus). A eficiência dos modelos foi validada pelos métodos *Skill Score* e Porcentagem de Sucesso, correlacionando-os com os focos de calor do BDQueimadas (INPE). Os resultados revelaram sazonalidade climática típica de regiões tropicais, com verões chuvosos e invernos severamente secos, com umidade relativa do ar mínima inferior a 30%. Embora a precipitação média anual seja de 1.662,20 mm, a heterogeneidade espacial e a redução hídrica sazonal impulsionaram um aumento de 42% no número de ocorrências de fogo, totalizando 3,9 milhões de focos no período. Os índices P-EVAP e FMA+ apresentaram maior precisão preditiva, com o P-EVAP atingindo um *Skill Score* de até 0,74, especialmente com dados de reanálise. O FMA apresentou desempenho intermediário, enquanto Angstron e EVAP/P foram menos confiáveis. Regionalmente, a maior sensibilidade e precisão dos índices foram observadas no Maranhão e no Tocantins. Conclui-se que a variabilidade meteorológica regional influencia diretamente o perigo de incêndios, sendo o P-EVAP e o FMA+ os índices mais eficazes para o monitoramento e prevenção de incêndios na região.

Palavras-chave: ERA-5 Land; focos de calor; floresta tropical; savana; Brasil; clima

3.1 Introdução

A região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia no Brasil, conhecida como ecótono Cerrado-Amazônia, é a maior interface entre floresta tropical e savana do mundo. Essa área se destaca por seu mosaico ambiental complexo, resultante da interação biológica entre os biomas, e abriga uma rica biodiversidade associada a elevadas taxas de endemismo (Marimon et al., 2014; Marques et al., 2020). No entanto, essa região tem sido fortemente impactada por atividades antrópicas, sobretudo pela expansão da agropecuária.

A conversão da vegetação nativa em áreas agrícolas, a abertura de novas vias de transporte e o crescimento urbano promovem a fragmentação dos ecossistemas naturais, modificando significativamente os padrões microclimáticos locais, com elevação das temperaturas e redução da umidade relativa do ar (Brando et al., 2014; Marengo et al., 2022; Oliveira et al., 2022a; Lapola et al., 2023). Tais alterações favorecem a ocorrência e propagação de incêndios florestais, que representam uma ameaça significativa à integridade ecológica da região (Silva-Junior et al., 2022a; Tavares et al., 2022; Lima et al., 2024). Além das mudanças

ambientais decorrentes do uso da terra, as ações humanas desempenham um papel central na formação dos incêndios (Pivello, 2011), visto que podem ocorrer queimadas ilegais, utilizadas para a conversão de florestas em pastagens (Barlow et al., 2020; Libonati et al., 2021), falhas no manejo do fogo em práticas agropecuárias (Cano-Crespo et al., 2015; Salame et al., 2016) e fontes acidentais de ignição, como bitucas de cigarro descartadas inadequadamente ou faíscas provenientes de escapamentos de veículos e máquinas agrícolas, ao entrarem em contato com material combustível, podem desencadear incêndios (Silva et al., 2022; Hoki et al., 2023).

A interação entre fatores naturais e antrópicos tem resultado no aumento da frequência e da intensidade dos incêndios na região de transição Cerrado-Amazônia, comprometendo não apenas a biodiversidade local, mas também a estabilidade climática e a segurança das populações humanas que dependem desses ecossistemas (Ribeiro et al., 2024). Os incêndios florestais causam perdas significativas de serviços ecossistêmicos (Pereira et al., 2021; Roces-Díaz et al., 2022), afetando a fauna, a flora e a qualidade de vida das populações locais. Além disso, contribuem para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (Brando et al., 2014; Levin et al., 2020) e para o agravamento da poluição atmosférica (De Moura et al., 2024).

As mudanças climáticas globais também desempenham um papel determinante no regime de incêndios da região. O aumento das temperaturas médias, a intensificação dos períodos de estiagem e a redução da umidade do ar favorecem a secagem da biomassa vegetal, criando um ambiente inflamável (Torres et al., 2017; Marengo et al., 2022; Ribeiro et al., 2024). A ocorrência de incêndios na região está diretamente relacionada a variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação, que influenciam a inflamabilidade do material combustível (Pinto et al., 2021; Souto; Freitas; Martins, 2021). Durante a estação seca, a redução da umidade do solo e da vegetação favorece a propagação das chamas, e eventos climáticos extremos, como os períodos de seca associados ao fenômeno El Niño, ampliam ainda mais os riscos (De Andrade et al., 2020; Singh; Zhu, 2021; Barni et al., 2021; Aragão et al., 2023).

Os incêndios impactam o cumprimento de vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), definidos na Agenda 2030, principalmente o ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima, pois o aumento das emissões de gases de efeito estufa intensifica as mudanças climáticas e provoca degradação ambiental e perda de biodiversidade, agravando os ecossistemas terrestres (ODS 15). Os incêndios também promovem poluição atmosférica, que afeta a saúde pública, conforme o ODS 3. Nesse sentido, a utilização de metodologias de predição, como índices de perigo de incêndios florestais, torna-se indispensável para subsidiar políticas públicas e ações de prevenção e controle de incêndios, ajustadas às necessidades

socioeconômicas e ambientais, especialmente em regiões com características demográficas distintas e que sofrem os efeitos de diversos fatores meteorológicos, como a transição Cerrado-Amazônia (Oliveira et al., 2022).

A frequência e a severidade dos incêndios têm reforçado a necessidade de sistemas de monitoramento que permitam prevenção e respostas mais rápidas e eficientes. As condições meteorológicas estão diretamente relacionadas à ocorrência de incêndios em determinadas regiões. Por conseguinte, o entendimento das suas relações pode auxiliar na elaboração de planos de mitigação e de combate aos incêndios florestais, pois indica os períodos e locais com maior probabilidade de ocorrência de incêndios, permitindo o direcionamento adequado das atividades de prevenção e combate ao fogo (Batista, 2007; Soares; Torres et al., 2017; De Andrade et al., 2021).

Dois termos amplamente utilizados em estudos sobre incêndios florestais são “perigo de incêndio” e “risco de incêndio” (Cheney; Gould, 1995). Nesse caso, o perigo de incêndio está relacionado a fatores que interferem diretamente no fogo, como as características do material combustível (tipo, quantidade, condição, arranjo), variáveis meteorológicas, relevo e localização, que podem criar condições especiais para ignição (Soares; Batista; Tetto, 2017). O risco de incêndio está ligado à presença ou à ausência de agentes causadores, como atividades florestais, atividades agrícolas próximas às áreas florestais, proximidade de ferrovias, entre outros. Especificamente quanto as variáveis meteorológicas, as suas relações com os incêndios podem ser entendidas como uma relação de produção de fogo, pois, segundo Nunes et al. (2006), as condições meteorológicas (locais e regionais) são responsáveis pela ocorrência e propagação de incêndios na vegetação, enquanto a velocidade de propagação e a intensidade do incêndio apresentam relação direta com as precipitações acumuladas, a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a velocidade e a direção dos ventos. A precipitação é o elemento meteorológico determinante para o perigo de incêndios, pois interfere diretamente no teor de umidade dos materiais combustíveis e influencia a dinâmica da temperatura do ar (De Sousa et al., 2022).

Fatores estáticos e dinâmicos condicionam a ocorrência de incêndios. Entre os fatores constantes, destacam-se o relevo e a carga de material combustível, embora esta última possa variar em áreas de cultivo e de pastagem (Pinto et al., 2021). Os fatores variáveis incluem o teor de umidade do combustível e elementos meteorológicos, como temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento, que apresentam flutuações dinâmicas em curtos intervalos espaciais e temporais (Oliveira et al., 2023; Nunes; Soares; Batista, 2007). Cada um desses fatores exerce influência distinta sobre o perigo de incêndio em determinado

local, tornando necessário conhecer suas sazonalidades para avaliar a periculosidade dos incêndios florestais (De Andrade et al. 2020).

O índice de perigo de incêndio “constitui uma tentativa de quantificar a probabilidade de um incêndio ocorrer e se propagar quando há uma fonte de ignição”. Em geral, este índice é representado por um único número e deve ser avaliado diariamente com base em dados observados ou medidos. Para a composição dos índices de perigo de incêndio, considera-se uma série de fatores e condições ambientais. Dessa forma, a adequação de um determinado índice pode variar de acordo com a área em que será empregado; ou seja, um índice que apresente bons resultados em uma área “a” poderá apresentar resultados insatisfatórios em outra “b”, desde que essas áreas apresentem diferenças, especialmente em suas condições ambientais e climáticas (Torres; Ribeiro, 2008).

Como estratégias de monitoramento e prevenção de incêndios, foram elaborados, mundialmente, índices baseados em informações meteorológicas para indicar o perigo de incêndio. No contexto do Brasil, os principais índices empregados são a Fórmula de Monte Alegre (FMA) e sua versão modificada (FMA+), desenvolvidas sob condições climáticas do estado do Paraná, e os índices internacionais de Angstron, Telecyn e Nesterov, além de P-EVAP e EVAP/P (Casavecchia et al., 2019; Gonçalves; Dias, 2020; Lima et al., 2021; Delgado et al., 2022; Silva et al., 2022; Corrêa et al., 2024; Silva; Souza; Jasper, 2024). Tais fórmulas já foram aplicadas e testadas em várias localidades no Brasil; no entanto, por apresentarem respostas distintas, ainda é importante identificar o modelo que melhor atenda às condições climáticas de cada região ou realizar ajustes para obter maior efetividade.

As maiores limitações à ampla utilização de índices de perigo de incêndio decorrem da baixa densidade de estações meteorológicas automáticas e/ou convencionais para monitoramento do estado atmosférico. A utilização de dados de reanálise meteorológica surge como uma alternativa para minimizar essas dificuldades e viabilizar a expansão de sistemas regionais de prevenção de incêndios. A reanálise meteorológica combina observações/medições históricas com modelos de previsão modernos para criar um registro consistente e contínuo do estado da atmosfera, dos oceanos e da Terra ao longo do tempo. Esses conjuntos de dados fornecem informações valiosas sobre variáveis como temperatura, precipitação e vento, permitindo uma melhor compreensão da evolução do clima e vêm sendo disponibilizados gratuitamente em diversas plataformas digitais, como o *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC), o *European Center for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), o *Climatic Research Unit* (CRU), o Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), além de muitos outros

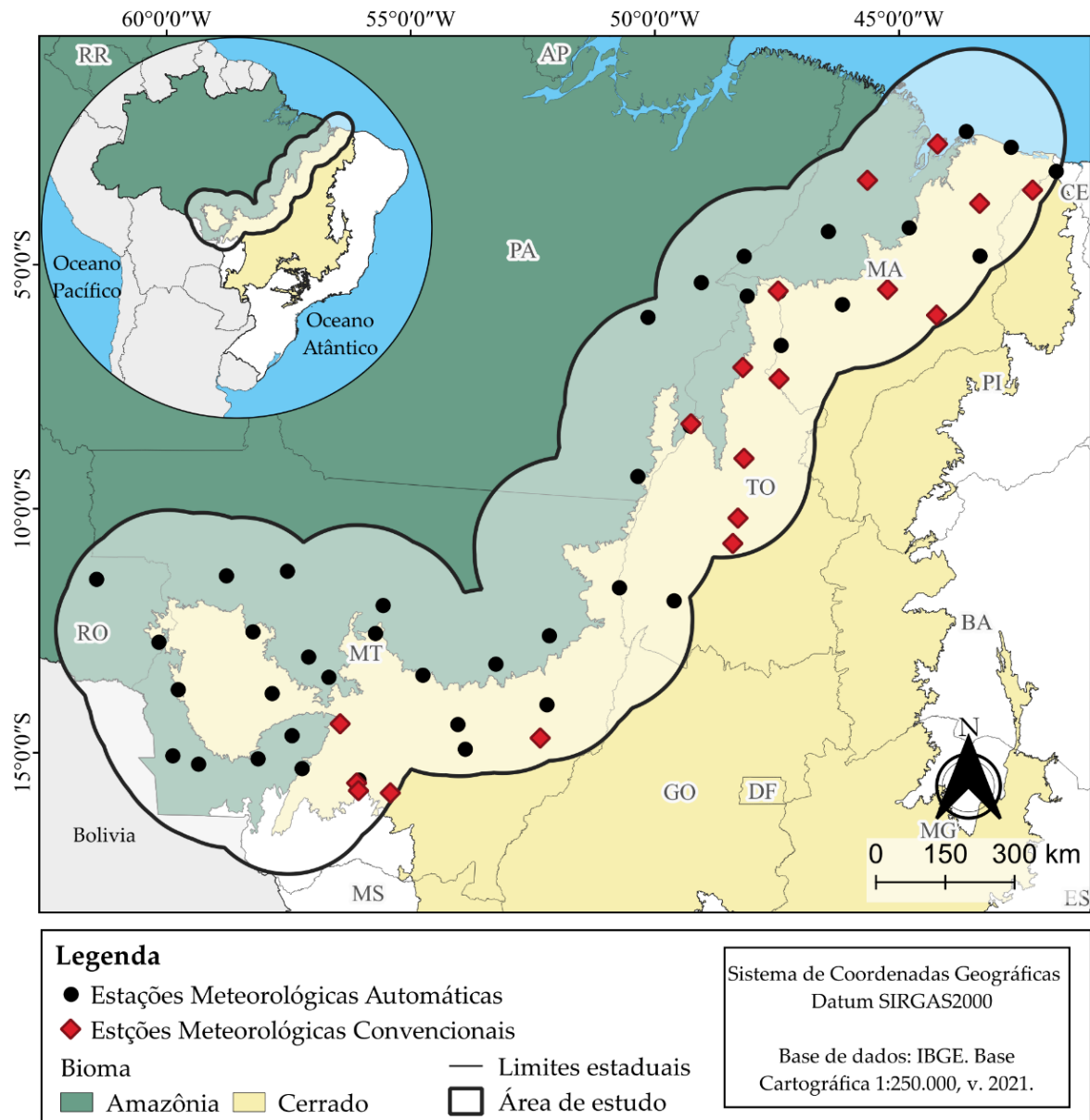
amplamente utilizados no Brasil e no mundo. Esses dados são obtidos pela compilação de informações provenientes de diversas fontes, como estações meteorológicas automáticas e convencionais, navios, aviões, radares e satélites, que podem ser interpolados por meio de modelos matemáticos, o que ajuda a estimar dados em regiões sem meios de medição (Santos Júnior; Blain; Xavier, 2022).

Estes bancos têm sido amplamente utilizados em pesquisas científicas ao redor do globo, principalmente em estudos ambientais, sem a verificação dos pressupostos de normalidade. Nesse contexto, o presente estudo analisa a adequação dos dados de reanálise do ERA5 (5th *Generation of European ReAnalysis* - ECMWF) a diferentes índices de perigo de incêndios florestais, comparando-os com medidas obtidas em estações meteorológicas automáticas. Além disso, esse trabalho buscou identificar os índices de perigo com maior precisão para a prever a ocorrência de incêndios nessa região de transição entre dois biomas brasileiros importantes (Cerrado e Amazônia).

3.2 Materiais e Métodos

Este estudo foi desenvolvido para a região de transição Cerrado-Amazônia, considerando uma delimitação de área de amortecimento de 200 km a cada lado da confluência entre os biomas Cerrado e Amazônia. A área total delimitada foi de 1.495.321,78 km² (Figura 9), abrangendo as regiões de seis estados brasileiros. Dentre esses, o estado de Mato Grosso foi o que apresentou maior porção de área dentro dessa delimitação, com 728.996,42 km², o que corresponde a 81% do território estadual; da mesma forma, nos estados do Pará, Maranhão, Rondônia, Tocantins e Piauí, as áreas enquadradas no *buffer* avaliado foi de 206.152,7, 280.388,6, 65.239,7, 202.220,62 e 12.323,70 km², que representam em torno de 17, 84, 27, 73 e 5% da área total de cada estado, respectivamente.

Figura 9. Representação do *buffer* de 200 km a partir da transição Cerrado-Amazônia. A região abrange os estados de Rondônia (RO), Mato Grosso (MT), Tocantins (TO), Maranhão (MA), Pará (PA) e Piauí (PI), no Brasil (considerada área de estudo), com a localização das estações meteorológicas convencionais e automáticas avaliadas.



Neste trabalho foram utilizados dados diários de precipitação (chuvas), temperatura do ar (máxima, mínima e média), umidade relativa do ar (máxima, mínima e média) e velocidade do vento (medida a 10,0 m de altura – valores médios diários), obtidos pelas estações meteorológicas automáticas e convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por meio do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP – <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).. A área de estudo dispõe de 87 estações automáticas e convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), submetidas à avaliação da consistência das bases

de dados. Desta forma, foram excluídas 13 estações por não abrangirem o período do estudo (de 2010 a 2022). Das 74 estações restantes, sete (07) foram excluídas por apresentarem mais de 30% de falhas de dados e/ou falhas sequenciais por mais de 6 meses. Deste modo, foram utilizadas 67 estações meteorológicas, das quais 49 são automáticas e 18 convencionais. Ao final, 56 estações foram consideradas para avaliação, evitando-se a dupla contagem de estações meteorológicas automáticas e convencionais instaladas nas mesmas coordenadas. As estações meteorológicas com o mesmo nome: em Imperatriz (MA), Cuiabá (MT) e Conceição do Araguaia (PA), estão localizadas em pontos diferentes em cada município e, nesses casos, algumas apresentam terrenos e condições de vegetação distintos, garantindo a representatividade espacial dos dados. Assim, 67 estações, oito das quais foram instaladas nas mesmas coordenadas e operadas conjuntamente e simultaneamente (convencionais e automáticas), não foram contabilizadas duas vezes.

O INMET vem adotando uma política de transição da coleta de dados convencional para a coleta automática, com medições simultâneas por até 7 anos no mesmo local, em estações de ambos os tipos. Na pesquisa, nos casos em que isso ocorreu (estações automáticas e convencionais com as mesmas coordenadas), priorizou-se o uso de dados coletados em estações automáticas, complementados com dados de estações convencionais para garantir medições locais contínuas durante o período de dados avaliado.

Com base nas localizações de cada estação meteorológica, foram obtidos dados reanálise do modelo ERA5-Land disponíveis na plataforma *Copernicus Climate Change Service* através do *C3S Climate Data Store* (CDS-<https://cds.climate.copernicus.eu/>), que são desenvolvidas e operadas pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF); esses dados correspondem à quinta geração de reanálises atmosféricas desenvolvidas pelo ECMWF e fornece estimativas de vários parâmetros atmosféricos, com uma resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (latitude e longitude) para o ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021).

Para realizar comparações estatísticas entre os dados das estações meteorológicas e os de reanálise ERA5-Land, os valores de todas as variáveis meteorológicas analisadas foram extraídos com base nas coordenadas das estações, no período de 2010 a 2022, em escala diária. Os dados de reanálise foram submetidos à correção de desvios, tendo como referência os dados medidos (estação meteorológica), visando minimizar a presença de tendências e erros sistemáticos, visto que, na região estudada, atuam diversos fatores geográficos e movimentos atmosféricos distintos, gerando diferenças climáticas significativas entre os estados. A correção

do viés é uma metodologia robusta para estudos em escala regional ou quando a preservação da tendência física do modelo é prioritária (Eq. 9).

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - x_i) \quad \text{Eq. 9}$$

em que: $\hat{x}_i$ refere-se aos dados de reanálise e x_i são os dados das estações meteorológicas.

É importante destacar que a correção de viés teve como objetivo mitigar desvios de magnitude sistêmica sem alterar a variabilidade interanual e os sinais de tendência originais do ERA5-Land, que são fundamentais para a análise de índices de risco de incêndio. Essa técnica não equaliza extremos ou variações; ao corrigir apenas o viés médio, preserva as características físicas do modelo ERA5-Land e evita a introdução de vieses estatísticos que métodos mais complexos podem gerar quando não há dados de estações suficientemente densos. A escolha desse tipo de correção é respaldada por estudos brasileiros recentes que avaliaram o ERA5 e outros dados da plataforma Copernicus (Tavares et al., 2024; Lotufo et al., 2025), que indicam a necessidade de correções regionais para minimizar erros sistemáticos (Farfán et al., 2024; Almagro et al., 2024). No Brasil, pesquisadores que trabalham com mudanças climáticas frequentemente citam a necessidade de evitar o "forçamento" de dados de reanálise sobre observações de estações que podem apresentar falhas. Em regiões como a Amazônia ou o Centro-Oeste, a baixa densidade de estações e os altos percentuais de falhas desencorajam o uso de metodologias de correção mais sofisticadas (Dhawan et al., 2024). Autores brasileiros nessas regiões frequentemente justificam o uso do viés como uma abordagem conservadora, menos suscetível a flutuações em estações isoladas.

Dadas a grande extensão territorial e as variações fitossociológicas na vegetação nativa, e por se tratar de uma área de transição entre os biomas Amazônico e Cerrado, que geram diferentes padrões florestais com condições variáveis de altura das plantas, a altura de referência do vento de 2,0 m foi escolhida (Allen, 1998). Essa altura padrão e o perfil logarítmico adotado, assumindo rugosidade superficial de grama curta, são práticas comuns em estudos climatológicos e de risco de incêndio, pois garantem consistência metodológica e comparabilidade entre diferentes regiões. Essa escolha metodológica busca representar de forma consistente o ambiente vegetal predominante para a propagação do fogo, uma vez que os incêndios superficiais são diretamente influenciados por condições próximas ao solo, como o relevo, a vegetação e a cobertura vegetal. Embora se reconheça que a área inclui paisagens de floresta ombrófila, savanas, pastagens e áreas de cultivo temporário, a simplificação adotada permitiu a comparação regional e reduziu a complexidade dos ajustes. Esse procedimento

também pode ser considerado adequado, visto que o objetivo do trabalho aborda o "perigo" de incêndios com base em elementos climáticos; Se os "riscos" de incêndios fossem abordados, pelo menos 10 fatores ambientais deveriam ser avaliados conjunta e hierarquicamente, tais como altitude, declive, exposição da encosta, precipitação, temperatura do ar, humidade relativa do ar, uso e ocupação do solo, proximidade de estradas e humidade do material (Silva, Souza; Jasper, 2024). Portanto, mesmo que a abordagem aplicada possa introduzir um certo nível de incerteza nos índices de perigo (FMA+), considera-se que foi adequada ao objetivo da pesquisa.

As estimativas dos índices de perigo foram realizadas com base na altura-base de 2,0 m, considerando que a ocorrência de incêndios nesta região é caracterizada por incêndios de superfície (Aragão, 2023), visto que as pastagens e culturas agrícolas dessa região, em sua maioria, não ultrapassam esse limite. Além disso, os elementos meteorológicos são medidos conforme Allen et al. (1998), incluindo a altura. Para isso, foi realizada a conversão da unidade de medida da velocidade do vento, de km/h para m/s, bem como o ajuste da altura para 2,0 m, conforme as medições das estações meteorológicas, uma vez que os dados de reanálise são fornecidos a 10 m de altura (Lotufo et al., 2025).

Para isso, foi aplicado um ajuste logarítmico do gradiente de vento em altura, utilizando um coeficiente de rugosidade da superfície da grama curta como fator de correção (Allen et al., 1998), conforme a equação 10. Este ajuste foi realizado tanto para os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) quanto para as reanálises do ECMWF (ERA5-LAND).

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z) - 5,42} = 0,74795 u_{10} \quad \text{Eq. 10}$$

em que: U_2 : velocidade do vento a 2,0 m acima da superfície do solo m.s^{-1} ; U_{10} : velocidade do vento a 10,0 m acima da superfície do solo m.s^{-1} ; U_z : velocidade do vento medida a z m acima da superfície do solo m/s ; Z : altura da medição acima da superfície do solo (m); e $\ln$: perfil logarítmico de velocidade do vento para medições acima de uma superfície de grama curta.

Os dados de chuva foram ajustados pelo Índice de Precipitação Normalizada (SPI), empregado no monitoramento da variabilidade anual (Santos et al., 2014). Dada a vasta extensão territorial, as regiões oeste e leste da área de estudo têm a Cordilheira dos Andes e o Oceano Atlântico Equatorial como principais condicionantes geográficas. O papel do SPI é fundamental na homogeneização de dados de diferentes fontes (estação vs. grade) antes da avaliação do perigo de incêndio, evitando que a comparação seja enviesada por discrepâncias no volume de precipitação. A chuva possui uma distribuição assimétrica; nesse sentido, os

dados foram, primeiramente, transformados para a distribuição normal e, em seguida, calculados conforme a equação 11.

$$SPI = Zi = \frac{(Pi - \bar{P}_i)}{\sigma_i} \quad \text{Eq. 11}$$

em que: SPI é a variável reduzida Zi da distribuição normal da precipitação; i é a escala de tempo; P_i é a precipitação observada; $\bar{P}_i$ e σ_i são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série ajustada. O SPI é a variável reduzida Zi da distribuição normal da precipitação.

3.2.1 Preenchimento de falhas

A avaliação dos índices de perigo de incêndio exige séries diárias contínuas de dados meteorológicos e, portanto, para os dados medidos em estações meteorológicas convencionais e automáticas, foi necessário preencher as lacunas. Para as variáveis meteorológicas de temperatura e de umidade relativa do ar, as falhas diárias foram corrigidas pelo método de ponderação regional, por meio de regressões entre as três estações mais próximas (Sabino et al., 2022).

Para preencher as falhas nos dados de chuva, utilizaram-se os dados do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), disponibilizados com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (graus de latitude e longitude), no banco de dados do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO), coordenado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Para a obtenção dos dados do TRMM, utilizaram-se as coordenadas geográficas da estação meteorológica do INMET, priorizando o entorno e a proximidade da estação a ser preenchida. Foram selecionados quatro pontos de dados de TRMM para cada estação meteorológica do INMET. Após a seleção do TRMM com valores diários de 2010 a 2022, os dados de chuva da estação local e do TRMM foram separados por ano e por período (seco e chuvoso) para a obtenção dos desvios. Quando foram observados desvios superiores a 40% entre os dados medidos na estação local e a média do TRMM nos totais mensais, os valores discrepantes da estação local foram preenchidos com os dados médios diários do TRMM.

O preenchimento das falhas de dados de velocidade do vento foi realizado com base nas médias mensais da própria estação do INMET (Souza et al., 2013).

3.2.2 Índices de perigo de incêndio

Após a correção das séries contínuas diárias das variáveis meteorológicas para cada estação, obtiveram-se os índices de perigo de incêndio de Angstron, FMA, FMA+, P-EVAP e EVAP/P, considerados índices recomendados para a região de transição Cerrado-Amazônia de

Mato Grosso (Casavecchia et al., 2019). Esses índices foram aplicados tanto aos dados das estações meteorológicas quanto aos de reanálise.

O Índice de Angstron é um índice de perigo de incêndio não acumulativo que utiliza dados de temperatura e de umidade relativa do ar, medidos diariamente às 13h00, ou relações entre a temperatura máxima diária e a umidade relativa mínima diária (Soares, 1985; Casavecchia et al., 2019). Inicialmente, a interpretação do índice baseava-se no valor de “B”, de modo que valores inferiores a 2,5 indicavam perigo de incêndio, ou seja, as condições atmosféricas do dia favoreciam a ocorrência de incêndio. Casavecchia et al. (2019) realizaram a discretização das classes de perigo de incêndio com base em histogramas de frequência e probabilidades de ocorrência e padronizaram as avaliações de perigo em cinco classes, semelhantes às de outros índices de perigo, as quais foram adotadas no presente estudo. O índice diário é obtido pela Eq. 12.

$$B = 0,05 \cdot H - 0,1 \cdot (T - 27) \quad \text{Eq. 12}$$

em que: B é o índice de Angstron; H é a umidade relativa do ar, em (%); T é a temperatura do ar, em °C.

A Fórmula de Monte Alegre (FMA) é um dos índices mais utilizados em estudos sobre perigo de incêndio no Brasil. Trata-se de um índice acumulado que considera a influência dos dias sem chuva, de modo a refletir o acúmulo ou a perda de umidade nos combustíveis vegetais. Além dos dias sem chuva, o índice FMA também considera a umidade relativa do ar (Eq. 13; Casavecchia et al., 2019; Soares, 1985).

$$FMA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H} \right) \quad \text{Eq. 13}$$

em que: H é a umidade relativa do ar, em %, medida às 13h00; n é o número de dias sem chuva igual ou superior a 12,9 mm.

Para permitir melhores representações em diferentes condições meteorológicas e em superfícies vegetadas, foi desenvolvida a Fórmula Monte Alegre Modificada (FMA+), que também é um índice acumulativo e associa os efeitos da umidade relativa do ar (H) e da velocidade do vento (v), ambas medidas às 13:00h (Eq. 14) (Nunes; Soares; Batista, 2007; Souza; Casavecchia; Stangerlin, 2012).

$$FMA^+ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H} \right) e^{0,04v} \quad \text{Eq. 14}$$

em que: H é a umidade relativa do ar, em %, medida às 13h00; n é o número de dias sem chuva igual ou superior a 12,9 mm; v é a velocidade do vento (m.s⁻¹).

Os índices de perigo de incêndio P-EVAP (Eq. 15) e EVAP/P (Eq. 16), também são acumulativos e mostram as relações de déficit em condições de um balanço hídrico sequencial em microescala, considerando a relação entre as lâminas hídricas (mm) diárias da precipitação (P) e a evapotranspiração de referência potencial (EVAP); nesse caso, EVAP foi obtida pelo modelo de Camargo (Camargo et al., 1999) (Eq. 17), por depender apenas da temperatura média diária do ar (T_{med}) e apresentar bons resultados para essa região de estudo (Tanaka et al., 2016).

$$P - EVAP = \sum_{i=1}^n P - EVAP \quad \text{Eq. 15}$$

$$EVAP/P = \sum_{i=1}^n EVAP/P \quad \text{Eq. 16}$$

$$ET_0 = F \cdot H_0 \cdot T_{med} \quad \text{Eq. 17}$$

em que: ET_0 é a evapotranspiração potencial; F é o fator de correção do modelo; H_0 é a radiação extraterrestre e T_{med} é a temperatura média diária.

Além das fórmulas apresentadas, os índices de perigo de incêndio FMA, FMA+, P-EVAP e EVAP/P apresentam restrições de aplicação (Tabela 10).

Tabela 10. Restrição à aplicação dos índices de perigo de incêndio: FMA, FMA+, P-EVAP e EVAP/P

Chuva do dia (mm)	Modificações nos cálculos
	FMA e FMA+
≤ 2,4	Nenhuma.
2,5 a 4,9	Abater 30% da FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
5,0 a 9,9	Abater 60% da FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
10,0 a 12,9	Abater 80% da FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
> 12,9	Interromper o cálculo (FMA = 0) e recomeçar a somatória no dia seguinte.
	P-EVAP
	Nenhuma.
	Abater 25 % no valor de P-EVAP calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
	Abater 50 % no valor de P-EVAP calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
	Abandonar a somatória anterior e recomeçar o cálculo, isto é, P-EVAP = (d.t) do dia.
	EVAP/P
	Não entra no cálculo.
	Dividir a EVAP/P da véspera pela chuva do dia
	Interromper o cálculo e recomeçar no dia seguinte ou quando a chuva cessar.
>15	No dia da chuva EVAP/ P = 0,00

Fonte: Casavecchia et al. (2019)

Após a aplicação dos índices, os resultados foram agrupados em cinco classes de grau de perigo: nulo, pequeno, médio, alto e muito alto (Tabela 11).

Tabela 11. Agrupamento em classes de perigo de incêndio de acordo com o índice de perigo

Classes de Perigo	FMA	FMA+	P-EVAP	EVAP/P	Angstron
Nulo	$\leq 1,0$	$\leq 3,0$	> -5	< 11	$> 4,5$
Pequeno	1,1 a 3,0	3,1 a 8,0	-5 a -15	11 a 30	4,5 a 4,2
Médio	3,1 a 8,0	8,1 a 14,0	-15 a -35	30 a 56	4,2 a 4
Alto	8,1 a 20,0	14,1 a 24,0	-35 a -75	56 a 93	4 a 3,5
Muito Alto	$> 20,0$	$> 24,0$	< -75	> 93	$< 3,5$

Fonte: Casavecchia et al. (2019)

3.2.3 Estatística

Para verificar o desempenho dos índices, foi aplicada a metodologia *Skill Score*, que avalia a qualidade do sistema de previsão e valida os índices produzidos. O *Skill Score* é obtido por meio da aplicação de uma tabela de contingência (Tabela 12), que compara os valores observados aos previstos para um determinado evento, população ou intervalo de tempo (Torres; Ribeiro, 2008).

Tabela 12. Contingência do *Skill Score*

Previsto	Observado		Total Previsto
	Incêndio	Não incêndio	
Incêndio	A	b	N2 = a + b
Não incêndio	C	d	N4 = c + d
Total Previsto	N1 = a + c	N3 = b + d	N = a + b + c + d

*As variáveis necessárias para a realização dos cálculos são:

N - Número total de observações. $N = a + b + c + d$;G - Número de acertos na previsão. $G = a + d$;p - probabilidade de ocorrer pelo menos um evento por dia. $p = N1/N$;q - probabilidade de exceder o valor limite do índice. $q = N2/N$;H - Número esperado de acertos. $H = N * (1 - p) * (1 - q) + N * p * q$;SS - *Skill Score*. $SS = (G - H) / (N - H)$;PS - Porcentagem de sucesso. $PS = G / N$;Acerto nas previsões de ocorrências de incêndios = $a / N2$;Acerto nas previsões de não ocorrências = $d / N4$.

Baseado em: Torres e Ribeiro (2008); Casavecchia et al. (2019).

Para a aplicação do método *Skill Score*, as observações (dias) foram associadas às suas respectivas classes de perigo de incêndio, sendo separadas em dois grupos: i) as classes de perigo alto e muito alto foram consideradas dias previstos para a ocorrência de incêndio; ii) as classes de perigo nulo, pequeno e médio foram consideradas dias sem previsão de ocorrência de incêndio. Esses agrupamentos permitiram obter previsões de perigo. Por conseguinte, para a validação do método *Skill Score*, os dados observados foram obtidos na base de observações de focos de calor do Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referentes aos anos de 2010 a 2022, para os estados de Mato Grosso, Pará, Rondônia, Maranhão e Tocantins inseridos na área de estudo, na escala temporal diária.

Os dados de focos de calor do BDQueimadas são disponibilizados no formato vetorial de pontos. Para contabilizar a presença de foco de incêndio em relação aos índices de cada estação, o foco deve estar a menos de 50 km do ponto de localização da estação meteorológica, e também foram considerados os dados de reanálise. As limitações inerentes à detecção de fontes de calor usando imagens de satélite (Hoki et al., 2023; Lotufo et al., 2025), considerando satélites geoestacionários, a resolução espacial dos sensores em órbita, bem como a resolução do ERA5-Land (~9 km) (Santos-Júnior et al., 2022), cobrem aproximadamente 5 a 6 células do modelo ao redor de cada estação, o que é considerado adequado para representar fenômenos em escala regional, como grandes incêndios. Reduzir esse raio para 10 km tornaria a análise inviável em estados com grandes extensões territoriais, como Mato Grosso e Maranhão, pois muitas estações apresentariam "zero pontos quentes" apenas devido à distância, comprometendo o cálculo do Índice de Habilidade. Este raio de 50 km é adequado para capturar a variabilidade climática regional, garantindo uma amostra estatisticamente representativa para o cálculo dos Skill Scores em áreas com baixa densidade de estações (Silva et al., 2022; Hoki et al., 2023).

Com o intuito de comparar as variáveis das estações meteorológicas com os dados de reanálise, bem como seus resultados nos índices de perigo de incêndio, foram aplicados os seguintes métodos para avaliar o desempenho estatístico: índice de concordância (d) de Willmott (Eq. 18), MBE (*Mean Bias Error*) (Eq. 19), RMSE (*Root Mean Square Error*) (Eq. 20) e o teste de Mann-Whitney (Eq. 21).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad \text{Eq. 18}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad \text{Eq. 19}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 20}$$

$$Z = \frac{U(YX) - n/2}{\sqrt{n(m+n+1)/12m}} \quad \text{Eq. 21}$$

em que: P_i são os dados observados (provenientes das estações meteorológicas); O_i são os dados estimados; neste trabalho, são os dados de reanálise.

O índice de concordância de Willmott mede o ajuste entre os valores estimados e os observados, variando de 0 a 1, em que 0 indica o pior ajuste e 1 o melhor possível (Willmott, 1982). O MBE (*Mean Bias Error*) quantifica o desvio médio entre os valores estimados e os observados, sendo negativo quando os valores estimados são subestimados, positivo quando são superestimados e zero quando há uma simulação perfeita. O RMSE (*Root Mean Square Error*) indica a dispersão média quadrática dos erros entre os valores estimados e os observados.

Diferentemente do MBE, ele não informa se há subestimação ou superestimação, mas quanto menor for o seu valor ou mais próximo de zero, melhor será o desempenho do modelo. O teste não paramétrico de Mann-Whitney avalia se há diferenças significativas entre as distribuições de dois conjuntos de dados. A análise considera o valor p crítico ($< 0,05$) para validar tendências, com base no cálculo da posição dos elementos entre as amostras; o resultado indica se há ou não diferenças estatisticamente significativas entre as distribuições dos dois conjuntos de dados (Mabude et al., 2022).

3.3 Resultados

3.3.1 Estatística das variáveis meteorológicas obtidas em estações meteorológicas e por meio de reanálise

Na comparação entre os dados observados (estações meteorológicas) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os estimados de reanálise (ERA5-Land), no período de 2010 a 2022, utilizando o teste de Mann-Whitney, observou-se que a precipitação apresentou discordâncias extremas; no entanto, as variáveis de temperatura e de umidade relativa apresentaram graus variados de concordância. Os estados de Rondônia, Mato Grosso e Pará apresentam as maiores inconsistências entre os dados de estação e de reanálise. No estado de Rondônia, observou-se o maior número de variáveis com diferença estatisticamente significativa, principalmente na estação de Cacoal, o que evidencia maior discrepância entre os dados da estação meteorológica e da reanálise, enquanto os estados do Maranhão e do Tocantins apresentaram menor número de variáveis discrepantes (Tabela 13).

A avaliação estatística demonstrou que, em todos os estados inseridos na transição Cerrado-Amazônia, a variável chuva apresentou diferença estatisticamente significativa ($p = 0,00$) entre os valores observados e os estimados. Quanto à temperatura diária do ar, a temperatura máxima (T_{max}) apresentou diferença no estado de Rondônia ($p = 0,03$), enquanto nos demais estados, os valores de p foram superiores a 0,05. A temperatura média (T_{med}) não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os estados da área de estudo, com p -valores de 0,09 a 0,32, o que permite inferir que os dados simulados (reanálise) estão

estatisticamente alinhados aos dados observados (estações meteorológicas) na área de estudo. Para a temperatura mínima (T_{min}), foram identificadas diferenças estatisticamente significativas apenas nos estados de Mato Grosso e Pará (p -valor de 0,03) e em Rondônia (p -valor de 0,04); nos demais estados, obteve-se $p > 0,05$, indicando que os dados observados e estimados são estatisticamente semelhantes.

Para a umidade relativa média diária do ar, observaram-se diferenças estatisticamente significativas nos estados do Pará ($p = 0,00$) e de Mato Grosso ($p = 0,05$). Para a umidade relativa mínima do ar, observaram-se diferenças entre os dados diários de Rondônia ($p = 0,04$). Em relação à velocidade média do vento, observaram-se diferenças estatisticamente significativas entre os dados medidos (estações meteorológicas) e os estimados (reanálise) em Rondônia e no Piauí ($p = 0,01$) (Tabela 13).

Tabela 13. Resultados do Teste de Mann-Whitney para as variáveis meteorológicas obtidas por medições em estações meteorológicas (observadas) e por reanálise (estimadas), nos estados de Mato Grosso (MT), Tocantins (TO), Maranhão (MA), Pará (PA), Piauí (PI) e Rondônia (RO) inseridos na faixa de transição Cerrado-Amazônia

Teste de Mann-Whitney das variáveis por estado na área de estudo							
Variáveis/Estados	MT	TO	MA	PA	PI	RO	
Chuva	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Tmax	0,28	0,31	0,16	0,15	0,24	0,03	
Tmed	0,14	0,21	0,19	0,19	0,09	0,32	
Tmin	0,03	0,06	0,16	0,03	0,10	0,04	
URmed	0,05	0,08	0,20	0,00	0,19	0,31	
URmin	0,30	0,38	0,31	0,20	0,10	0,04	
Vvmed	0,12	0,15	0,19	0,14	0,01	0,01	
Teste de Mann-Whitney para as variáveis da área de estudo							
Valores	Chuva	Tmax	Tmed	Tmin	URmed	URmin	Vvento
Média	0,00	0,23	0,17	0,08	0,10	0,29	0,14
Máximo	0,00	0,98	0,99	0,92	1,00	0,98	0,91
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Os elementos meteorológicos avaliados apresentaram variabilidade mensal, com padrões sazonais bem definidos ao longo do ano (Figura 10). As chuvas apresentam acentuada variação nos primeiros meses do ano (de janeiro a abril), com os valores mais elevados, sendo também o período em que se registrou a maior quantidade de valores extremos mensais, com *outliers* superiores a 200 mm/mês. A partir de maio, observou-se uma redução das chuvas, marcando o início da estação seca, que se estendeu até setembro, com valores médios baixos e baixa dispersão. O volume pluviométrico voltou a aumentar gradativamente a partir de outubro, indicando o início do período chuvoso (Figura 10A).

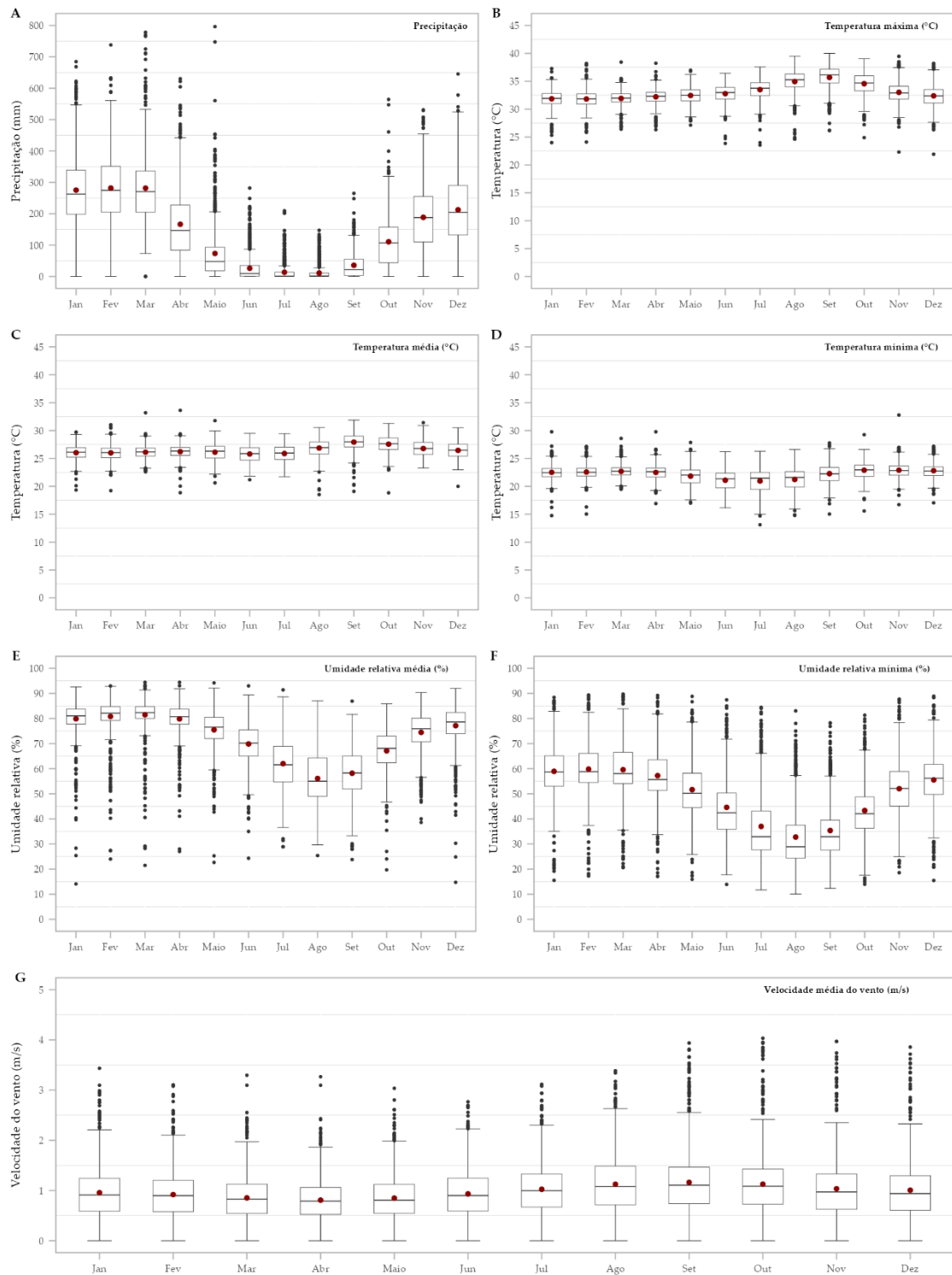
As temperaturas máximas diárias (Figura 10B), médias e mínimas diárias (Figura 10C) apresentaram estabilidade ao longo do ano, com amplitudes térmicas de 10 a 25 °C. As

temperaturas máximas variaram entre 31 e 34 °C (valores médios), com leve redução entre junho e agosto. As temperaturas médias oscilaram entre 26 e 28 °C, enquanto as mínimas apresentaram maior variabilidade, com queda mais acentuada entre maio e julho (período em que as medianas atingiram aproximadamente 18 °C).

Os valores médios diários de umidade relativa do ar (Figura 10E) apresentaram-se mais elevados de janeiro a abril, com medianas superiores a 80%, e diminuíram acentuadamente a partir de maio, atingindo os valores mais baixos de junho a agosto (medianas de 50 a 60%), seguindo a mesma tendência de distribuição da chuva (Figura 10A). A sazonalidade da umidade relativa mínima do ar (Figura 10F) reforça a severidade da estação seca, com valores consistentemente inferiores a 30% e, em alguns casos, abaixo desse nível.

Quanto à velocidade média do vento a 2,0 m de altura, observou-se pouca variação ao longo do ano, com medianas entre 1,5 e 2,5 m.s⁻¹. Contudo, verifica-se um leve aumento nos meses mais secos (junho a setembro), acompanhado de maior dispersão dos dados e de valores extremos superiores a 5 m.s⁻¹ (Figura 10G).

Figura 10. Distribuição mensal das variáveis meteorológicas medidas nas estações meteorológicas na região de transição Cerrado-Amazônia, no período de 2010–2022. Os *box plots* detalham o comportamento sazonal de: (A) chuvas totais mensais; (B) temperatura máxima diária do ar; (C) temperatura média diária do ar; (D) temperatura mínima diária do ar; (E) umidade relativa média diária do ar; (F) umidade relativa mínima diária do ar; e (G) velocidade média diária do vento – a 2,0 m de altura. A caixa do *boxplot* representa o intervalo interquartil; a linha no interior da caixa é a mediana; as hastes são os limites inferior e superior; os pontos externos à caixa são os valores anômalos; e o ponto interno é a média.



A Figura 11 apresenta, na primeira coluna, a variabilidade espacial observada (OVMS) com base em dados de estações meteorológicas de chuva e de temperatura do ar. As chuvas totais anuais, medidas nas estações meteorológicas de 2010 e 2022, na região de transição Cerrado-Amazônia, apresentaram valores superiores a $1.000 \text{ mm ano}^{-1}$ e média anual de $1.662,20 \text{ mm}$; no entanto, observou-se heterogeneidade espacial, com amplitude de até 1.132 mm (Figura 11). Verificaram-se duas regiões com as maiores taxas de precipitação na área

estudada: a oeste, no estado de Rondônia, representadas pelas estações meteorológicas de Cacoal e Vilhena (com 2.125 e 2.114,74 mm.ano⁻¹, respectivamente), e a norte, no Pará, onde a estação de Rondon do Pará registrou 2.227 mm.ano⁻¹. Em contrapartida, a região Nordeste da área de estudo, localizada no estado do Maranhão, registrou os menores valores, especialmente em Colinas (MA), que apresentou o menor índice pluvial regional (1.039 mm.ano⁻¹).

O indicador estatístico MBE apresentou valores entre 1 e -35, com 85% dos dados indicando que os valores de reanálise subestimaram os das estações meteorológicas, enquanto 13,5% indicaram superestimação. As estações de Brasnorte (MT) e Farol de Santana (MA) apresentaram diferenças de 0,99 a -0,99 entre a reanálise e os dados observados (Figura 11).

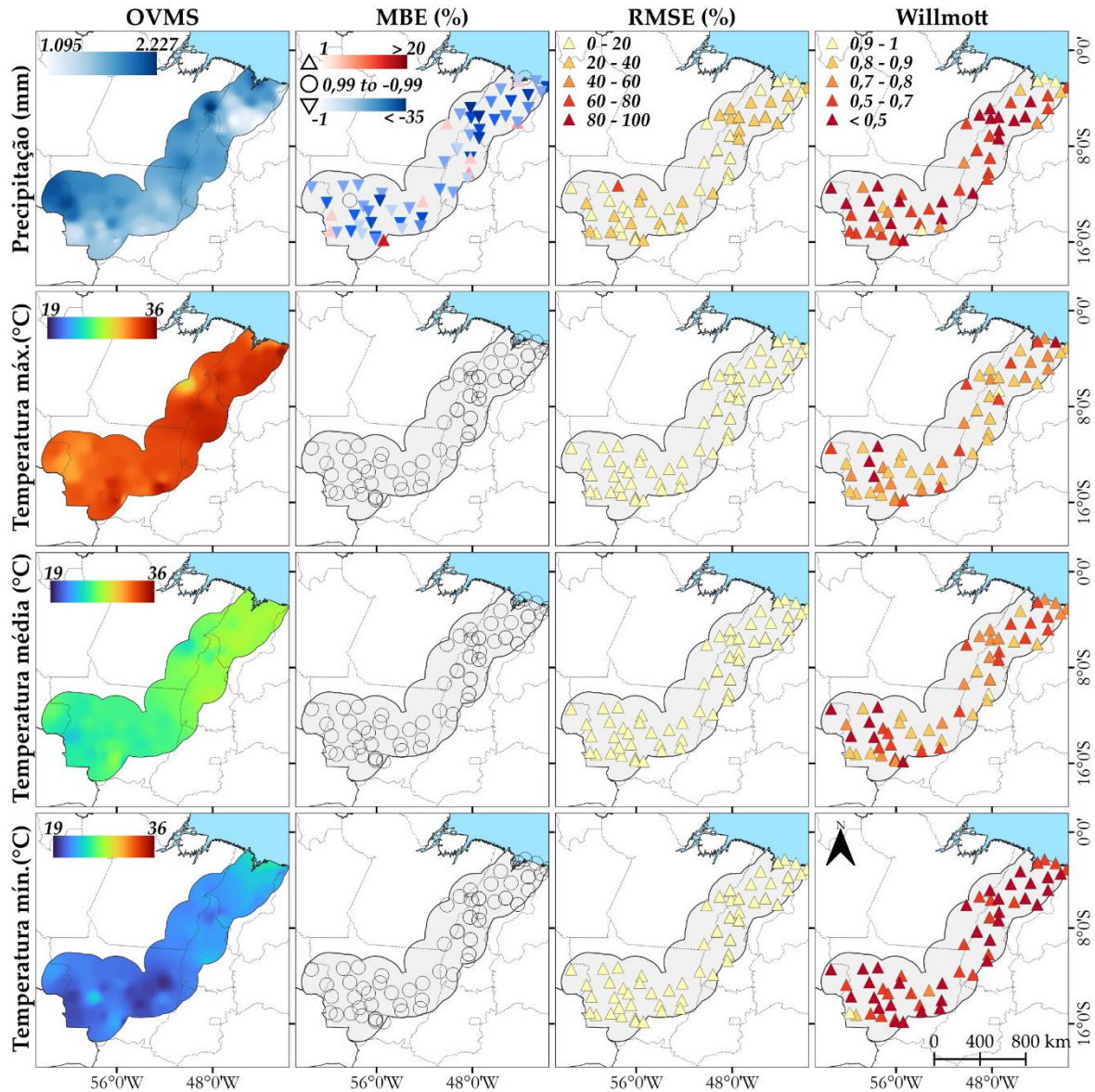
Quanto ao indicador RMSE, os valores apresentaram dispersão inferior a 40%, considerada moderada e dentro de um patamar de erro aceitável. O índice de Willmott revelou baixa concordância na maior parte da região (valores inferiores a 0,5), exceto em São Luís e Farol de Santana (MA), onde se observaram os melhores valores (0,95 em ambas as estações) (Figura 11).

Para as variáveis de temperatura máxima, média e mínima do ar, os resultados mostraram MBEs próximos de zero, indicando boas estimativas dos dados simulados pela reanálise. Assim, o RMSE também indica boa precisão em quase toda a área de estudo. O desempenho em relação ao índice de Willmott ficou entre 0,5 e 0,8, indicando concordância moderada a boa entre os dados de reanálise e as medidas obtidas nas estações meteorológicas (Figura 11).

Na região de Transição Cerrado-Amazônia, ao analisar a correlação da variabilidade espacial entre a chuva e as temperaturas ao longo da série (2010-2022), notou-se que a temperatura máxima apresentou diferenças térmicas elevadas (36 °C) nas regiões Norte e Nordeste e menores (19 °C) na região Sudoeste (Figura 11).

A temperatura média suaviza a sazonalidade das temperaturas máximas e mínimas, reduzindo a variabilidade espacial; contudo, observaram-se efeitos do Atlântico Sul e do bioma Caatinga, com a ocorrência de maiores valores de Tmed nos estados de MA, PI, RO e TO e no Sudeste do PA. A temperatura mínima apresentou distribuição semelhante às demais temperaturas, com destaque para os valores mínimos na região central e no sul da área de estudo, nas estações meteorológicas de Querência, Gaúcha do Norte, Vila Bela da Santíssima Trindade e Porto Estrela, todas no Mato Grosso (Figura 11).

Figura 11. Variação espacial observada (OVMS) dos elementos meteorológicos (chuva total média anual; temperaturas máxima, média e mínima diárias médias anuais) e dos indicadores estatísticos Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE) e índice de concordância de Willmott, entre os dados medidos nas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e na reanálise (ERA5 Land), na transição Cerrado-Amazônia, no período de 2010 a 2022. Representado por símbolos (círculos e triângulos)



A referência são os dados medidos nas estações meteorológicas e para interpretação dos índices estatísticos, têm-se: i) MBE - círculos representam valores de 0,99 a -0,99, considerado perfeito; triângulo na cor vermelha, os valores de $1 > 20\%$, indicam subestimativas; e o triângulo invertido, cor azul, valores de $-1 < -35\%$ superestimativa; ii) RMSE, a variação de cores do amarelo ao vermelho (de 0 a 20 ótima dispersão; 20 a 60 dispersão moderada; 60 a 100 grande espalhamento dos erros); iii) d de Willmott, varia em uma escala de 0 a 1 do amarelo ao vermelho (0,9 a 1, 0 excelente; 0,8 a 0,9 ótimo; 0,7 a 0,8 bom; 0,5 a 0,7 regular, e $< 0,5$ ruim).

*A6 sigla OVMS refere-se à variabilidade espacial observada nos dados de estações meteorológicas.

A avaliação das variáveis URmed, URmin e da velocidade média do vento revelou diversos níveis de desempenho estatístico entre os dados medidos e os de reanálise (Figura 12). Pela variabilidade espacial observada (OVMS) com base em dados das estações meteorológicas, a umidade relativa do ar média anual variou de 61,6 a 81%, sendo que os menores valores foram encontrados na região Sudeste da área de estudo, próximo a Palmas (TO), com região com influência do fator continentalidade (biomas caatinga e cerrado); enquanto as maiores médias anuais de umidade relativa do ar ocorreram na região de São Luís (MA), influenciada pela umidade advinda do oceano Atlântico. Quanto à umidade relativa mínima anual, observaram-se valores mais elevados na região norte da área de estudo, onde o oceano apresenta uma dinâmica de umidade mais estável ao longo do ano (Figura 12).

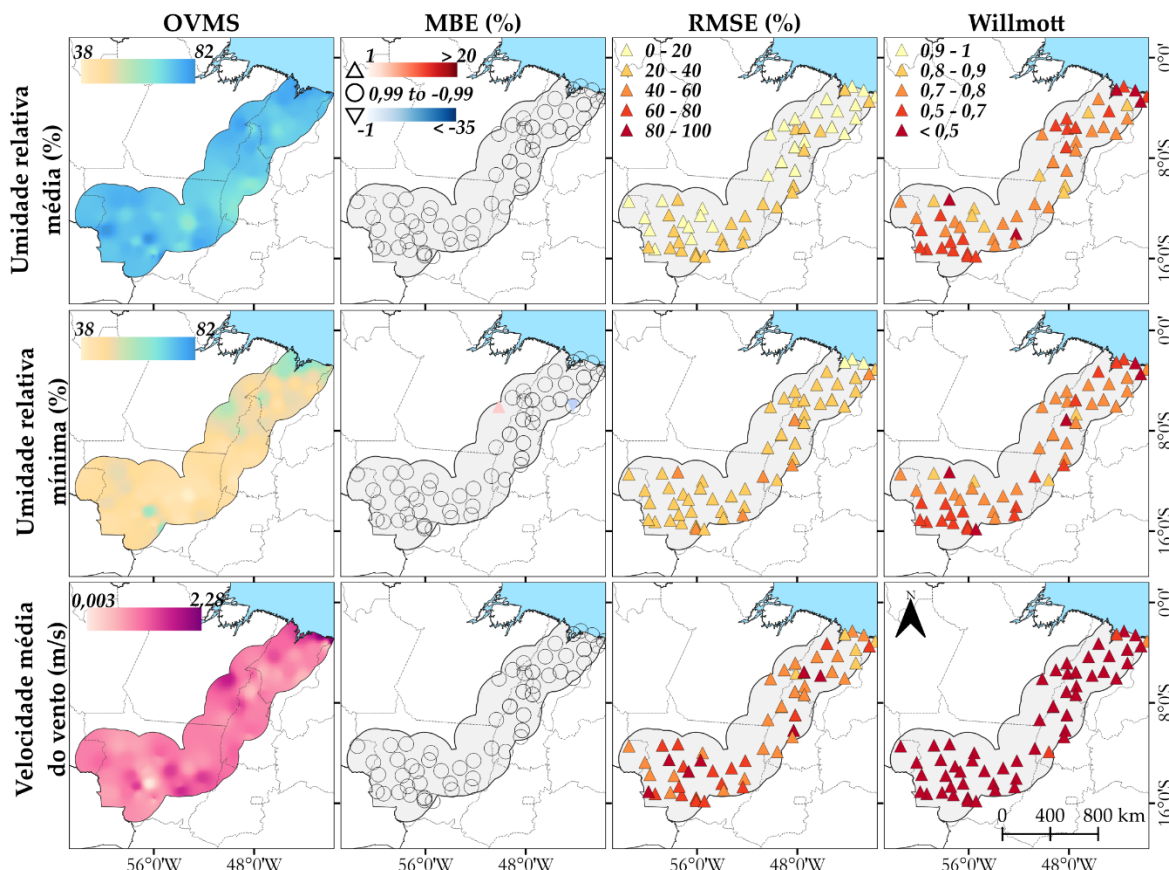
O modelo apresentou baixo viés (MBE entre -0,99% e 0,99%) para a umidade relativa média e mínima. Os valores de RMSE se mantiveram entre 20 e 60%. No entanto, o índice de Willmott apresentou valores predominantemente inferiores a 0,7, indicando a distância entre os dados medidos pelas estações meteorológicas e os de reanálise, sobretudo em eventos extremos (umidade mínima) (Figura 12).

A umidade relativa média anual de toda a região estudada, no período de 2010 a 2022, foi de 71,6%, com os valores médios mais altos e mais baixos em março (81,5%) e em agosto (56,1%), respectivamente. Em relação à umidade relativa mínima anual, foi de 48,7%, enquanto, na escala mensal, a URmin variou de agosto a outubro de 32,8% a 43,3%, respectivamente. Durante o período chuvoso de dezembro a abril, a umidade variou entre 55,5% e 57,2%.

Para a velocidade média do vento, a variabilidade espacial observada na Figura 12 indicou valores baixos, de 0,003 a 2,25 m.s⁻¹. Apesar de o modelo apresentar MBE baixo, com valores próximos de zero, caracterizado como perfeito, os valores de RMSE são elevados, entre 40 e 80%, o que indica uma diferença considerável entre os dados estimados e observados. O índice de Willmott foi inferior a 0,5 em grande parte da área.

A velocidade média anual do vento no período de estudo foi de 1,0 m.s⁻¹, com variação média mensal de 0,8 a 1,2 m.s⁻¹, com os maiores valores entre julho e dezembro. As maiores médias mensais da velocidade do vento foram observadas na região dos estados do Maranhão (Preguiças e Farol de Santana, com 4,0 e 3,0 m.s⁻¹, respectivamente) e do Piauí (Parnaíba, 4,0 m.s⁻¹), em função da predominância de correntes de ar provenientes do Atlântico.

Figura 12. Variação espacial observada (OVMS) dos elementos meteorológicos, em médias anuais de dados diários (umidade relativa do ar – média e mínima e velocidade média do vento), e dos indicadores estatísticos *Mean Bias Error* (MBE), *Root Mean Square Error* (RMSE) e índice de concordância de Willmott, entre os dados medidos nas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e na reanálise (ERA5 Land), na transição Cerrado-Amazônia, no período de 2010 a 2022



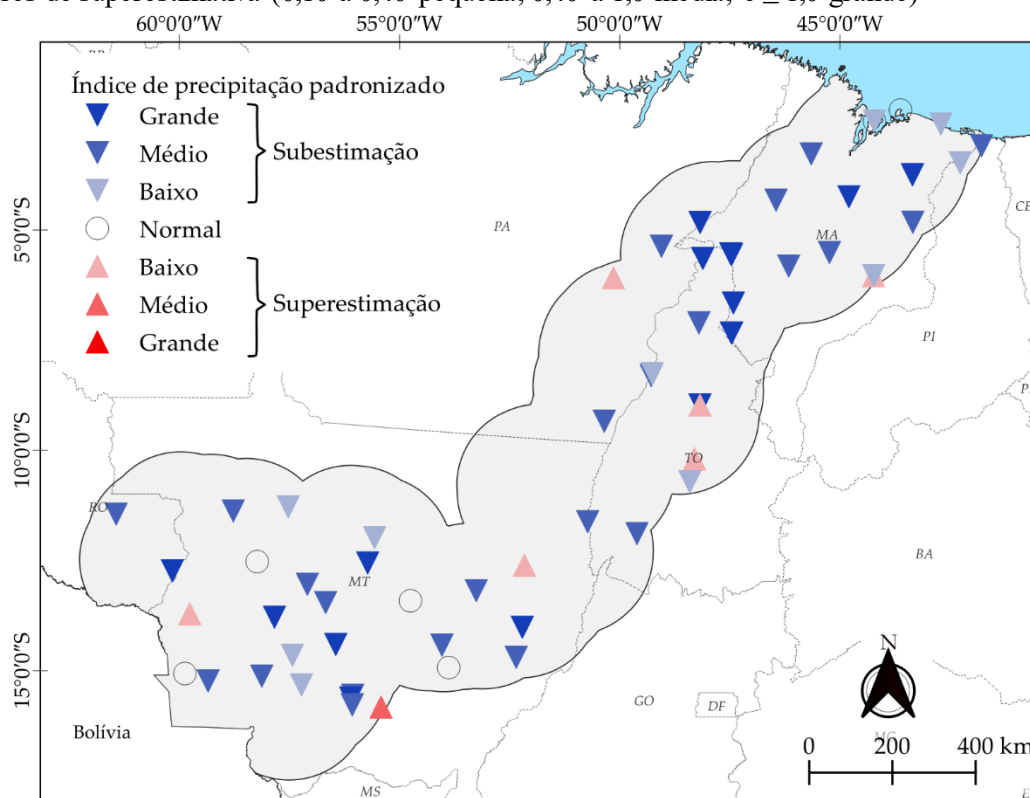
A variabilidade é representada por um gradiente de cores, e os indicadores estatísticos (MBE, RMSE e Willmott) são indicados por símbolos (círculos e triângulos). A referência são os dados medidos nas estações meteorológicas e para interpretação dos índices estatísticos, têm-se: i) MBE - círculos representam valores de 0,99 a -0,99, considerado perfeito; triângulo na cor vermelha, os valores de $1 > 20\%$, indicam subestimativas; e o triângulo invertido, cor azul, valores de $-1 < -35\%$ superestimativa; ii) RMSE, a variação de cores do amarelo ao vermelho (de 0 a 20 ótima dispersão; 20 a 60 dispersão moderada; 60 a 100 grande espalhamento dos erros; iii) d de Willmott, varia em uma escala de 0 a 1 do amarelo ao vermelho (0,9 a 1, 0 excelente; 0,8 a 0,9 ótimo; 0,7 a 0,8 bom; 0,5 a 0,7 regular, e $< 0,5$ ruim).

* A6 sigla OVMS, refere-se à variabilidade espacial observada em dados de estações meteorológicas.

Para facilitar a compreensão das variações dos elementos meteorológicos, adotou-se a avaliação por meio de índices de normalização, tendo como referência as medidas obtidas nas estações meteorológicas. Especialmente para as chuvas, que desempenham papel importante na disponibilidade de água para as plantas e, conseqüentemente, no nível de umidade do material combustível vegetal, foram realizadas análises do Índice de Precipitação Normalizada (SPI), comparando os dados de precipitação diária medidos nas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com estimativas de reanálise do satélite ERA5-Land, no período de 2010 a 2022. Predominantemente, os dados de reanálise subestimaram a precipitação

registrada nas estações meteorológicas, com grandes variações na subestimatação na transição Cerrado-Amazônia. Em 07 estações foram observadas superestimativas, sendo que na estação de São Vicente (MT), observam-se grandes superestimativas, com valor de 0,832 (Figura 13). Essas superestimativas estão associadas a fatores geográficos, especialmente à altitude e à configuração de relevo, sendo que, por exemplo, a estação de São Vicente apresenta a maior altitude da região (786,99 m).

Figura 13. Índice de Precipitação Normalizado: comparação entre dados observados (INMET) e simulados (ERA5-Land) na transição Cerrado–Amazônia, apresentados por símbolos, em um gradiente de cores, sendo triângulo azul invertido os valores subestimados ($< -1,0$ grande; $-1,0$ a $-0,40$ média; $-0,40$ a $-0,10$ pequena), círculos sem preenchimento de cor ($-0,10$ a $0,10$, normal) e triângulo vermelho os valores de superestimativa ($0,10$ a $0,40$ pequena; $0,40$ a $1,0$ média; $\geq 1,0$ grande)



Para os valores de SPI considerados normais, em que os dados de reanálise e as medidas das estações são semelhantes, foram observadas 5 estações, sendo 4 na porção oeste da área de estudo (MT) e 1 no extremo norte do Maranhão (Figura 14).

Ao normalizar as variáveis da temperatura do ar (máxima, média e mínima), da umidade relativa do ar (média e mínima) e da velocidade média do vento, a partir dos dados de reanálise, em relação aos dados medidos em estações meteorológicas, verificou-se que, de modo geral, os valores normalizados variaram de 0 a 1,6; no entanto, o comportamento das variáveis não é

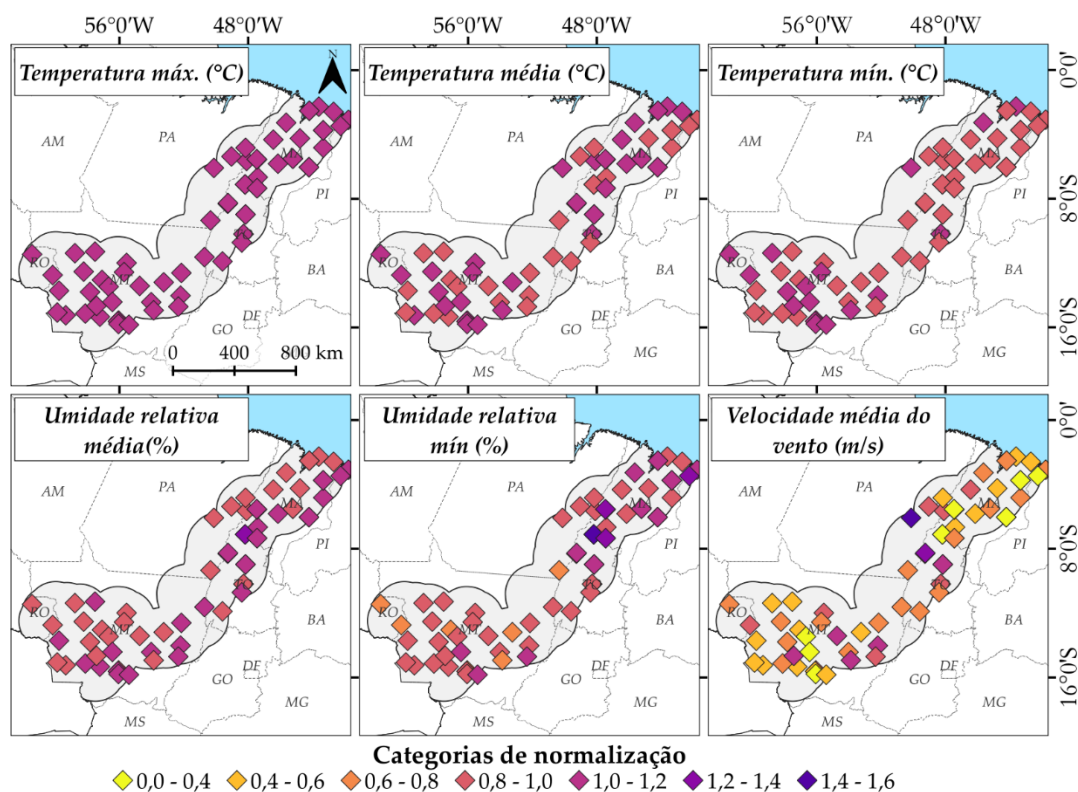
uniforme. Ressalta-se que, quanto mais próximo de zero, menor é a diferença entre os dados observados nas estações meteorológicas e os estimados pela reanálise (Figura 14).

Para a variável temperatura máxima, observou-se homogeneidade entre os valores normalizados, que se mantiveram entre 1,0 e 1,2 °C para todas as estações meteorológicas, enquanto as temperaturas médias e mínimas apresentaram valores normalizados de 0,8 a 1,2 °C; isso indica que Tmax é o componente da temperatura do ar com maior assertividade nas estimativas de reanálise para análises meteorológicas locais e de superfície (Figura 14).

Para a umidade relativa média e mínima diária do ar, predominam valores normalizados entre 0,6 e 1,0, com redução da URmed principalmente na faixa Sul da região de estudo; para a URmin, os valores normalizados chegam a 1,4 na região Nordeste da área estudada (Figura 14).

Em relação à velocidade média do vento, foi a variável com o maior índice de variabilidade espacial nas categorias de normalização; os valores variaram de 0,0 a 1,6 m.s⁻¹. No entanto, também foi a variável com o maior número de estações com diferença menor (de 0,0 a 0,4) entre os dados da estação e os de reanálise (Figura 14).

Figura 14. Categorias de Normalização (razão) das variáveis meteorológicas entre as médias obtidas nas estações meteorológicas e os dados de reanálise ERA-5, na transição Cerrado-Amazônia. Índice categorizado em uma escala de cores



3.3.2 Indicativos estatísticos dos índices de perigo de incêndios entre os dados de reanálise e de estações meteorológicas

O desempenho dos indicadores estatísticos dos índices FMA, FMA+, Angstron, P-EVAP e EVAP/P apresentou variação na região de estudo, que abrange partes dos territórios dos estados do MA, MT, PA, PI, RO e TO (Tabela 14).

Para o indicativo MBE, os dados de reanálise superestimaram os valores observados nas estações, variando de 0,0 a 264,61 para os índices FMA, FMA+ e EVAP/P. Os índices de Angstron e P-EVAP indicaram tendência à subestimativa, variando de -0,001 a -99,8. O indicativo RMSE apresentou um intervalo de 0,7 a 609,4. Quanto ao índice de concordância de Willmott, apresentou bons resultados, com valores entre 0,6 e 0,7 (Tabela 14).

Angstron apresentou desempenho contínuo nos dados observados e estimados, com uma variação do MBE de -0,07 (PI) a 0 (RO), evidenciando um pequeno erro sistemático e um RMSE baixo, que variou entre 0,7 (RO) e 1,0 (PI). O índice de Willmott apresentou variabilidade significativa, com os melhores resultados em Rondônia (0,8) e no Pará (0,7) e o pior desempenho no Tocantins (0,6). Isso demonstra que, apesar de Angstron apresentar estabilidade de baixa variação, sua capacidade de reproduzir com precisão as estimativas observadas oscila significativamente entre os estados da região (Tabela 14).

O índice FMA apresentou uma leve tendência de superestimação em quase toda a área, com MBE de 30,8 (RO) a 76,3 (PI), enquanto os valores de RMSE variaram de 105,4 (PA) a 166 (PI). Os melhores valores de Willmott foram obtidos nos estados de Rondônia e Pará (0,7 e 0,8, respectivamente), o que indicou boa concordância nestes estados, enquanto o pior desempenho foi o do Piauí (0,62). Assim, a FMA mostrou-se mais confiável nos estados do Pará e de Rondônia e apresentou menor precisão no Piauí (Tabela 14).

A FMA+ se destacou pelo melhor desempenho, com valores baixos de MBE, variando de 21,6 (RO) a 61,1 (PI), e menor viés na região oeste da área de estudo (PA, MT, RO). Nos valores de RMSE, a FMA+ também se destacou entre os demais índices, pois apresentou os menores valores, principalmente nos estados do Pará (95,0) e de Rondônia (91,9), o que demonstra alta precisão. O índice de Willmott reforça esse comportamento, com destaque para os estados de Rondônia (0,8), Pará (0,7) e Mato Grosso (0,7). Entretanto, os estados que apresentaram desempenho inferior (PI e TO) ainda obtiveram valores aceitáveis (0,6 e 0,7, respectivamente). Assim, a FMA+ mostrou-se um índice importante e confiável para a análise da estimativa de perigo de incêndios florestais em diferentes condições regionais (Tabela 14).

No índice P-EVAP, o desempenho estatístico do MBE foi negativo em todos os estados da área de estudo, na faixa e na transição, variando de -7,0 em Rondônia a -88,8 no Piauí, o que

evidencia uma subestimação dos dados de reanálise. O RMSE variou na região e apresentou maior dispersão dos erros nos estados da região Norte e Oeste da área de estudo: em Rondônia, 73,9; no Pará, 128,6; e no Piauí, 222,9, o que confirma o menor desempenho nesse estado. Os valores de Willmott em Rondônia (0,8), Tocantins (0,7) e Mato Grosso (0,7) indicaram elevada concordância com os dados observados. O P-EVAP mostrou-se eficiente, especialmente nos estados com menor viés, sendo um índice adequado para o monitoramento em regiões tropicais (Tabela 14).

O índice de perigo de incêndio que apresentou o pior desempenho na análise geral foi o EVAP/P; seus valores de MBE foram consideravelmente elevados, com máximos no Piauí (264,6) e no Maranhão (164,3), o que indica forte superestimação. Assim, o RMSE também seguiu essa tendência, com valores de 212,8 em Rondônia a 609,4 no Maranhão, o que indicou alta variabilidade. Na concordância com Willmott, os menores valores da análise oscilaram de 0,5 no estado do Maranhão a 0,66 no estado de Rondônia (Tabela 14).

Tabela 14. Desempenho estatístico (MBE, RMSE e d'Willmott) dos índices FMA, FMA+, Angstron, P-EVAP e EVAP/P, estimados com dados de estação meteorológica e de reanálise, para a Transição Cerrado-Amazônia, que abrange partes dos territórios dos estados de MA, MT, PA, PI, RO e TO

ÍNDICES	MBE					
	Estados					
	MA	MT	PA	PI	RO	TO
Angstron	-0,014	-0,052	-0,040	-0,070	0	-0,007
EVAP/P	164,26	66,91	123,40	264,61	72,44	109,01
FMA	46,48	32,50	33,04	76,34	30,85	31,14
FMA+	35,94	22,24	22,20	61,13	21,6	28,40
P-EVAP	-40,73	-15,86	-35,69	-88,835	-6,96	-37,88
ÍNDICES	RMSE					
	Estados					
	MA	MT	PA	PI	RO	TO
Angstron	0,764	0,916	0,815	1,02	0,72	0,91
EVAP/P	609,42	281,32	340,75	554,9	212,80	290,75
FMA	132,65	129,97	105,45	166,05	106,56	126,48
FMA+	121,09	120,35	95,02	154,56	91,91	130,03
P-EVAP	169,28	115,45	128,57	222,94	73,88	140,87
ÍNDICES	“d” Willmott					
	Estados					
	MA	MT	PA	PI	RO	TO
Angstron	0,74	0,73	0,75	0,71	0,79	0,63
EVAP/P	0,49	0,57	0,60	0,54	0,66	0,61
FMA	0,69	0,72	0,76	0,62	0,74	0,73
FMA+	0,71	0,74	0,765	0,65	0,80	0,72
P-EVAP	0,73	0,74	0,725	0,70	0,83	0,73

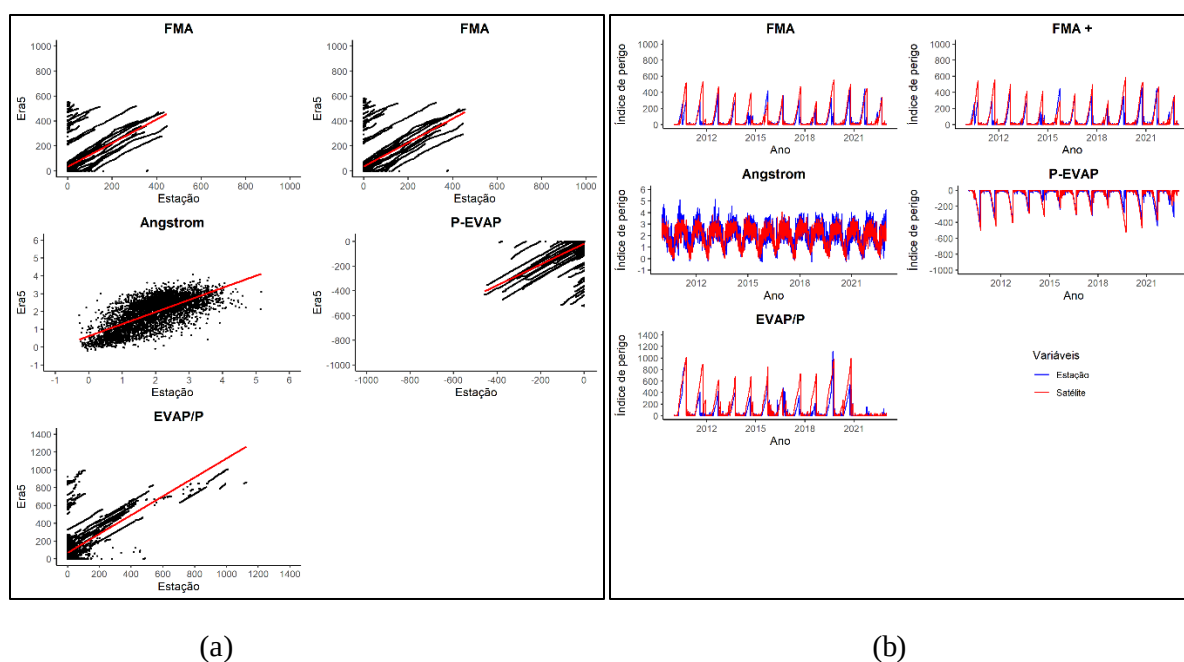
A distribuição gráfica dos índices estimados a partir das estações meteorológicas e dos dados de reanálise permitiu visualizar e comparar o comportamento dessas estimativas (Figura

15). Em Vilhena, por exemplo, todos os índices apresentaram períodos de estabilidade no perigo de incêndio, seguidos por picos de maior perigo, padrão que reflete diretamente a variação pluviométrica: durante os meses mais chuvosos (outubro a março), o perigo diminui, enquanto no período seco (abril a setembro), aumenta significativamente (Figura 15b).

Observou-se também que o índice Angstrom se destaca pela menor dispersão dos dados em comparação com os demais índices (Figura 15a), com RMSE de 0,66, enquanto FMA, FMA+, P-EVAP e EVAP/P apresentaram RMSE de 105,39, 110,82, 76,13 e 176,92, respectivamente. O índice Angstrom também apresentou o menor viés, com MBE=0 e coeficiente de Willmott de 0,83, o que indica concordância entre a estimativa do índice a partir dos dados de estação e dos de reanálise.

Notou-se também a tendência geral de superestimativa dos índices calculados a partir dos dados de reanálise em relação às estações, particularmente nos momentos de pico. O índice de Angstrom constitui uma exceção a esse padrão, apresentando uma subestimativa sistemática, inclusive durante os picos de perigo (Figura 15a).

Figura 15. Dispersão (a) e variação interanual (b) dos índices de perigo de incêndio obtidos a partir de dados medidos pela estação meteorológica e de reanálise para a estação de Vilhena (RO), na Transição Cerrado-Amazônia. Os gráficos das demais estações meteorológicas podem ser visualizados no material suplementar, nas Figuras S1(a) e (b)



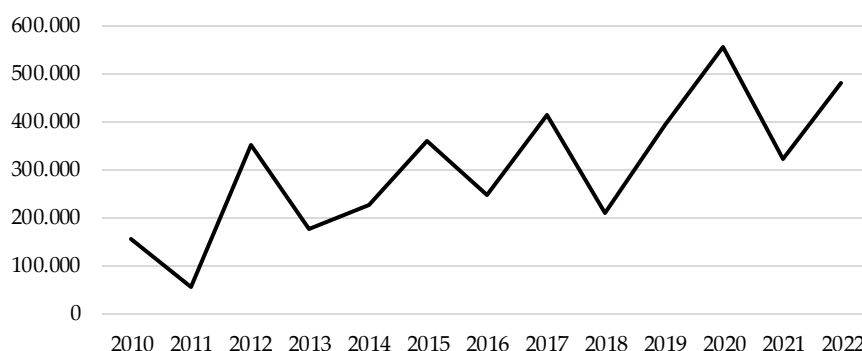
3.3.3 Distribuição Espacial e Sazonal dos Focos de Calor

Com base nos dados do BDQueimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de 2010 a 2022, foram registrados 3.936.006 focos de calor na região analisada.

Durante esses 12 anos, o menor número de focos foi observado em 2011, com 55.399, enquanto o maior foi em 2020, com 555.866. Os anos com o maior número de focos de calor foram 2020 e 2022, totalizando 1.034.223 ocorrências (Figura 16).

Ao longo da série histórica, observou-se uma flutuação interanual no número de focos de calor, com quedas e aumentos sucessivos. No entanto, apesar dessas variações sazonais, os dados revelam uma tendência de crescimento no número de ocorrências, o que fica evidente ao comparar os anos iniciais e finais do período analisado: enquanto de 2010 a 2014 a média anual foi de aproximadamente 190 mil focos, nos últimos três anos (2020-2022) a média saltou para cerca de 452 mil ocorrências anuais, um aumento de 42% no número de focos (Figura 16).

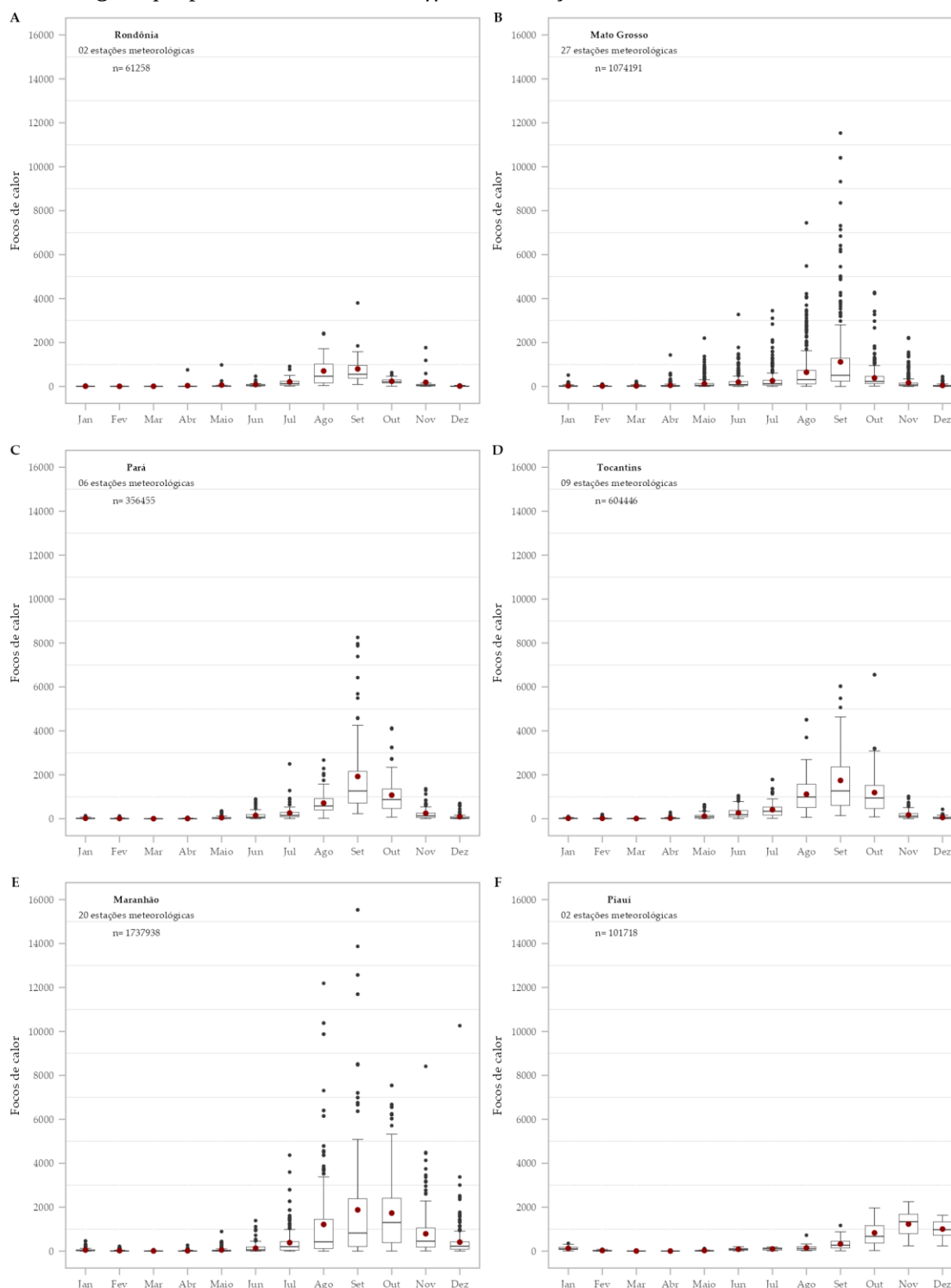
Figura 16. Totais anuais de focos de calor na região de transição Cerrado-Amazônia, de 2010 a 2022.



A sazonalidade dos focos de calor ao longo do ano evidenciou claramente a influência do regime de precipitação, com maior concentração de ocorrências no período de menor índice pluviual (de maio a setembro). Os picos foram observados principalmente em agosto e setembro, meses que marcam o final da estação seca e caracterizam-se por valores mais baixos de umidade relativa do ar (Figura 17). Essa relação torna-se particularmente evidente ao comparar as variáveis meteorológicas com a distribuição espacial dos focos (Figura 17), especialmente nos estados de Rondônia e Mato Grosso. Padrões distintos foram observados nos estados do Pará, Tocantins e Maranhão, nos quais os meses de maior ocorrência se estendem de agosto a outubro, uma variação atribuída à distribuição latitudinal das estações meteorológicas e aos diferentes regimes pluviométricos nessas latitudes. No Piauí, representado por duas estações, a sazonalidade das chuvas evidenciou uma estiagem bem definida de julho a novembro, período que coincide integralmente com a temporada de maior incidência de focos de calor (Figuras 10 e 17).

Nos estados de Mato Grosso e Maranhão, foi encontrado o maior acumulado de focos de calor, com valores mais expressivos, maior dispersão e presença de valores anômalos, indicando a ocorrência de eventos extremos com múltiplos focos simultâneos (Figura 17).

Figura 17. *Boxplots* da distribuição mensal do número de focos de calor (*hotspots*) registrados nos estados da região que pertencem à área do *buffer* na transição Cerrado-Amazônia



Rondônia (A), Mato Grosso (B), Pará (C), Tocantins (D), Maranhão (E) e Piauí (F) no período de 2010 a 2022. No *Boxplot*, a caixa representa o intervalo interquartil; a linha no interior da caixa é a mediana; as hastes são os limites inferior e superior; os pontos externos à caixa são os valores anômalos; e o ponto interno é a média dos focos de calor ao longo dos meses do ano, no período de 2010 a 2022, para os estados.

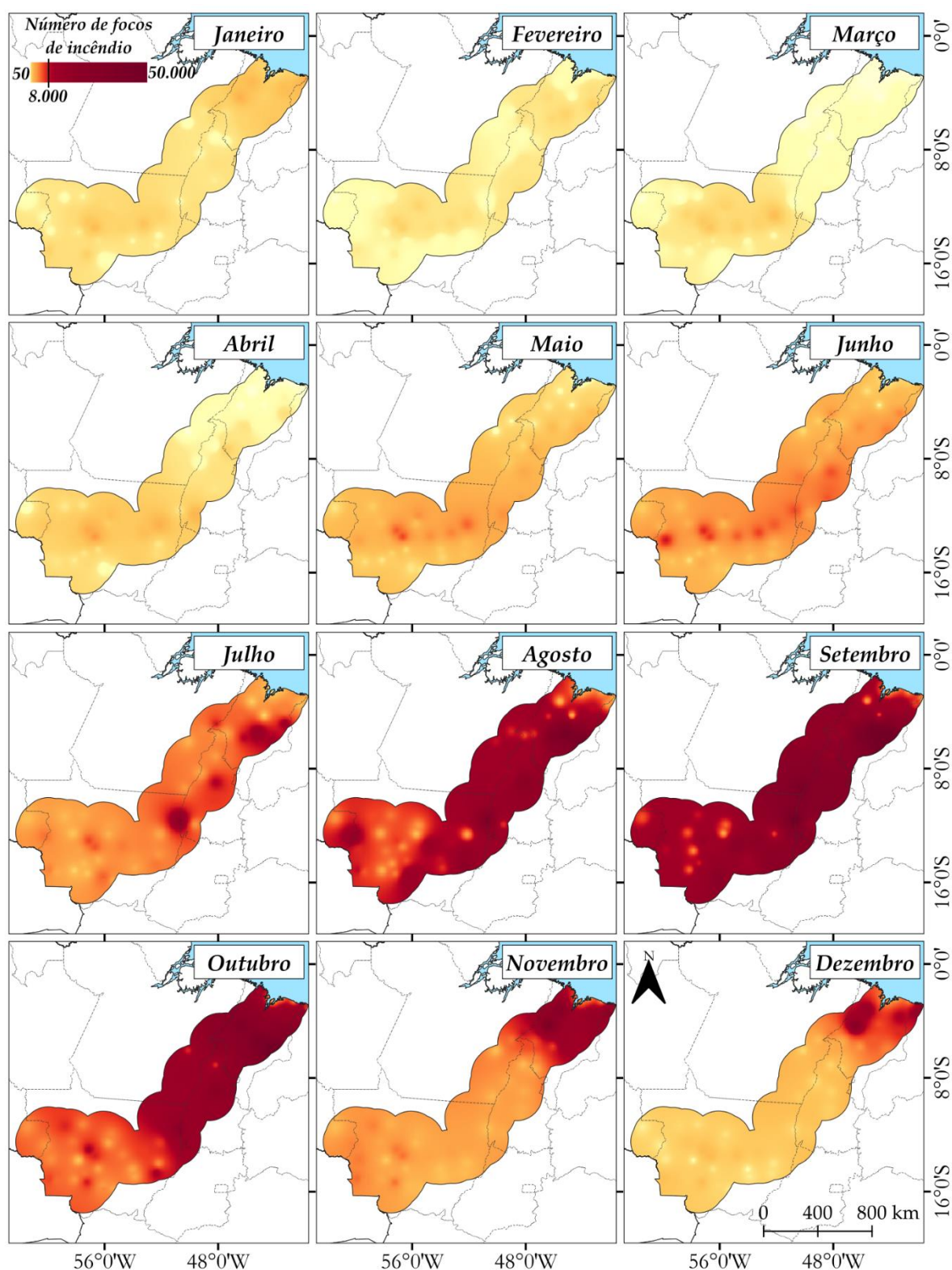
* n - número de focos e de estações por estado.

A Figura 18 ilustra a distribuição espacial e temporal dos focos de calor na região de transição Cerrado-Amazônia, evidenciando padrões sazonais e a heterogeneidade na ocorrência desses focos. Enquanto os tons mais claros indicam menor atividade de fogo, os tons mais escuros destacam áreas críticas, principalmente a partir de maio, corroborando os dados quantitativos apresentados na Figura 10. Nota-se que a distribuição não é uniforme ao longo do ano, com variações marcantes entre os períodos de maior e menor incidência. De fevereiro a abril, a redução de focos na porção norte e nordeste da área de estudo coincide com o pico de precipitação na região, reforçando a relação inversa entre a umidade e a ocorrência de incêndios.

Além disso, a Figura 18 evidencia que, embora agrupe os focos por estados, sua distribuição espacial não é totalmente homogênea. Esse padrão é particularmente evidente no estado do Maranhão, onde o aumento dos focos começa em junho e persiste até dezembro. No entanto, mesmo nesse período, a intensidade dos focos não se distribui uniformemente ao longo do território; essa heterogeneidade espacial e temporal influencia o estado com o maior acumulado de focos de calor (Figura 18).

No Mato Grosso, os meses de agosto e setembro concentram os maiores acumulados de focos de calor. Entretanto, observou-se um padrão distinto na região nordeste do estado, na divisa com Tocantins, onde o aumento dos focos iniciou-se precocemente em junho, intensificou-se significativamente em julho, diferentemente do restante do estado, que só começou a diminuir a partir de novembro (Figura 18).

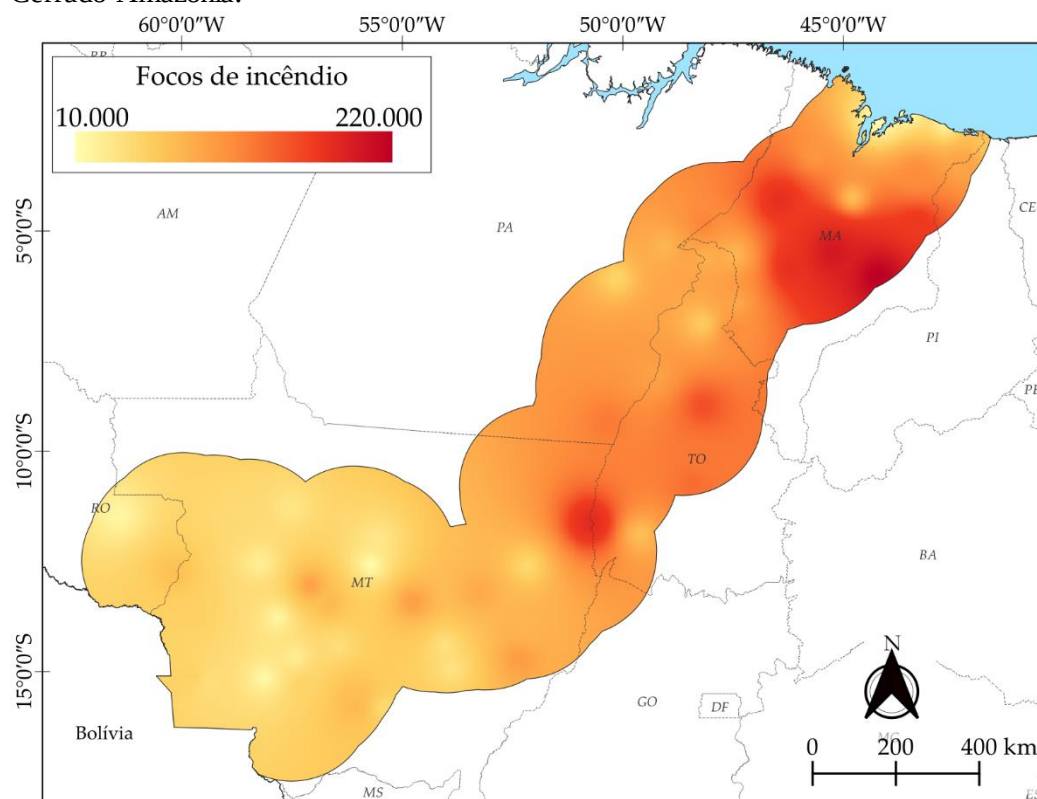
Figura 18. Distribuição mensal dos focos de calor na transição Cerrado-Amazônia no período de 2010 a 2022



A Figura 19 apresenta a distribuição espacial dos focos de calor na área de estudo. O mapa mostra a densidade dos focos, representada por uma escala de cores que varia do amarelo, com média de 10.000 focos, considerada menor concentração, ao vermelho escuro, com alta concentração, de até 220.000 focos.

A maior intensidade dos focos de calor concentra-se nos estados do Maranhão, na porção leste do Tocantins e no nordeste do Mato Grosso. Regiões que apresentam a tonalidade vermelha mais escura, evidenciando elevada incidência de focos, podem estar associadas à dinâmica climática regional e a atividades antrópicas. Enquanto a região oeste de Mato Grosso e parte sul do Tocantins apresentaram uma tonalidade amarela, caracterizada por menor densidade de focos de calor. Esta diversidade espacial reflete a dinâmica de uso e cobertura da terra e a condição de conservação das florestas, considerando o menor número de focos identificados (Figura 19).

Figura 19. Distribuição espacial do total de focos de calor do período de 2010 a 2022, na transição Cerrado-Amazônia.



3.3.4 Desempenho dos Índices de Perigo de Incêndios

3.3.4.1 Acerto nas previsões e porcentagem de sucesso

O acerto nas previsões (AP) de perigo de incêndio na região de transição Cerrado-Amazônia variou de 0 a 100%. Os máximos gerais foram de 63 a 100%, enquanto os mínimos oscilaram entre 0 e 33,1% (Figura 20).

Nas estações meteorológicas, o índice EVAP-P apresentou o valor máximo de 0,100 e o índice Angstron, de 0,63. Com os dados de reanálise, os valores máximos foram de 0,89 para

o índice P-EVAP e de 0,00 para o EVAP-P. Os valores mínimos variaram de 0,0 a 0,27 nas estações e de 0,0 a 0,33 na reanálise. O índice P-EVAP obteve o melhor desempenho geral, destacando-se como o mais eficiente tanto com dados de estação quanto com dados de reanálise. Os melhores e piores resultados foram registrados na parte oeste da área de estudo, mais especificamente nas estações de Diamantino (0,0%) e de Padre Ricardo Remetter (100%), ambas no estado de Mato Grosso. Considerando os dados de reanálise, o melhor AP também foi observado em Padre Ricardo Remetter (100%) no Mato Grosso, enquanto o pior desempenho foi associado à estação de Araguaína (0,0%), no estado do Tocantins (Figura 20). Esses resultados ressaltam a variabilidade na previsão de acertos entre os índices analisados.

A análise do índice FMA revelou taxas de acerto nas previsões de perigo de incêndio (AP) de 26,6 a 82,5% na região de estudo. Nos dados de estações meteorológicas, os valores variaram de 27,9 a 81,6%, com o melhor desempenho registrado na estação de Chapadinha e o pior na de Farol de Santana, ambas localizadas no Maranhão. Nos dados de reanálise, os resultados de AP oscilaram de 26,6 a 82,5%, com o maior acerto observado em Pedro Afonso e o menor, novamente, em Farol de Santana (MA). Os resultados da reanálise do AP na FMA mostraram uma variação de 27 a 80%, com porcentagens de sucesso de 54,5 a 78,2% (Figura 20).

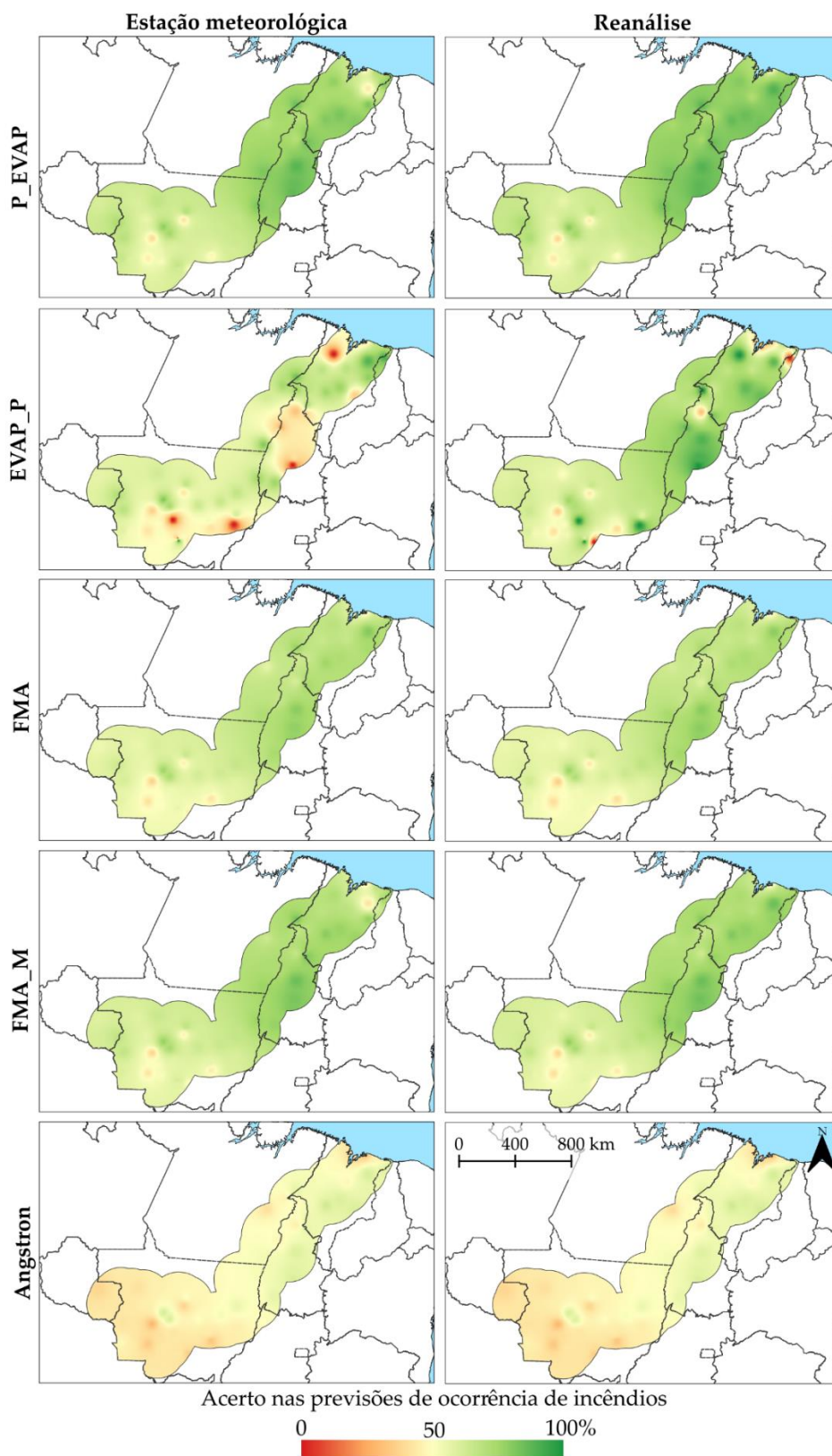
O acerto nas previsões (AP) do índice FMA+ variou de 0 a 85% na estação e de 30 a 86% nos dados de reanálise. Os acertos de previsão da FMA+ foram de 0% em Chapadinha (MA) e de 85% em Pedro Afonso (TO), ambos na região Nordeste da área de estudo. Nos resultados de reanálise, a pior porcentagem de sucesso foi de 30% em Farol de Santana (MA) e a melhor, de 86%, em Pedro Afonso (TO) (Figura 20).

No índice de Angstron, para toda a área de estudo, o acerto nas previsões (AP) variou de 18,7 a 63,4% com base nos dados das estações meteorológicas; as menores e maiores porcentagens foram registradas em Farol de Santana e Grajaú (MA), respectivamente. Ao se considerar os dados de reanálise, a variação observada foi de 18,5 a 63,4%, tendo como localidades representativas Farol de Santana e Colinas, ambos no estado do Maranhão (Figura 20).

O índice P-EVAP apresentou ampla variação na taxa de acertos das previsões de perigo de incêndio. Com base nos dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os valores oscilaram entre 0 e 89,2%, com os extremos registrados em Chapadinha (MA) e Pedro Afonso (TO). Utilizando os dados de reanálise, os índices de acerto variaram entre 33,1 e 89,8%, com os menores valores observados em Farol de Santana (MA) e os maiores em Chapadinha (MA) (Figura 20).

Os melhores resultados na avaliação dos índices de perigo de incêndio foram obtidos na região norte da área de estudo, com base em dados de estações meteorológicas e de reanálise. Os índices P-EVAP, FMA e FMA+ destacaram-se, com o P-EVAP apresentando o melhor desempenho nos dados de reanálise. Entre 2010 e 2022, esses índices também registraram o maior número de acertos, com o P-EVAP à frente, seguido pelos índices FMA e FMA+ (Figura 20).

Figura 20. Espacialização dos acertos nas previsões de ocorrência de incêndios (AP), conforme o método *skillscore*, da relação entre os índices de incêndio e os focos de incêndio, utilizando variáveis de estações meteorológicas e dados de reanálise



A porcentagem de sucesso (PS) na transição Cerrado-Amazônia variou de 18 a 89% ao longo do período, em toda a área de estudo (Figura 21).

No índice EVAP/P, considerando os dados da estação e da reanálise para a região, os valores de PS variaram de 40,0% a 77,4%. Os melhores percentuais foram observados em

Chapadinha (MA) e Palmas (TO), enquanto os piores foram registrados em Porto Nacional (TO) e Chapadinha (MA), tanto nos dados de estação quanto nos de reanálise.

No índice FMA, os estados do Maranhão e do Tocantins destacaram-se como os com as melhores porcentagens de sucesso (PS) nos dados das estações, com valores de 0,71 e 0,73%, respectivamente. Nos dados de reanálise, os resultados obtidos na mesma região foram de 81,8 e 56,1%. Na porção oeste do território, incluindo o estado de Mato Grosso, a taxa de sucesso variou de 50% nos resultados de estação e 68% na reanálise (Figura 21).

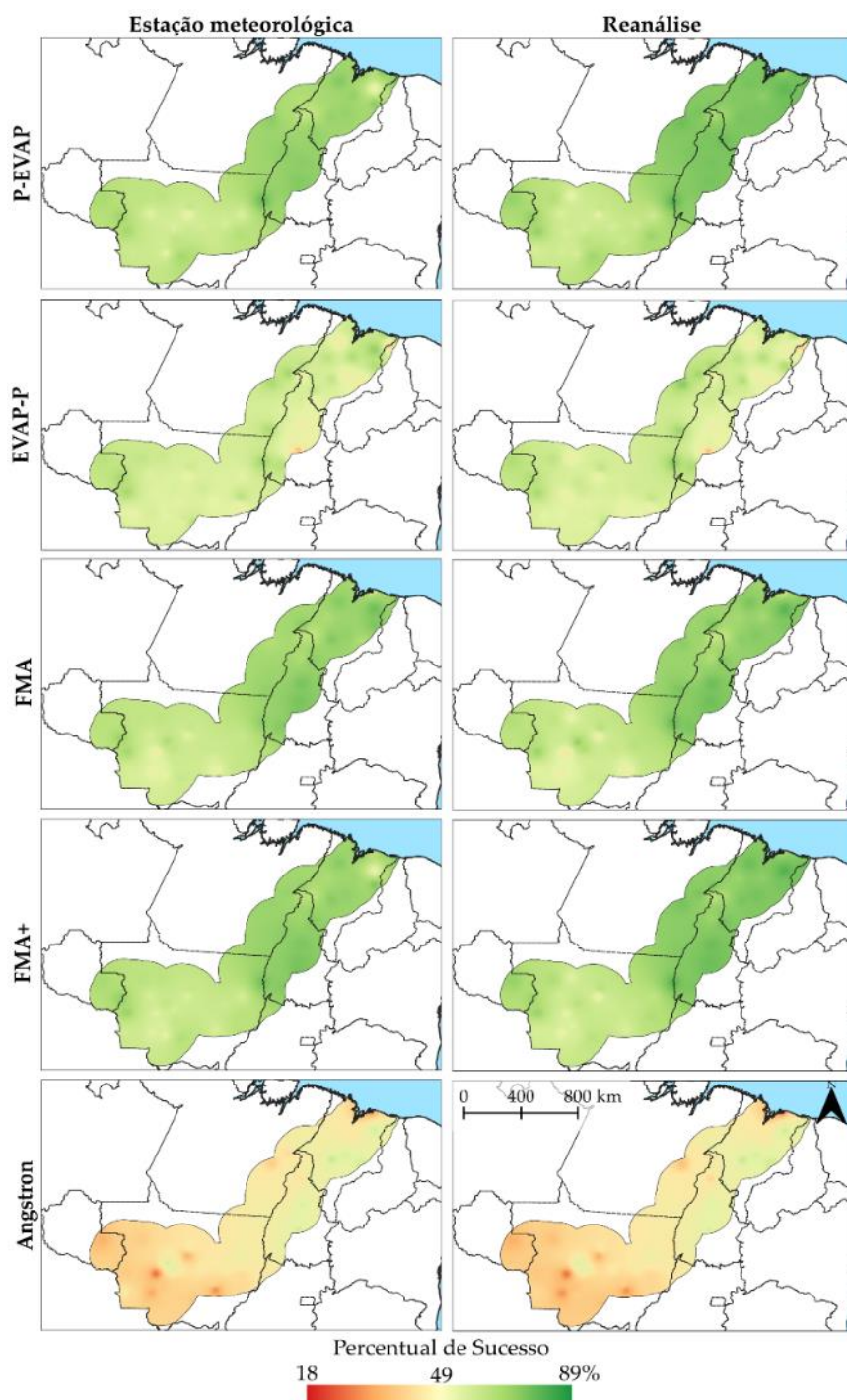
O índice obtido pela Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) apresentou uma porcentagem de sucesso (PS) que variou de 39 a 77%, com as melhores porcentagens nas estações da região Norte da área de estudo, nos estados do Maranhão, Tocantins e Piauí; entretanto, nos dados de reanálise, os valores variaram de 56 a 82%, com o melhor em Chapadinha (MA) e o pior em Sorriso (MT) (Figura 21).

Em Angstron, a porcentagem de sucesso oscilou de 19,6 a 63,4% ao utilizar dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrados em Farol de Santana e Grajaú (MA). Por outro lado, na reanálise, os valores variaram de 18,5 a 65,2%, sendo Farol de Santana e Colinas (MA) os destaques (Figura 21).

No índice P-EVAP, a porcentagem de sucesso (PS) apresentou ampla variação na taxa de acertos das previsões de perigo de incêndio, variando de 38,9 a 78,7% nos dados das estações, com Chapadinha (MA) apresentando o menor índice e São Félix do Araguaia (MT) o maior. Para os dados de reanálise, a PS apresentou variação entre 58,1 e 80,3%, destacando-se as localidades de Juara e São Félix do Araguaia, ambas no estado de Mato Grosso (Figura 21).

A porcentagem de sucesso dos índices de perigo indicou que os melhores desempenhos foram obtidos pelos modelos FMA+, FMA e P-EVAP, especialmente na porção norte e nordeste da região, que compreende os estados do Tocantins e do Maranhão. Os maiores valores foram obtidos com dados provenientes de reanálise do índice P-EVAP, que alcançou 70% de sucesso ao utilizar tanto os dados de reanálise quanto os das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 21).

Figura 21. Espacialização da Porcentagem de Sucesso (PS) da relação entre os índices de perigo de incêndio e os focos de incêndio, utilizando variáveis provenientes de estações meteorológicas e de dados de reanálise



3.3.4.2 Skill Score na região de estudo na transição Cerrado-Amazônia

A Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) e o índice P-EVAP apresentaram os melhores resultados no *Skill Score* na análise do perigo de incêndio na área de estudo (Tabela 15). O *Skill Score* (SS) dos índices de estação e de reanálise apresentou uma variação de -0,57 a 0,74 ao longo de toda a transição Cerrado-Amazônia, com o valor máximo observado no índice P-EVAP, em São Vicente (MT), com dados de reanálise, e o mínimo em Angstron, em Campo Novo do Parecis (MT), com dados de estação (Tabela 15).

A média do índice (*Skill Score*) do EVAP-P em toda a área de estudo foi de 0,34 com os dados das estações e de 0,30 com os dados de reanálise (Tabela 14). Os valores máximos foram observados na estação de São Vicente (MT), atingindo 0,73 no cálculo do índice com base nas variáveis meteorológicas da estação e 0,74 ao considerar os dados de reanálise. Os valores mínimos foram de -0,37 na estação e de -0,43 na reanálise, ambos em Campo Novo do Parecis (MT) (Tabela 15).

Nos dados observados, o índice EVAP-P apresentou um skill score de 0,43 para o estado do Mato Grosso, Pará (0,37), Maranhão e Tocantins (0,26), Piauí (0,17) e Rondônia (0,14), enquanto, na reanálise, os valores oscilaram de 0,39 a 0,16, sendo Mato Grosso (0,39), Pará (0,34), Maranhão (0,24), Tocantins (0,22), Piauí (0,16) e Rondônia (0,17) (Tabela 15).

Para a FMA+, obteve-se um *Skill Score* de 0,38 com dados das estações e de 0,40 com dados de reanálise. Os valores máximos foram 0,53 na estação e 0,62 na reanálise; os mínimos foram -0,40 e -0,42, respectivamente. Os valores máximos foram obtidos em Chapadinha (MA) e Palmas (TO), e os mínimos, tanto na estação quanto na reanálise, em Campo Novo do Parecis (MT). Considerando os índices com dados obtidos na estação e na reanálise, os estados obtiveram médias do *Skill Score* da FMA+ no Mato Grosso (0,32 e 0,30), no Pará (0,45 e 0,50), no Maranhão (0,40 e 0,48), no Tocantins (0,47 e 0,50), no Piauí (0,43 e 0,51) e em Rondônia (0,38 e 0,47) (Tabela 15).

O P-EVAP, a média do índice *Skill Score*, foi de 0,40 com os dados das estações e de 0,45 com os de reanálise. Com valores máximos na estação de 0,52 em Chapadinha (MA) e na reanálise de 0,59 em Palmas (TO), e valores mínimos de -0,34 e -0,37, na estação e na reanálise, ambos em Campo Novo do Parecis (MT). A média do *Skill Score* dos índices obtidos na estação e na reanálise, por estado inserido na área de estudo, foi de 0,38 para o Mato Grosso, 0,43 e 0,51 para o Pará, 0,40 e 0,52 para o Maranhão, 0,45 e 0,50 para o Tocantins, 0,46 e 0,54 para o Piauí e 0,38 e 0,47 para o Rondônia (Tabela 15).

O índice (*Skill Score*) calculado foi de 0,01 para Angstron com base nos dados das estações e de 0,08 ao considerar os dados de reanálise. Os valores máximos foram de 0,11 na estação de Colinas (MA) e 0,20 na reanálise de Imperatriz (MA); no entanto, os menores valores observados na estação e na reanálise (-0,34 e -0,37) foram registrados em Campo Novo do Parecis (MT). O *Skill Score* de Angstron para os estados de Mato Grosso (0,00 e -0,01), Pará (0,01 e 0,01), Maranhão (0,02 e 0,04), Tocantins (0,03 e 0,00), Piauí (0,02 e 0,03) e Rondônia (0,01 e 0,03). Esses resultados destacam a influência das diferentes fontes de dados no desempenho do índice de Angstron e nas estimativas de previsão de incêndios (Tabela 15).

A média do *Skill Score* na FMA foi de 0,35, calculada com base nos dados de estação e de reanálise da região. Os valores máximos variaram de 0,53 na estação e de 0,57 na reanálise, ambos para a localidade de Chapadinha, e os valores mínimos foram de -0,46 e -0,49, respectivamente, na estação e na reanálise, para a localidade de Campo Novo do Parecis (MT). Na análise da FMA para os estados inseridos no écotono, observam-se Mato Grosso (0,25 e -0,22), Pará (0,43 e 0,47), Maranhão (0,41 e 0,43), Tocantins (0,45 e 0,47), Piauí (0,42 e 0,42) e Rondônia (0,37 e 0,43) (Tabela 15).

Tabela 15. Média do *Skill Score* dos índices de perigo de incêndio na área de estudo

Índices de Perigo	Estação Meteorológica	Reanálise
FMA	0,35	0,35
FMA+	0,38	0,40
Angstron	0,01	0,08
P-EVAP	0,40	0,45
EVAP-P	0,34	0,30

3.4 Discussão

A transição Cerrado-Amazônia no Brasil é considerada a maior transição savana-floresta do mundo (Marques et al., 2020) e é identificada como Zona de Tensão Ecológica (ZTE) devido à instabilidade e à variação climáticas permanentes e à hiperdinâmica da vegetação (Souto; Freitas; Martins, 2021). Os incêndios que ocorrem na região de transição Cerrado-Amazônia ameaçam ambos os biomas, Cerrado e Amazônia (Marques et al., 2020). Além destas particularidades, a região está localizada na fronteira agrícola brasileira e é conhecida internacionalmente como o “Arco do Desmatamento” (Marques et al., 2020). Neste contexto, os índices FMA (Fórmula de Monte Alegre), FMA+ (Monte Alegre Modificada), Angstron, P-EVAP e EVAP/P são utilizados como ferramentas essenciais para prever e monitorar a ocorrência de incêndios (Casavecchia et al., 2019; Souza; Casavecchia; Stangerlin, 2012). A análise desses índices na transição Cerrado-Amazônia mostrou que a combinação de baixa umidade, altas temperaturas e alta velocidade do vento contribui para o aumento do perigo de incêndios florestais (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021).

Na área de estudo, ao avaliar o desempenho dos índices, o P-EVAP se destacou como o modelo preditivo mais preciso e confiável para o perigo de incêndio, seguido pelos índices FMA e FMA+, que apresentaram os maiores acertos na previsão de ocorrência de incêndios. Beu (2022), ao avaliar o perigo de incêndios na Floresta Nacional de Ipanema (Flona de Ipanema/SP) com dados meteorológicos da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), indicou que a Fórmula de Monte Alegre modificada (FMA+) é a ferramenta adequada para as atividades de prevenção e combate a incêndios florestais. Apesar

da análise ter sido conduzida em um domínio fitogeográfico distinto, os resultados demonstram a confiabilidade e a eficiência do índice.

No trabalho desenvolvido por Casavecchia et al. (2019), o índice que apresentou o melhor desempenho foi o Angstron, seguido por FMA e FMA+ na região de Sinop-MT, área de transição entre Amazônia e Cerrado. Enquanto na área de estudo o índice FMA pode ser uma alternativa intermediária, Angstron e EVAP/P apresentaram alta variabilidade, indicando menor confiabilidade e podendo ser utilizados com cautela, devido à menor precisão e reprodutibilidade na região.

As condições meteorológicas específicas da região, como a redução da precipitação, a baixa umidade do ar e as temperaturas elevadas, contribuem para a secagem do material combustível. Essa combinação, associada aos focos de calor, proporciona uma visão dos fatores determinantes dos incêndios na transição Cerrado-Amazônia (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021).

Um estudo realizado por Casavecchia et al. (2019) observou que os índices de perigo obtidos na Fórmula Monte Alegre (FMA) e na Fórmula Monte Alegre Modificada (FMA+), na transição Cerrado-Amazônia, apresentaram dependência cumulativa do número de dias sem chuva, o que pode causar erros de predição quando ocorrem acumulados menores de precipitação, corroborando o presente estudo. As mudanças nos regimes de chuvas e na umidade relativa foram os fatores que mais influenciaram o desempenho dos índices. A FMA, bem como outros índices de perigo de incêndio que utilizam dados meteorológicos, são importantes e eficazes; no entanto, dependendo da região de estudo, é necessário ajustar as classes de perigo (Casavecchia et al., 2019).

O índice EVAP/P apresentou limitações significativas em sua capacidade preditiva na região de estudo, com alguns locais apresentando valores elevados de RMSE e baixa concordância de Willmott. Quando avaliado por meio da metodologia *Skill Score*, que mensura a qualidade dos sistemas de previsão e valida os índices gerados, embora demonstre precisão na identificação de não ocorrências de incêndio, sua baixa sensibilidade para detectar eventos reais de incêndio compromete sua confiabilidade preditiva. Essas deficiências sugerem que a relação simplificada entre evapotranspiração e precipitação no ERA5-Land falha em capturar a complexidade da interface biosfera-atmosfera na transição Cerrado-Amazônia, especialmente em áreas de relevo acidentado (Santos-Júnior et al., 2022). Portanto, os resultados deste índice devem ser interpretados com cautela, priorizando-se os indicadores com maior robustez estatística.

Por meio da análise meteorológica local, é possível determinar os períodos com maior probabilidade de ocorrência de incêndios (Ramalho et al., 2021b; Sari, 2021). Isso demonstra que, ao analisar a influência destas variáveis meteorológicas sobre os incêndios, é preciso entender o comportamento de todas as variáveis (Alves et al., 2021; Souto; Freitas; Martins, 2021), pois a explicação do aumento ou não dos incêndios pode estar relacionada ao conjunto de variáveis meteorológicas (Ramalho et al., 2021a; Sari, 2021). Por esse motivo, é importante conhecer as principais variáveis meteorológicas e suas relações com os incêndios, o que aumenta a eficiência na análise de índices de perigo de incêndio e na elaboração de planos de mitigação e de combate a incêndios florestais (Vicente-Serrano et al., 2020; Souto; Freitas; Martins, 2021).

Os focos de calor, detectados por sensores de satélite, representam pontos de alta temperatura na superfície terrestre, frequentemente associados a queimadas (autorizadas ou não autorizadas) e incêndios florestais. A análise dos índices meteorológicos, em conjunto com os dados de focos de calor, permite um monitoramento mais eficiente das áreas de maior risco, auxiliando no planejamento de estratégias preventivas e de ações de combate a incêndios (Vicente-Serrano et al., 2020).

Os estados com o maior número de focos foram Mato Grosso e Maranhão. No caso de Mato Grosso, este cenário é particularmente preocupante, pois a área em questão abrange a região do Parque Estadual do Araguaia, importante unidade de conservação da biodiversidade, onde os incêndios podem comprometer severamente os processos ecológicos e a preservação da biota local. Tais resultados podem ser explicados pelo maior número de estações meteorológicas que cada Estado possui neste trabalho e pelo somatório das áreas de cobertura de cada uma dessas estações, que serve para contabilizar o quadrante dos focos de calor, conforme metodologia já descrita.

No presente estudo, 88% dos focos de calor foram registrados entre julho e novembro, com destaque para agosto, que registrou o maior número de ocorrências. Desse total, 36% dos focos ocorreram em setembro e 24% em outubro, concentrando-se principalmente nesses meses. Esse comportamento está diretamente relacionado à dinâmica das variáveis meteorológicas predominantes nesse período, caracterizadas por baixa umidade relativa do ar e altas temperaturas na região analisada, fatores que contribuem para o aumento da incidência de focos de calor.

Esses resultados destacam a sazonalidade climática típica das regiões tropicais, marcada por uma estação chuvosa no verão e uma estação seca bem definida no inverno, o que impacta diretamente a umidade do ar e a variabilidade térmica e, consequentemente, o perigo de

incêndios na vegetação (Lima et al., 2021). Embora seja considerada a mesma região de transição de biomas, essa sazonalidade é controlada por sistemas de movimento atmosférico de mesoescala, que, por sua vez, são influenciados pelo Equador, pelo Oceano Atlântico e pela Cordilheira dos Andes (Brando et al., 2014; Lima et al., 2021).

Lima et al. (2021) também observaram que, nos meses mais secos, a incidência de focos de calor aumenta, sendo os meses de agosto a novembro os mais críticos de 2016 a 2019 no estado do Pará. No entanto, não há um padrão anual; os fatores climáticos, como o fenômeno do El Niño, devem ser considerados na tomada de decisão sobre queimadas e incêndios florestais (Barni et al., 2021; Silva-Júnior et al., 2022; Aragão et al., 2023).

Na análise dos focos de calor registrados ao longo dos anos na área de estudo, observou-se que, de janeiro a maio, os focos são dispersos e apresentam baixa intensidade, o que se justifica pela maior disponibilidade de chuva e pela maior umidade relativa do ar, fatores que favorecem a propagação do fogo.

Em junho, ocorre um aumento progressivo no número de focos, que se intensifica nos meses seguintes. De julho a outubro, verificou-se o maior número de registros, com distribuição espacial significativa e alta densidade de focos, com destaque para o sul e o centro do estado do Pará, o norte do Mato Grosso, o Maranhão e o Tocantins, regiões que apresentaram o maior número de ocorrências, podendo ultrapassar 50 mil registros mensais em alguns pontos dessas regiões. Com pico de atividade em agosto e setembro, caracterizado pelos meses mais secos do período de estiagem severa, quando a combinação de temperaturas elevadas, baixa umidade e atividades antrópicas (desmatamento e manejo da terra com uso do fogo) colabora substancialmente para a propagação dos incêndios (Alves et al., 2021; Lima et al., 2021; Silva-Junior et al., 2022).

Embora parte dos estados do Maranhão, do Tocantins e do Piauí ainda apresente alta concentração de focos no mês, houve uma redução em comparação com os meses anteriores, o que indica o retorno das chuvas. Em dezembro, houve uma diminuição radical dos focos, com distribuição próxima à do início do ano, o que marca o fechamento anual do ciclo de focos.

A sazonalidade observada reforça a condição de vulnerabilidade da região durante o período de estiagem, bem como a necessidade de uma legislação eficiente e rigorosa, com estratégias de monitoramento contínuo, a fim de mitigar o risco de incêndios e os impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes deles.

A concentração de focos nessa região evidencia a necessidade de políticas públicas eficientes, voltadas à mitigação do desmatamento e ao controle de queimadas, integrando monitoramento e fiscalização ambiental, com o objetivo de conservar os recursos naturais, bem

como manter os serviços ecossistêmicos na região (Hoki, 2023). Para mitigar os impactos do fogo, especialmente em zonas de transição ecológica, a estratégia central consiste em substituir o combate puramente reativo pelo Manejo Integrado do Fogo (MIF). Na prática, isso é feito por meio da execução de queimas prescritas e controladas durante o período de transição entre as estações chuvosa e seca, que reduzem o acúmulo de biomassa seca e criam aceiros naturais, impedindo que incêndios acidentais assumam proporções catastróficas (Brasil, 2024; Soares; Batista; Tetto, 2025). Complementarmente, é fundamental a restauração de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais, conforme o Código Florestal (Brasil, 2012), para manter a umidade do solo e criar barreiras de vegetação que dificultam a propagação das chamas. No nível operacional, a mitigação exige a formação de brigadas comunitárias capacitadas (Soares; Batista; Tetto, 2025) e a implementação de sistemas de monitoramento por satélite em tempo real, o que permite uma resposta rápida antes que o foco de calor atinja áreas de floresta densa (Aragão, 2023).

Todos os parâmetros meteorológicos variaram ao longo do período analisado. O resultado do teste de Mann-Whitney demonstrou que, embora algumas variáveis sejam compatíveis estatisticamente entre os dados observados (estações meteorológicas) e estimados (reanálise), existem divergências significativas para distintas variáveis e estados, o que destaca a importância de considerar as características regionais na avaliação do desempenho de produto de reanálise, pois, a fidelidade das simulações podem apresentar variação considerável, de acordo com a variável e a localidade estudada, pois, há períodos do ano em que os elementos meteorológicos contribuem de forma decisiva para a ocorrência e a propagação do fogo (Vicente-Serrano et al., 2020).

Em todos os estados da área de estudo, a variável chuva apresentou diferença estatisticamente significativa, o que indica baixa concordância entre os dados estimados e os observados. Esse resultado está em conformidade com os altos valores de RMSE e os baixos índices de Willmott, o que indica que o modelo estimado de chuva apresenta baixa confiabilidade. Essa condição pode estar relacionada às limitações intrínsecas das estimativas de satélite na captura da dinâmica convectiva da região. A precipitação tropical, caracterizada por alta variabilidade espacial e por eventos de curta duração, impõe um desafio aos algoritmos de sensoriamento remoto, que frequentemente falham em representar o volume real acumulado em escala local (Santos et al., 2021; Arruda et al., 2021). Essa inconsistência é particularmente crítica para o monitoramento de incêndios florestais, visto que a chuva é a principal variável moduladora da umidade do solo e do combustível disponível (Soares; Batista; Tetto, 2025).

Nas temperaturas máximas e mínimas, houve maior variação entre os estados. A temperatura máxima (T_{max}) apresentou diferença significativa apenas no estado de Rondônia, enquanto a temperatura mínima (T_{min}) apresentou diferença significativa nos estados de Rondônia, Mato Grosso e Pará, o que revela um desempenho heterogêneo do modelo nessas variáveis. Enquanto para a temperatura média (T_{med}), não houve diferença estatisticamente significativa entre os estados, sugerindo que o modelo tem boa capacidade de simular as médias regionais de temperatura. A temperatura do ar também influencia os incêndios ao alterar outros elementos meteorológicos, como a velocidade e a direção do vento e a umidade do ar (Fiedler et al., 2020). As altas temperaturas prolongadas podem agravar a seca (Xu et al., 2020; Delgado et al., 2022).

De forma geral, na análise dos dados meteorológicos estimados, os dados de reanálise do ERA5-Land confirmaram que os meses com as maiores temperaturas na área de estudo foram de agosto a outubro; junho apresentou as menores temperaturas médias, e julho apresentou a menor temperatura mínima média. Desta forma, os resultados demonstraram que a reanálise é viável para estimar a temperatura do ar em regiões sem estações de monitoramento.

Em relação à umidade relativa média (UR_{med}), os estados do Pará e Mato Grosso apresentaram diferenças estatisticamente significativas, enquanto a umidade relativa mínima (UR_{min}) apresentou diferença estatisticamente significativa em Rondônia, indicando que o modelo, apesar de apresentar coerência nas estimações de umidade, ainda é limitado para os valores extremos em algumas regiões. A chuva e a umidade relativa do ar destacaram-se entre as variáveis meteorológicas mais empregadas, enquanto as altas temperaturas e baixas umidades relativas são a chave para a ignição de incêndios (Alves et al., 2021; Souto; Freitas; Martins, 2021).

Na área de estudo, localizada na transição Cerrado-Amazônia, a velocidade média do vento diferiu estatisticamente entre Rondônia e Piauí, enquanto nos demais estados o modelo não apresentou diferenças. A velocidade média do vento foi maior em agosto e setembro, coincidindo com os meses mais secos, enquanto a umidade relativa média e mínima foi baixa nesse período, o que aumentou o perigo de incêndios. Devido à variabilidade no curto prazo, determinar o comportamento do vento é um desafio nos estudos sobre incêndios (Cachoeira et al., 2020; Ramalho et al., 2021). Entretanto, pelos baixos valores do índice de Willmott, observou-se que o desempenho do modelo para a variável do vento foi quase sempre insatisfatório, devido às limitações estruturais dessa variável, o que indica que o modelo apresenta baixa eficiência para simular a distribuição espacial do vento médio, provavelmente

em razão da influência microclimática e da topografia, que não são plenamente capturadas (Cachoeira et al., 2020).

A velocidade média do vento apresentou grande variação; entretanto, ao observar essa distribuição heterogênea, pode-se inferir que há um comportamento diferente dessa variável ao longo do território analisado, o que evidencia a necessidade de cautela em sua utilização em análises locais. Esta condição pode estar relacionada à limitação dos dados de reanálise para captar com precisão a dinâmica do vento na superfície. Esses produtos tendem a apresentar melhor representação nas camadas médias e altas da atmosfera. Entretanto, características locais, como relevo, cobertura do solo e rugosidade da superfície, influenciam diretamente o comportamento do vento nas camadas mais baixas, o que, nos modelos de reanálise, constitui um desafio devido às restrições impostas pela escala espacial empregada (Arruda et al. 2021).

Souto, Freitas e Martins (2021), ao estudarem o comportamento do fogo no estado de Minas Gerais, correlacionaram a velocidade do vento com variáveis do incêndio e com outras variáveis meteorológicas, encontrando correlações predominantemente positivas e significativas. Os autores observaram que, nos períodos de maior velocidade do vento, também se registrou um número maior de focos de calor, uma vez que o vento é importante na secagem do material combustível, contribuindo para a propagação do fogo.

Gonçalves e Dias (2020) avaliaram a correlação entre os elementos meteorológicos e o número de ocorrências de incêndios no município de Jataí, em Goiás, e encontraram baixa correlação com a velocidade do vento. Segundo os autores, a não significância da correlação entre os incêndios e a velocidade do vento pode ser explicada pela maior movimentação do vento no verão; no entanto, nesse período, é frequente a ocorrência de chuvas, o que impede incêndios. Ainda, segundo os autores, não se pode afirmar que o vento não interfere na ocorrência de incêndios, pois a análise aplicada pode não ser suficiente para detectar essa influência (Gonçalves & Dias, 2020). Neste contexto, as condições meteorológicas são responsáveis pela ocorrência e propagação de incêndios na vegetação (Vicente-Serrano et al., 2020; Alves et al., 2021; Souto; Freitas; Martins, 2021).

A aplicação do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) permitiu uma validação rigorosa das estimativas do ERA5-Land, evidenciando que, embora a reanálise capture a sazonalidade regional, há discrepâncias espaciais associadas à complexidade do terreno e às zonas de transição climática. A tendência predominante de subestimativa da precipitação, observada especialmente na transição Cerrado-Amazônia, corrobora estudos que apontam as limitações dos modelos de grade para representar sistemas convectivos de mesoescala e a influência da convergência de umidade nessas bordas florestais (Vicente-Serrano, 2020). Sob

o aspecto do perigo de incêndio, essa subestimativa sugere que os índices baseados em reanálise podem estar projetando cenários de estresse hídrico ligeiramente mais severos do que os registrados *in situ* (Santos Junior, 2022), atuando como uma margem de segurança conservadora na predição do risco. O comportamento atípico da estação de São Vicente (MT), com uma superestimativa significativa, reforça a influência determinante da topografia sobre o desempenho da reanálise. A altitude elevada (786,99 m) e o relevo acidentado introduzem efeitos orográficos que o modelo ERA5-Land, apesar de sua resolução aprimorada, tende a suavizar ou deslocar espacialmente.

Em contrapartida, a identificação de cinco estações com valores de SPI considerados normais, concentradas na porção oeste de Mato Grosso e no extremo norte do Maranhão, delimita zonas de alta fidelidade do modelo. Nessas áreas, a topografia mais homogênea e os regimes de chuva bem definidos permitem que o ERA5-Land replique com precisão a disponibilidade hídrica para a vegetação.

A utilização do SPI como métrica de normalização foi, portanto, essencial para mitigar os vieses de magnitude absoluta. Ao converter os volumes de chuva em desvios padronizados, a análise garante que o perigo de incêndio seja interpretado em relação à variabilidade histórica de cada local, compensando as limitações sistemáticas da reanálise. Essa abordagem confere robustez aos resultados subsequentes, assegurando que as tendências de perigo de fogo discutidas reflitam anomalias climáticas reais e não apenas inconsistências do modelo de satélite.

A normalização dos dados permitiu comparações entre as variáveis com escalas diferentes, utilizando os valores médios e o desvio padrão, com objetivo de padronizar os dados, indicando a razão entre as médias dos dados observados (provenientes de estações meteorológicas) e os dados estimados (de reanálises) possibilitou analisar a distribuição relativa das variáveis meteorológica, através da espacialização por categorização permitindo qualificar o quão próximo ou distante o modelo se encontra da realidade observada em cada ponto da área de estudo.

A comparação das séries temporais entre as médias das variáveis obtidas pelas estações meteorológicas e pelos dados de reanálise (ERA5-Land) geradas a partir dessas fontes revelou diferenças substanciais, particularmente na média diária de chuva e no erro médio dos resíduos (*Mean Bias Error* – MBE). Observou-se que os dados de reanálise subestimaram a quantidade de chuva registrada nas estações, o que pode ser atribuído a limitações na resolução espacial dos sensores e na calibração dos modelos. Essa discrepância afeta a precisão dos estudos que empregam variáveis meteorológicas e de monitoramento ambiental, prejudicando as previsões

meteorológicas e a modelagem do risco de incêndios florestais. Estratégias, como a integração de múltiplas fontes de dados e ajustes nos modelos, podem melhorar a acurácia das estimativas por satélite (Pampuch et al., 2023).

Os resultados indicaram uma subestimativa dos dados de reanálise, evidenciada pelo fato de que os valores estimados com base nesses dados foram consistentemente inferiores aos valores registrados nas estações meteorológicas para a mesma variável. Essa discrepância pode ser atribuída a diversas limitações inerentes ao processo de estimativa por sensoriamento remoto, que nem sempre consegue captar com precisão a quantidade real de chuva que atinge o solo, incluindo a resolução espacial insuficiente dos sensores de satélite e possíveis inadequações nos modelos utilizados na calibração dos dados (Xu et al., 2020; Pampuch et al., 2023). Além disso, fatores meteorológicos e características ambientais específicas das regiões analisadas também podem contribuir para a diferença observada entre as medições *in situ* e as estimativas baseadas em dados de reanálise.

Do ponto de vista metodológico, a subestimativa dos dados de chuva pode comprometer a precisão de estudos meteorológicos, de perigo de incêndios e de monitoramento ambiental, impactando diretamente pesquisas relacionadas à previsão de eventos meteorológicos extremos e à modelagem do perigo de incêndios florestais. Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias que permitam aprimorar a precisão das estimativas via satélite, tais como a integração de múltiplas fontes de dados, o ajuste de modelos numéricos de previsão e a aplicação de técnicas estatísticas para a correção de vieses observados (Pampuch et al., 2023). Cabe destacar também que as chuvas, a umidade relativa do ar e a temperatura do ar são variáveis meteorológicas que mais influenciam a umidade do material combustível e, por isso, devem ser monitoradas constantemente para determinar o perigo de incêndio florestal (Souto; Freitas; Martins, 2021).

O estudo de De Moraes et al. (2020) utilizou dados da reanálise do ECMWF para estimar precipitação e temperatura e demonstrou ser preciso e capaz de redistribuir os padrões de previsão na Amazônia brasileira. Além disso, as maiores concentrações de estações meteorológicas de superfície na porção leste/sudeste da região amazônica foram decisivas para o desempenho do modelo. Para a chuva, os dados do modelo foram considerados médios, com valores mais elevados na estação meteorológica, pois esta registra a precipitação de forma pontual, enquanto as medidas do ECMWF abrangem uma área de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Conclui-se que os modelos podem ser utilizados como fonte confiável de dados quando não se dispõe de informações de estações de superfície (Pampuch et al., 2023; Galvão et al., 2024).

O uso de dados meteorológicos concisos é importante para a elaboração de um programa de prevenção e para o combate a incêndios florestais, bem como para a tomada de decisões rápidas e assertivas (Ramalho et al., 2021; Sari, 2021). A precipitação e a umidade relativa do ar destacaram-se entre as variáveis meteorológicas mais empregadas (Souto; Freitas; Martins, 2021), enquanto as altas temperaturas e baixas umidades relativas são fatores-chave para a ignição de incêndios (Alves et al., 2021; Souto; Freitas; Martins, 2021).

3.5 Conclusão

Em toda a área de estudo, os índices FMA+ e P-EVAP se destacaram por apresentarem maior capacidade de estimar o perigo de incêndios florestais com mais precisão e consistência sob diferentes condições meteorológicas, além de maior concordância e menores erros. O índice FMA pode ser uma alternativa intermediária, enquanto Angstron e EVAP/P apresentaram alta variabilidade, indicando menor confiabilidade e sugerindo uso cauteloso devido à menor precisão e reprodutibilidade na região. Sua eficiência e aplicabilidade dependem de observações pontuais das características meteorológicas locais para uma melhor resposta e maior representatividade desses índices. Todos os índices, inclusive os mais consistentes na literatura, apresentaram variação entre as estações, tanto nos dados de superfície quanto na reanálise.

O índice P-EVAP destacou-se na área de estudo como um modelo confiável para prever o perigo de incêndio. No entanto, Angstron foi o índice com o desempenho mais limitado. Ao comparar as condições de estação meteorológica com as reanálises, observou-se que as reanálises tenderam a apresentar resultados ligeiramente superiores, exceto o EVAP-P, que apresentou leve redução.

A escolha do método ideal depende das características específicas de cada estação meteorológica, pois o desempenho do índice está diretamente relacionado à qualidade dos dados das variáveis meteorológicas locais disponíveis e às características ambientais da região.

Os resultados demonstraram que os dados de reanálise do ERA5 Land são confiáveis e podem ser utilizados quando não há dados de estações meteorológicas locais.

Diante das condições meteorológicas locais observadas e de suas variações em toda a área, o estudo ressaltou a importância da utilização de índices capazes de avaliar o perigo de incêndio, com base em modelos que utilizem variáveis como chuva, temperatura, umidade relativa do ar e vento, provenientes de estações meteorológicas ou de reanálise, contribuindo, assim, para a prevenção e o combate aos incêndios.

Desta forma, a aplicação de índices que possibilitem a prevenção e o combate a eventos de incêndio, não apenas na faixa de transição local, mas também abrangendo a totalidade do

ecótono Amazônia-Cerrado, considerando que essas áreas compartilham características meteorológicas semelhantes, permite a padronização de protocolos de monitoramento e resposta.

3.6 REFERÊNCIAS

ALLEN, Richard George *et al.* **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper** 56, 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 23 jul. 2024.

ALMAGRO, André *et al.* Performance evaluation of Eta/HdGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. *Atmospheric Research*, 244, 105053, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809519316989?via%3DiDihub>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ALVES, José Maria Brabo *et al.* A Study of heat outputs in the Caatinga biome and its relationships with meteorological variables. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 36, 513–527, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/PcnRqHJF4Mgd6rmYtV67fLS/abstract/?lang=en>. Acesso em: 03 out. 2024.

ARAGÃO, Mariana de Aquino *et al.* Risk of forest fires occurrence on a transition island Amazon-Cerrado: Where to act? **Forest Ecology and Management**, v. 536, p. 120858, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112723000919>. Acesso em: 3 mai. 2024.

ARRUDA, Vera Laisa da Silva *et al.* An alternative approach for mapping burn scars using Landsat imagery, Google Earth Engine, and Deep Learning in the Brazilian Savanna. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100472, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000082>. Acesso em: 10 jun. 2024.

BARLOW, Jos *et al.* Clarifying Amazonia's burning crisis. **Global Change Biology**, v. 26, n. 2, p. 319–321, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31729092/>. Acesso em: 13 nov. 2025.

BARNI, Paulo Eduardo *et al.* Logging Amazon forest increased the severity and spread of fires during the 2015–2016 El Niño. **Forest Ecology and Management**, v. 500, p. 119652, 15 nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721007428>. Acesso em: 13 nov. 2025.

BEU, Cássia Maria Leme. Avaliação da Fórmula de Monte Alegre modificada aplicada aos dados da Flona de Ipanema, MERRA-2 e produtos de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 857–878, 20 dez. 2022. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/15774/9135>. Acesso em: 13 nov. 2024.

BRANDO, Paulo Monteiro *et al.* The gathering firestorm in southern Amazonia. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 736–741, 2020. Disponível em:

<https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aay1632>. Acesso em: 20 dez. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 13 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024**. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo; e altera as Leis nºs 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, 9.433, de 8 de janeiro de 1997, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 9.985, de 18 de julho de 2000, 10.410, de 11 de janeiro de 2002, 11.952, de 25 de junho de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012, e 13.021, de 8 de agosto de 2014. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14944.htm. Acesso em: 13 mar. 2026.

CACHOEIRA, Jader Nunes *et al.* Predição das variáveis do comportamento do fogo em Cerrado sensu stricto no sul do Tocantins. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 2, p. 939–946, 2020. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/6854>. Acesso em: 13 nov. 2024.

CAMARGO, Ângelo Paes de. *et al.* Adjustment of the Thornthwaite equation to estimate potential evapotranspiration in arid and superhumid climates, based on daily temperature range. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 7, 251–257, 1999. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001597898>. Acesso em: 23 nov. 2023.

CANO-CRESPO, Ana *et al.* Forest Edge burning in the Brazilian Amazon Promoted by escaping fires from managed pastures. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, 120, 2095–2107, 2015. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JG002914>. Acesso em: 13 nov. 2024.

CASAVECCHIA, Bruno Henrique *et al.* Índices de perigo de incêndios em uma área de transição Cerrado-Amazônia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, p. 842–854, 2019. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/17756/14465>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CHENEY, Nicholas.; GOULD, James. Fire growth in grassland fuels. **International Journal of Wildland Fire**, 5, 237–247, 1995. Disponível em: <https://connectsci.au/wf/article-abstract/5/4/237/22071/Fire-Growth-in-Grassland-Fuels?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 13 mar. 2024.

CORREIA, Thomas Rieth *et al.* Forest fire risk indexes in five municipalities with different meteorological characteristics. **Nativa**, 12, 118–123, 2024. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/13968>. Acesso em: 13 nov. 2025.

DHAWAN, Pranjul *et al.* A comprehensive comparison of bias correction methods in climate model simulations: applications on ERA5-Land across different temporal resolutions.

Heliyon, 10(23), e40352, 2024. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024163839>. Acesso em: 13 nov. 2024.

DE ANDRADE, Caio Ferreira *et al.* Fire regime in Southern Brazil driven by atmospheric variation and vegetation cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 295, p. 108-194, 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192320302963?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2024.

DELGADO, Rafael Coll *et al.* Assessment of a new fire risk index for the Atlantic Forest, Brazil. **Forests**, 13, e1844, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/11/1844>. Acesso em: 10 set. 2024.

DE MOURA, Fernando Rafael *et al.* In the Line of Fire: Analyzing Burning impacts on air pollution and air quality in an Amazonian City, Brazil. **Atmospheric Pollution Research**, 15, e102033, 2024. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104223003872> Acesso em: 10 set. 2024.

DE SOUSA, Jocy Ana Paixão *et al.* Forest Fire Risk Indicator (FFRI) Based on Geoprocessing and Multicriteria Analysis. **Natural Hazards**, 114, 2311–2330, 2022.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-022-05473-x>. Acesso em: 20 out. 2024.

FARFÁN, Hugo Hinostroza *et al.* Bias correction in global climate forecasting of sea surface temperature using adaptive filters in the frequency domain. **Revista Brasileira de Climatologia**, 34(20), 620–642, 2024. Disponível em:

<https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/17005>. Acesso em: 20 abr. 2024.

FIEDLER, Nilton Cesar *et al.* Firefighting combat with fire retardants at different concentrations. **FLORESTA**, v. 50, n. 1, p. 1107–1112, 2020. Disponível em:

<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203499755>. Acesso em: 21 set. 2025.

GALVAO, Willian Félix *et al.* Validation of Global Solar Radiation from ERA5-Land for the Municipality of Humaitá-Amazonas. **E&S Engineering and Science**, 13, 1–9, 2024.

Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/18425> Acesso em: 20 abr. 2024.

GONÇALVES, Darliane Mariano; DIAS, Daniela Pereira. Eficiência de cinco índices de perigo de incêndios para o município de Jataí - GO. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, 2020.

Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr127/2318-1222-scifor-48-127-e3362.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.

HOKI, Vanusa de Souza Pacheco *et al.* Analysis of heat sources in different areas of influence of the BR-242 highway in the Nova Ubiratã-MT, Brazil. **Nativa**, 9, 129–134, 2023.

Disponível em:

<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/10794>. Acesso em: 13

fev. 2025

LAPOLA, David Montenegro *et al.* The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, n. 6630, 2023. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abp8622>. Acesso em: 20 dez. 2025.

LEVIN, Kelly *et al.* **Mudanças Climáticas**: veja 5 grandes resultados do relatório do IPCC. 2020. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/mudancas-climaticas-alarma-veja-5-grandes-resultados-do-relatorio-do-ipcc>. Acesso em: 20 dez. 2025.

LIBONATI, Renata. *et al.* Twenty-first-century droughts have not increasingly exacerbated fire season severity in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 4400, 2021. Disponível em: https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/Publicacoes-Impacto/material3os/2021_Libonati_et_al_IncreasinglyExacerbated_SR_DE3os.pdf. Acesso em: 13 nov. 2025.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira Torres; LIMA, Gumerindo Souza. Forest Fire Hazard in the Serra do Brigadeiro State Park (MG). **Forest Fire Hazard in the Serra do Brigadeiro State Park (MG)**, v. 26, n. 2, p. 0–0, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/5TFSxDrrsBNm8jhSS75ZXXf/?lang=en>. Acesso em: 13 nov. 2025.

LIMA, Cássio Furtado *et al.* Is there a relationship between forest fires and deforestation in the Brazilian Amazon?. **Plos One**, 19, e0306238, 2024. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0306238>. Acesso em: 13 nov. 2025.

LIMA, Mayara Barbosa *et al.* Seasonal aspects of a forest fire risk index in Northern Brazil using meteorological data. **Biodiversidade Brasileira**, 11, 46–59, 2021. Disponível em: <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/index.php/BioBR/article/view/1781>. Acesso em:

LOTUFO, Juliana Barbosa da Silva *et al.* Evaluation of reanalysis and remote sensing products for wind speed estimation in the Brazilian Central-West. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 18(5), 3859–2871, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/issue/view/3794> Acesso em: 02 fev. 2026.

MABUDE, Khumbulani *et al.* Distribution-Free Mixed GWMA-CUSUM and CUSUM-GWMA Mann–Whitney charts to monitor unknown shifts in the process location. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, 51, 6667–6690, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03610918.2020.1811331>. Acesso em: 23 jan. 2026.

MARENGO, José Antônio. *et al.* Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 457, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-04241-4>. Acesso em: 13 nov. 2025.

MARIMON, Beatriz Schwantes *et al.* Disequilibrium and hyperdynamic tree turnover at the forest–cerrado transition zone in southern Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 7, n. 1–

2, p. 281–292, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17550874.2013.818072>. Acesso em: 13 nov. 2025.

MARQUES, Eduardo Queiroz *et al.* Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1501–1517, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-019-01720-z?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 15 ago. 2025.

MARQUES, Rafael; SOBRINHO, Werton. Detecção das ocorrências de focos de queimadas e produção de mapas de calor em Timon, MA. **REVISTA GEONORTE**, v. 11, p. 210–228, 2020. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/6621> Acesso em: 13 nov. 2025. DOI:

MUÑOZ-SABATER, Joaquín *et al.* ERA5-Land: A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications. **Earth System Science Data**, 13, 4349–4383, 2021. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/13/4349/2021/>. Acesso em: 25 set. 2024.

NUNES, José Renato Soares; SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos. FMA+ - Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná, Brasil. **FLORESTA**, v. 36, n.1, 2006. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/5509/4039>. Acesso em: 15 out. 2024.

OLIVEIRA, Ubirajara *et al.* Determinants of Fire Impact in the Brazilian Biomes. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2022.735017/full>. Acesso em: 20 jul. 2024.

OLIVEIRA, Ubirajara *et al.* Determinants of fire impact in the Brazilian biomes. **Frontiers in Forest Global Change**, 5, e735017, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2022.735017/full>. Acesso em: 13 nov. 2025.

PAMPUCH, Luana Albertani *et al.* A Review on clustering methods for climatology analysis and its application over South America. **International Journal of Geosciences**, 14, 877–894, 2023. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=127980>. Acesso em: 20 jul. 2024.

PEREIRA, Paulo *et al.* Short-Term effect of wildfires and prescribed fires on ecosystem services. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, 22, e100266, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468584421000386?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2025.

PINTO, Dayane Lopes *et al.* Periods of highest occurrence of forest fires in Brazil. **Floresta**, v. 51, n. 2, p. 484–491, 2021. Disponível em:

<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/70286/43218>. Acesso em: 13 nov. 2025.

PIVELLO, Vânia Regina *et al.* Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 233–255, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2530064421000560>. Acesso em: 13 nov. 2025.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro *et al.* Geotechnology applied to predict the risk of occurrence of fire in the Atlantic Forest. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 707–720, 2021a. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350336487_Geotechnology_applied_to_predict_the_risk_of_occurrence_of_fire_in_the_Atlantic_Forest. Acesso em: 13 nov. 2025.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro *et al.* Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113122, 15 out. 2021b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721011841?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2025.

ROCES-DÍAZ, José Valentim. *et al.* A global synthesis of fire effects on ecosystem services of forests and woodlands. **Frontiers in Ecology and the Environment**, 20, 170–178, 2022. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fee.2349>. Acesso em: 26 out. 2024.

SABINO, Marlus *et al.* Disaggregation of daily rainfall in the state of Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 37, 427–439, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/3GkHcFqn8KYRZcvWfPWMgk/?lang=pt>. Acesso em: 26 out. 2024.

SALAME, Camil Wadih *et al.* Use of spatial regression models in the analysis of burnings and deforestation occurrences in the Forest Region, Amazon, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 75, e274, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4865-x>. Acesso em: 26 out. 2024.

SANTOS, Micael Moreira *et al.* Characterization and dynamics of surface fuel of Cerrado grassland in Jalapão region – Tocantins, Brazil. **Floresta**, v. 51, n. 1, p. 127–136, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/67440/42735>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SANTOS, Sérgio Rodrigo Quadros dos *et al.* Classificação de eventos extremos de precipitação em múltiplas escalas de tempo em Belém-PA: utilizando o índice de precipitação normalizada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 7, 628–635, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233179?articlesBySameAuthorPage=2>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SANTOS JUNIOR, Edimar Pereira dos; BLAIN, Gabriel Constantino; XAVIER, Ana Carolina Freitas. On the suitability of data from the Climatic Research Unit (CRU) and 5th Generation of European Reanalysis (ERA5) for monitoring drought events under a probabilistic framework. **Revista Brasileira Meteorologia**, 37, 243–260, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/YJhDWbj9BS3XQkRPfhk9Fcx/?lang=pt>. Acesso em: 18 ago. 2024.

SARI, Fatih. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **Forest Ecology and**

Management, v. 480, p. 118644, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112720314134?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SINGH, M.; ZHU, X. Analysis of how the spatial and temporal patterns of fire and their bioclimatic and anthropogenic drivers vary across the Amazon Rainforest in El Niño and Non-El Niño years. **PeerJ**, 9, e12029, 2021. Disponível em: <https://peerj.com/articles/12029/>. Acesso em: 18 ago. 2024.

SILVA, Carlos Fabricio Assunção da *et al.* Highway Network and Fire Occurrence in Amazonian Indigenous Lands. **Sustainability** 2022, 14, e9167. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/15/9167>. Acesso em: 26 nov. 2025.

SILVA-JÚNIOR, Celso Henrique Leite *et al.* Forest Fragmentation and Fires in the Eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. **Fire**, v. 5, n. 3, p. 77, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/3/77>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SILVA, Wanderson Carvalho da; SOUZA, Adilson Pacheco; JASPER, André. Spatiotemporal analysis of vegetation fires and hot spots in watersheds in southeastern Amazonia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 18, 537-549, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/259689>. Acesso em:

SOARES, R. V. Incêndios florestais: Controle e uso do fogo. Curitiba: **Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná**, 1985. 213p. Disponível em: Acesso em: 13 nov. 2025.

SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos; TETTO, Alexandre França. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. 2. ed. rev. Curitiba, 2017. 255 p. Disponível em: <https://online.pubhtml5.com/ynsa/yrtg/>. Acesso em 05 março 2026.

SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos; TETTO, Alexandre França. **Manual de prevenção e combate aos incêndios florestais**. 3. ed. Curitiba: Ed. dos Autores, 2025. Disponível em: <https://online.pubhtml5.com/ynsa/ikjv/>. Acesso em: 13 mar. 2026.

SOUTO, Claudilene Aparecida; FREITAS, Ana Carolina Vasques; MARTINS, Guilherme. Influência das Condições Meteorológicas Atuais e Futuras na Ocorrência de Queimadas e Incêndios Florestais no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 2755–2770, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/249490/39493>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SOUZA, Adilson Pacheco *et al.* Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34–43, 2013. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/1334/pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SOUZA, Adilson Pacheco de; CASAVECCHIA, Bruno Henrique; STANGERLIN, Diego Martins. Avaliação dos riscos de ocorrência de incêndios florestais nas regiões Norte e Noroeste da Amazônia Mato-grossense. **Scientia Plena**, v. 8, n. 5, 2012. Disponível em: <https://www.scientiaplenua.org.br/sp/article/view/553/491>. Acesso em: 13 nov. 2025.

TANAKA, Adriana Aki *et al.* Reference evapotranspiration estimated with simplified models for the state of the Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51(2), 91–104, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/976d4nR8LnmX6yWqH6kL7WM/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 23 nov. 2025.

TAVARES, Priscila da Silva *et al.* A dataset of high-resolution climate change projections over South America with bias correction. **Derbyana**, 45, e821, 2024. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/821/815>. Acesso em: 13 nov. 2025.

TORRES Fillipe Tamiozzo Pereira; RIBEIRO, Guido Assunção. Índices de risco de incêndios florestais em Juiz de Fora/MG. Seropédica: **Floresta e Ambiente**, v.15 n.2, p.30-39, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/ptCgMMHQCHnfHqqhS7qVTLS/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2023.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira *et al.* Mapeamento do Risco de Incêndios Florestais Utilizando Técnicas de Geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. Disponível em: <https://www.floram.org/article/doi/10.1590/2179-8087.025615>. Acesso em: 15 set. 2024.

VICENTE-SERRANO, Sergio Martín *et al.* A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? **Earth-Science Reviews**, v. 201, p. 102953, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825218306421?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2024.

WILLMOTT, Cort James. Some Comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 63(11), 1309-1313, 1982. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/63/11/1520-0477_1982_063_1309_scoteo_2_0_co_2.xml. Acesso em: 20 dez. 2024.

XU, Kun; HUANG, Shongming; HE, Fangliang. Modeling fire hazards for the maintenance of long-term forest inventory plots in Alberta, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 513, p. 120206, 2022. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4010378. Acesso em: 13 nov. 2025.

XU, Xiyan *et al.* Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian Forests. **Global Change Biology**, 26, 5874–5885, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.15279>. Acesso em: 20 dez. 2024.

4. Artigo 02: PREVISÃO DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM DIFERENTES CENÁRIOS NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA, BRASIL

Resumo: As mudanças climáticas estão transformando rapidamente os regimes de incêndios florestais, ameaçando o equilíbrio dos ecossistemas. Este estudo investigou a dinâmica espaço-temporal do perigo de incêndio na transição Cerrado-Amazônia, integrando dados observacionais e projeções climáticas do modelo HadGEM3-GC31-LL (CMIP6). Foram avaliados os índices FMA+ e P-EVAP para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Os resultados revelaram uma evolução do perigo de incêndio, enquanto o cenário SSP1-2.6 preserva a sazonalidade histórica; o SSP2-4.5 apresenta uma transição gradual, com aumento da intensidade e da duração do perigo ao longo das décadas; e o SSP5-8.5 projeta perigo extremo e contínuo em toda a região, com temperaturas próximas de 40 °C e redução drástica da precipitação pluvial. Identificou-se uma ruptura crítica na sazonalidade pluviométrica; no Tocantins, a janela de perigo migra de maio a julho; em Rondônia, antecipa-se para abril-maio; e, em Mato Grosso, o perigo torna-se permanente ao longo de todo o ano até 2100. Em especial, a vulnerabilidade é heterogênea, com Maranhão, Piauí e Tocantins apresentando totais pluviométricos menores e ventos mais intensos. Conclui-se que os índices FMA+ e P-EVAP são eficazes para avaliar o perigo de incêndio. No entanto, a região caminha para um clima hostil, o que exige, com urgência, estratégias de mitigação e adaptação regionalizadas para enfrentar os incêndios. As estratégias atuais, desenhadas para um calendário sazonal estático, mostraram-se obsoletas diante de um futuro em que o fogo pode ocorrer em qualquer mês do ano, o que exige monitoramento contínuo e a adaptação das brigadas de combate para uma atuação permanente.

Palavras-chave: projeções climáticas; CMIP6; modelo HadGEM; fogo

4.1 Introdução

A área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia desempenha um papel crucial na manutenção da biodiversidade e no equilíbrio ecológico da América do Sul. Funcionando como corredor ecológico vital para essa região, que conecta os dois maiores biomas do continente, permitindo o fluxo gênico de espécies e sustentando uma rica variedade de formações vegetais, que vão de florestas densas a fisionomias savânicas (Morandi et al., 2020; Marengo et al., 2022; Zeferino et al., 2023; Ribeiro et al., 2024).

No entanto, a região também sofre intensa pressão antrópica, impulsionada principalmente pelo desmatamento e pela expansão agropecuária, que fragmentam a paisagem e degradam seus habitats essenciais (Silva et al., 2019; Marengo et al., 2023). Esse cenário crítico é agravado pelas projeções de mudanças climáticas, que indicam um futuro com estações secas mais prolongadas e severas (Oliveira e Martins, 2026). Essa sinergia perigosa entre o uso inadequado do solo e o clima em transformação cria condições ideais para o aumento da frequência e da intensidade dos incêndios florestais (Stephens et al., 2020; IPCC, 2023).

O fogo em ecossistemas florestais afeta a cobertura vegetal, as propriedades físico-químicas do solo, a fauna e a composição atmosférica, resultando em elevados níveis de degradação, especialmente em eventos de incêndios florestais. Embora o fogo seja parte integrante de biomas como a vegetação savânica, que apresenta adaptações morfológicas de resistência e recuperação, sua ocorrência altera a dinâmica local ao reduzir a cobertura arbórea em favor das gramíneas (Santos et al., 2020; Batista, 2004). Contudo, o equilíbrio desses ecossistemas é ameaçado quando o fogo atinge proporções irreversíveis, destruindo vastas áreas, processo que é intensificado em solos com uso e ocupação que fornecem matéria orgânica e apresentam baixo déficit hídrico (Sannigrahi et al., 2020; Ma et al., 2022).

A gravidade desses incêndios é amplificada pelas projeções climáticas atuais. Com o aquecimento global projetado para atingir $+5^{\circ}\text{C}$ ou mais até 2100, resultando em eventos extremos que alteram os padrões climáticos locais (IPCC, 2023). Esta tendência de aumento das temperaturas globais para as próximas décadas cria um ambiente propício aos incêndios de maior magnitude (Kazmierczak, 2023; Corning, 2024; Oliveira & Martins, 2026). Nesses cenários, a vegetação seca torna-se altamente inflamável, favorecendo a ignição e a propagação do fogo, especialmente quando associadas à baixa umidade do ar e a ventos intensos, o que coloca em risco a função ecológica e os serviços ecossistêmicos locais (Brando et al., 2014; Aragão et al., 2023). O aumento do número de ocorrências desses eventos está associado às atividades criminosas e agrícolas, que utilizam o fogo como ferramenta de conversão de terras (Silva et al., 2020), resultando em consequências severas, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa, perda de biodiversidade e impactos diretos na saúde pública (Ma et al., 2022).

Nas projeções do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 6 (CMIP6), os cenários de aquecimento global indicam um aumento de 2 a 5°C nas temperaturas médias anuais até o final do século XXI, conforme o cenário de emissões (Eyring et al., 2016; IPCC, 2023a). Nos últimos anos, vários métodos de pós-processamento dessas projeções foram desenvolvidos e amplamente utilizados, servindo como ferramentas fundamentais para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas (Maraun, 2016; Vogel et al., 2023). Atualmente, os Modelos de Circulação Geral e do Sistema Terrestre (MCGs) são as ferramentas mais avançadas para a análise das respostas climáticas sob diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa (Fan et al., 2020; Ballarin et al., 2023).

O Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) disponibilizou conjuntos de modelos climáticos globais com projeções de diversas variáveis climáticas (IPCC, 2023), que integram o Projeto de Intercomparação de

Modelos Acoplados - Fase 6 (CMIP6). Nesse contexto, os princípios dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs), que combinam trajetórias socioeconômicas e concentrações de gases de efeito estufa, são utilizados pelo IPCC/AR6 para projetar as mudanças climáticas (AR6). Os caminhos SSP3-7.0 e SSP5-8.5 representam cenários de elevada emissão, caracterizados pelo aumento dos períodos secos e pela redução da umidade relativa do ar, especialmente no centro-norte brasileiro (Silva-Junior et al., 2022).

Tais condições favorecem o déficit hídrico atmosférico, a redução da umidade do material combustível vegetal, aumentando a probabilidade de ignição e de propagação do fogo (Brando et al., 2014; Fonseca et al., 2019). No entanto, a ocorrência de incêndios depende do conjunto simultâneo desses três elementos (oxigênio, material combustível e fonte de calor) (Marques et al., 2011). Esse conjunto de variáveis meteorológicas e ambientais (De Oliveira et al., 2020) é considerado o principal fator na ignição e na propagação dos incêndios (Batista, 2004; Americo et al., 2021; Ramalho et al., 2024).

Devido às suas fragilidades socioambientais, o Brasil apresenta elevada suscetibilidade aos efeitos da variabilidade climática, pois, a distribuição e a frequência de incêndios estão fortemente relacionadas às condições meteorológicas, como o aumento da temperatura e mudanças no regime anual e sazonal das chuvas, contribuindo para a ocorrência de incêndios (Benfica; Silva; Delgado, 2021), principalmente nos biomas Amazônia e Cerrado, os quais tendem a ser ainda mais agravados pelas alterações climáticas projetadas para as próximas décadas (Firpo et al., 2022; IPCC, 2023).

Na Amazônia, os incêndios florestais estão associados a períodos de seca severa e a práticas de corte da vegetação para a limpeza de terras, o que afeta todo o ecossistema (Silva et al., 2020). Suas áreas florestais sofreram grandes perdas, o que tornou as condições de ocorrência e propagação do fogo mais propícias (Xu et al., 2020). Estudos recentes relatam que, sob cenários climáticos mais quentes (Stephens et al., 2020), áreas territoriais da Amazônia meridional podem passar por processos de savanização, ou seja, substituição gradual da floresta úmida por formações vegetacionais abertas, predominadas por gramíneas e por espécies adaptadas ao fogo (Nobre; Borma, 2009; Lovejoy; Nobre, 2019).

Os incêndios florestais nessa região são uma das principais fontes de destruição da vegetação primária (Sannigrahi et al., 2020; Silva et al., 2020) e são marcados pela interação entre fatores meteorológicos, ecológicos e antrópicos, sendo intensificada pela variação térmica e pluviométrica e pela expansão das fronteiras agrícolas, que aumentam o perigo de incêndios e emissão de gases de efeito estufa equivalente a queima de combustíveis fósseis (Ma et al., 2022; Aragão et al., 2023).

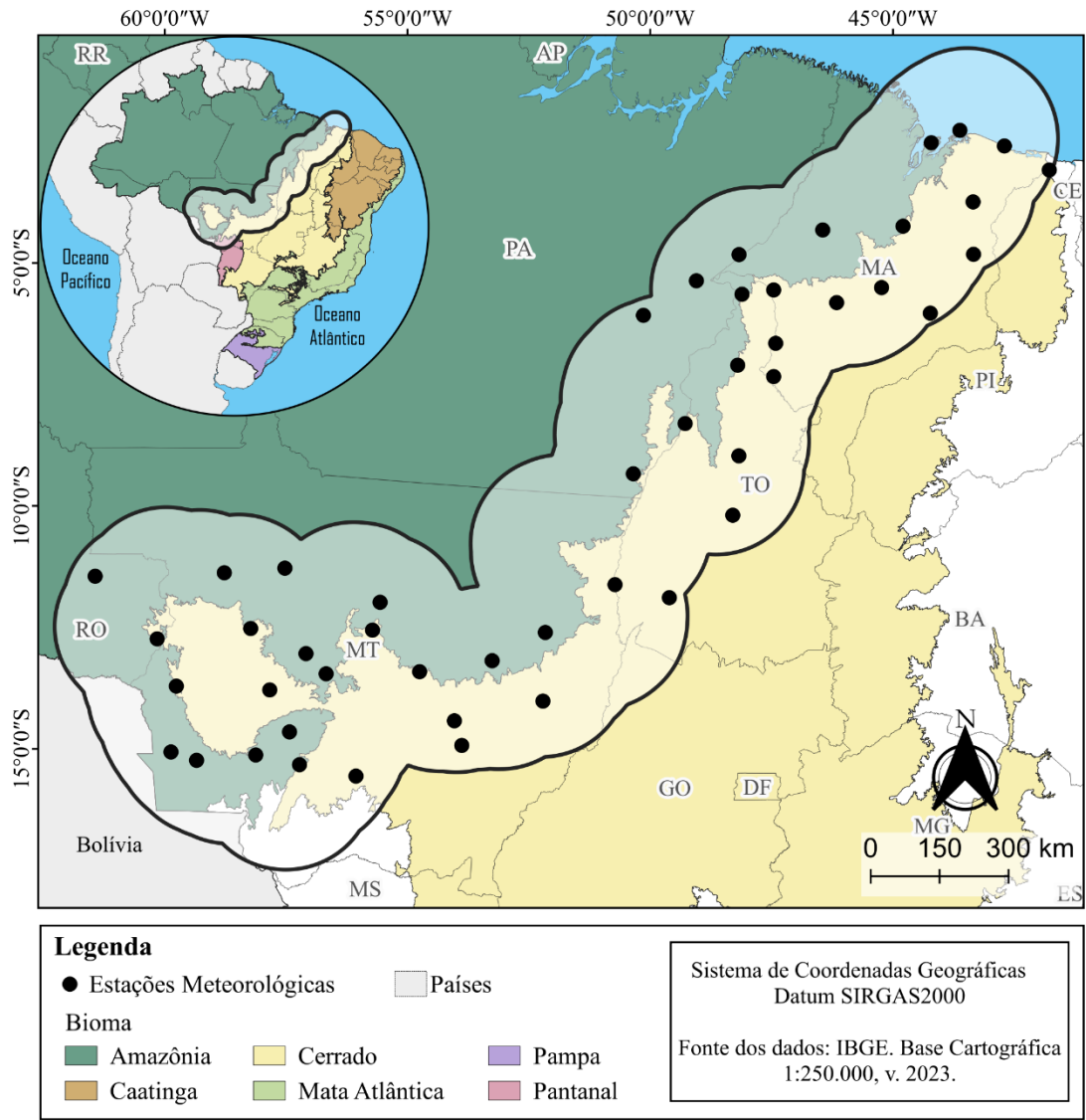
Na transição Cerrado-Amazônia, observa-se a tendência de redução anual da precipitação e de aumento do período de estiagem, o que torna a vegetação vulnerável a incêndios severos (Silvério et al., 2015; Marengo & Espinoza, 2016; Mota et al., 2019). Desta forma, a análise dos índices de perigo de incêndio nas projeções climáticas do CMIP6, em diferentes cenários, constitui uma ferramenta importante para compreender a dinâmica atual e futura dos incêndios na zona de transição Cerrado-Amazônia. Essencial para uma gestão de riscos climáticos mais eficaz, favorecendo o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação, bem como o planejamento territorial e as políticas públicas voltadas à redução do risco de incêndio e à conservação dos ecossistemas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar índices de perigo de incêndios futuros, por meio dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP, para a área de transição dos biomas Amazônia e Cerrado, no Brasil, considerando os dados observados e estimados no conjunto de cenários de emissões, em diferentes princípios socioeconômicos, os SSPs (Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas), utilizando as projeções do modelo HadGEM3-GC31-LL (Reino Unido) do CMIP6, considerando as variáveis de precipitação, temperatura, umidade relativa e vento, nos cenários de curta (SSP1-2.6), média (SSP2-4.5) e alta (SSP5-8.5) emissão de gases de efeito estufa, para o período futuro, nos anos de 2030, 2050, 2075 e 2100 em todos os cenários.

4.2 Material e Métodos

A área de estudo é de 1.495.321,78 km² (Figura 22) e compreende a região de transição Cerrado-Amazônia, delimitada por uma área de amortecimento de 200 km de cada lado da confluência entre os biomas Cerrado e Amazônia. A área total abrange regiões dos estados brasileiros, Rondônia (RO), Mato Grosso (MT), Tocantins (TO), Maranhão (MA), Pará (PA) e Piauí (PI), caracterizada por elevada diversidade biológica e por fitofisionomias distintas, incluindo formações savânicas (Cerrado) e florestas amazônicas, com presença de diferentes tipos climáticos, segundo a classificação climática de Köppen: Af (clima equatorial úmido), Aw ou As (clima de savana tropical), Am (clima de monção) e Cwa (clima tropical com inverno seco) (Souza et al., 2013).

Figura 22. Distribuição das estações meteorológicas automáticas ao longo da área de transição Cerrado-Amazônia, utilizadas neste trabalho



A área de estudo dispõe de 66 estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), submetidas à avaliação de consistência da base de dados. Desta forma, foram excluídas 18 estações, pois não se enquadravam no período do estudo (2015 a 2024) e/ou apresentavam mais de 30% de dados faltantes, resultando em 48 estações meteorológicas automáticas utilizadas (Tabela 16).

Tabela 16. Estações meteorológicas automáticas do INMET (EMAs) localizadas na região de transição Cerrado-Amazônia utilizadas no estudo

Nome da estação meteorológica	Estado	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Água Boa	MT	-14,0164	-52,2117	440
Araguaína	TO	-7,1038	-48,2011	230,76
Araguatins	TO	-5,6436	-48,1119	130,71
Bacabal	MA	-4,2430	-44,795	22,33
Barra do corda	MA	-5,5066	-45,2369	154,19

Brasnorte (Novo Mundo)	MT	-12,5219	-58,2314	426,2
Buritcupu	MA	-4,32056	-46,4494	174,91
Cacoal	RO	-11,4458	-61,4342	183,53
Campo Novo do Parecis	MT	-13,7858	-57,8386	525,41
Carolina	MA	-7,33722	-47,4597	182,88
Caxias	MA	-4,82139	-43,3436	84,85
Chapadinha	MA	-3,74278	-43,3522	104
Colinas	MA	-6,03306	-44,2333	175,37
Comodoro	MT	-13,7081	-59,7625	576,87
Conceição do Araguaia	PA	-8,30361	-49,2828	175,74
Cuiabá	MT	-15,5593	-56,063	241,56
Estreito	MA	-6,65333	-47,4183	182,96
Farol de Santana	MA	-2,27083	-43,6242	9,87
Formoso do Araguaia	TO	-11,8875	-49,6083	215,2
Gaúcha do Norte	MT	-13,1847	-53,2575	375,87
Grajau	MA	-5,81611	-46,1622	232,29
Imperatriz	MA	-5,55583	-47,4597	117,96
Juara	MT	-11,2803	-57,5267	263,43
Juína	MT	-11,375	-58,7747	365,39
Marabá	PA	-5,36639	-49,0511	116,58
Nova Maringá	MT	-13,0386	-57,0922	334,36
Nova Ubiratã	MT	-13,4111	-54,7522	466,48
Palmas	TO	-10,1908	-48,3019	291,87
Paranatinga	MT	-14,4214	-54,0361	476,91
Parnaíba	PI	-3,08667	-41,7831	52,11
Pedro Afonso	TO	-8,96861	-48,1772	189,71
Pontes e Lacerda	MT	-15,2344	-59,3461	272,53
Porto Estrela	MT	-15,3247	-57,2258	147,75
Preguiças	MA	-2,59222	-42,7075	4,62
Querência	MT	-12,6031	-52,1625	355
Rondon do Para	PA	-4,8275	-48,1736	203
Salto do Céu	MT	-15,1247	-58,1272	300,83
Santana do Araguaia	PA	-9,33861	-50,3503	176,75
Santo Antônio do Leste	MT	-14,9278	-53,8836	664,21
São Félix do Araguaia	MT	-11,6189	-50,7278	201,37
São José do Rio Claro	MT	-13,4539	-56,6772	339,59
São Luís	MA	-2,52667	-44,2136	54,8
Serra dos Carajás	PA	-6,0775	-50,1422	707
Sinop	MT	-11,9822	-55,5661	366,57
Sorriso	MT	-12,555	-55,7228	379,31
Tangara da Serra	MT	-14,65	-57,4317	440,01
Vila Bela da Santíssima Trindade	MT	-15,0628	-59,8731	213
Vilhena	RO	-12,735	-60,1578	583,3

O presente estudo baseou-se em dados diários de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, obtidos a partir de estações meteorológicas automáticas (EMAs) e de projeções climáticas simuladas da Fase 6 do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6).

Os dados diários das séries temporais observadas foram obtidos a partir das EMAs do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) (<https://bdmep.inmet.gov.br/>).

Os dados simulados foram obtidos na plataforma da Organização Intergovernamental do Serviço Copernicus de Mudanças Climáticas (*Copernicus Climate Change Service* - <https://climate.copernicus.eu/>), operada pelo *European Centre for Medium-Range Weather*

Forecasts (ECMWF), em nome da Comissão Europeia, e estão disponíveis no C3S *Climate Data Store (CDS)*. Extraídos no formato de arquivo (NetCDF) das séries temporais diárias (precipitação, temperatura, velocidade do vento e umidade) nas projeções do CMIP6 para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, nos cenários de forçamento futuro (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), utilizando o modelo HadGEM3-GC31-LL (Reino Unido), que possui uma resolução espacial nominal de aproximadamente 135 km. Esse valor representa o tamanho médio de cada célula da grade computacional do modelo, correspondendo a uma resolução de cerca de 1,25° de latitude por 1,875° de longitude, a partir da qual são geradas as estimativas dos diversos parâmetros atmosféricos (IPCC, 2023).

Os dados meteorológicos do CMIP6 para a área de estudo foram obtidos com base nas localizações de cada estação meteorológica e, posteriormente, ajustados para garantir a compatibilidade com os dados observados nas estações meteorológicas, por meio da padronização de unidades e de fatores de conversão (Allen et al., 1998), conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17. Características e fatores de conversão das variáveis meteorológicas do CMIP6

Variável	Unidade	Fator de conversão
Precipitação (pr)	$kg \cdot m^{-2} s^{-1}$	$pr [mm \cdot dia] = pr [kg \cdot m^{-2} s^{-1}] * \frac{86400}{1}$
Temperatura do ar próximo à superfície (Tas)	K	$(tas) K \quad tas[C] = tas[K] - 273,15$
Umidade relativa (hurs)	%	$hurs[unidade] = hurs [\%]/100$
Velocidade do vento próxima à superfície (sfcWind)*	$m \cdot s^{-1}$	$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z) - 5,42}$ $u_2 = u_{10} \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot 10) - 5,42}$ $= 0,74795 u_{10}$

*Conversão também nos dados das EMAs

A umidade relativa do ar foi obtida a partir das variáveis temperatura e umidade específica próximas à superfície do CMIP6 e calculada a partir da pressão de saturação do vapor d'água (e_s) e da pressão parcial do vapor (e). A pressão atmosférica foi ajustada em função da altitude pela equação barométrica (Eq. 22), e os resultados foram expressos em hPa. A pressão real de vapor (e_a) foi calculada a partir da umidade específica (q) e da pressão atmosférica (P), segundo a relação apresentada por (Allen et al., 1998) (Eq. 23). A pressão de saturação de vapor d'água (e_s , em hPa) em função da temperatura (T em °C) foi estimada pela equação empírica de Tetens (1930) (Allen et al., 1998) (Eq. 24), obtendo-se, assim, a umidade relativa (UR) pela razão entre as pressões real e de saturação do vapor d'água (Eq. 25).

$$P = P_0 \times \left(1 - \frac{0,0065 \times z}{T_0}\right)^{5,256} \quad \text{Eq. 22}$$

Em que: P – pressão atmosférica no local; P_0 – pressão ao nível do mar (1013,25 hPa); z – altitude (m); T_0 – temperatura média do ar ao nível do mar.

$$e_a = \frac{q \times P}{0,622 + 0,378 \times q} \quad \text{Eq. 23}$$

Em que: e_a - pressão real de vapor; q – umidade específica (kg/kg); P – pressão atmosférica total (Lipa); 0,622 – razão entre as massas molares do vapor de ar seco.

$$e_s = 6,112 \times \exp\left(\frac{17,67 \times T}{17,67 \times T + 243,04}\right) \quad \text{Eq. 24}$$

Em que: e_s - pressão de saturação do vapor d'água (hPa); T - temperatura do ar (°C); exp – função exponencial natural (base e).

$$UR = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad \text{Eq. 25}$$

Em que: UR – umidade relativa do ar; e - pressão de vapor d'água (hPa); e_s - pressão de saturação do vapor d'água (hPa).

Quando se comparam os dados observados aos dados de projeções climáticas, os resultados geralmente apresentam erros sistemáticos, o que requer a correção do viés. Com o objetivo de minimizar esses erros, os dados das variáveis meteorológicas das projeções referentes aos anos analisados foram extraídos com base nas coordenadas das estações automáticas do INMET, em escala diária.

Os dados das variáveis temperatura, umidade e vento obtidos nas projeções climáticas foram submetidos a um processo de correção de viés (*bias correction*) por meio do método de escalonamento linear (*Linear Scaling*). Este procedimento teve como objetivo ajustar matematicamente as saídas do modelo às condições observadas nas estações meteorológicas do INMET, aproximando os dados simulados da realidade local e reduzindo distorções sistemáticas nas variáveis. Essa correção assegura que as incertezas das projeções geradas pelo modelo HadGEM3-GC31-LL do CMIP6 sejam minimizadas, permitindo uma análise mais fidedigna das projeções para os diferentes estados analisados. A correção do viés é uma

metodologia robusta para estudos em escala regional ou quando a preservação da tendência física do modelo é prioritária (Eq. 26).

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - x_i) \quad \text{Eq. 26}$$

em que: $\hat{x}_i$ refere-se aos dados das projeções e x_i são os dados das estações meteorológicas.

A correção de viés nos dados de projeções teve como objetivo mitigar desvios de magnitude sistêmica, sem, contudo, alterar a variabilidade interanual e os sinais de tendência originais das projeções do CMIP6, para a análise de índices futuros de perigo de incêndio florestal. Esta técnica não equaliza extremos ou variações; ao corrigir apenas o viés médio, preserva as características físicas do modelo HadGEM3-GC31-LL do CMIP6, evitando a introdução de artefatos estatísticos que métodos mais complexos poderiam gerar na ausência de uma rede de estações suficientemente densa. A escolha desse procedimento é respaldada por estudos brasileiros recentes que avaliaram produtos obtidos da Plataforma Copernicus, dentre eles, os estudos de Tavares et al. (2024) e Lotufo et al. (2025), que reiteram a necessidade de ajustes regionais como etapa indispensável para a minimização de erros sistemáticos (Farfán et al., 2024; Almagro et al., 2024).

Estudos brasileiros sobre o clima alertam contra o "forçamento" de projeções com base em bases de dados incompletas. Devido à baixa densidade de monitoramento e às falhas históricas na Amazônia e no Cerrado, metodologias de correção muito complexas são evitadas. O objetivo é impedir que erros estatísticos mascarem as tendências reais de variáveis como umidade e temperatura, preservando as particularidades geográficas da região frente aos modelos globais (Dhawan et al., 2024).

Os dados de precipitação foram ajustados por meio do Índice de Precipitação Normalizada (SPI), utilizado para monitorar a variabilidade anual devido à ampla dimensão territorial (Santos et al., 2014). Considerando que a distribuição da chuva é assimétrica, os valores foram inicialmente transformados para uma distribuição normal e, posteriormente, calculados conforme a equação 27.

$$SPI = Zi = \frac{(Pi - \bar{P}_i)}{\sigma_i} \quad \text{Eq. 27}$$

em que: SPI é a Precipitação Normalizada; Zi variável reduzida ou índice padronizado.

da distribuição normal da precipitação; i é a escala de tempo; P_i é a precipitação observada (acumulada) para o período; $\bar{P}_i$ Representa a média aritmética da série histórica de precipitação para aquela mesma escala de tempo e local e σ_i é o desvio padrão da série ajustada.

A velocidade do vento foi padronizada na altura de referência de 2,0 m (ALLEN et al., 1998), considerando a estrutura da vegetação predominante no mosaico Amazônia-Cerrado. Para viabilizar a análise do perigo de incêndio, os dados provenientes de projeções climáticas (originalmente a 10 m) foram ajustados por meio de um perfil logarítmico (Eq.28), assumindo uma rugosidade superficial de grama curta. Além do ajuste de altura, a unidade de medida foi convertida para m.s^{-1} . Tal procedimento é consolidado na literatura (Lotufo et al., 2025) por permitir a comparação sistemática entre regiões com diferentes padrões florestais e padrões de altura de dossel variáveis.

Para converter os dados de vento à altura de referência, aplicou-se o perfil logarítmico de vento considerando a rugosidade superficial de grama curta (Allen et al., 1998). O ajuste foi aplicado nas séries temporais provenientes do INMET e nas projeções do CMIP6, permitindo a correção do gradiente de altura e a subsequente compatibilização entre as observações de superfície e as estimadas pelas projeções (Eq. 28).

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z) - 5,42} = 0,74795 u_{10} \quad \text{Eq. 28}$$

em que: U_2 : velocidade do vento a 2,0 m acima da superfície do solo m.s^{-1} ; U_{10} : velocidade do vento a 10,0 m acima da superfície do solo m/s ; U_z : velocidade do vento medida a z metros acima da superfície do solo m.s^{-1} ; Z : altura da medição acima da superfície do solo (m); e $\ln$: perfil logarítmico de velocidade do vento para medições acima de uma superfície de grama curta.

4.2.1 Preenchimento de falhas

O preenchimento das falhas nas séries históricas das variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) provenientes das estações do INMET foi realizado por meio de métodos específicos de consistência de dados. A temperatura e a umidade foram corrigidas por meio de ponderação regional, com regressões lineares entre estações adjacentes (Sabino et al., 2022). Para a precipitação, as lacunas foram preenchidas com dados do satélite TRMM (período 2015–2024), priorizando-se os pontos de grade mais próximos às coordenadas das estações físicas.

Para suprir as falhas nos registros de precipitação das estações meteorológicas, utilizaram-se dados do TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), disponibilizados no banco de dados do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO), coordenado pela EMBRAPA, com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (latitude e longitude). A obtenção dos dados do TRMM foi realizada a partir das coordenadas geográficas da estação meteorológica do INMET, priorizando o entorno e a proximidade da estação a ser corrigida. Para cada estação do INMET, foram selecionados quatro pontos de dados do TRMM. Após a seleção dos valores diários de 2015 a 2024, os registros de chuva do TRMM e da estação local foram organizados por ano e por período (seco e chuvoso), o que permitiu o cálculo dos desvios. Quando se observaram discrepâncias superiores a 40% entre os totais mensais da estação e a média do TRMM, os valores inconsistentes da estação foram substituídos pelos dados médios diários do TRMM. Por fim, as inconsistências na velocidade do vento foram sanadas com base nas médias mensais e sazonais da própria série histórica da estação (SOUZA et al., 2013), garantindo a homogeneidade dos dados utilizados nos cálculos dos índices de perigo.

4.2.2 Índices de perigo de incêndio

Após a correção das variáveis meteorológicas, os dados diários das estações e as projeções para o período de 2015 a 2024 foram agrupados por meio do cálculo das médias. Esse procedimento permitiu obter um ano médio composto, representativo tanto das observações quanto das simulações de cada cenário. A partir desses dados consolidados, aplicaram-se os índices de perigo de incêndio FMA+ e P-EVAP (Tabela 18), considerados recomendados para a avaliação do perigo de incêndio na região de transição Cerrado-Amazônia, tanto para os dados provenientes das estações meteorológicas quanto para os das projeções climáticas dos modelos do CMIP6 (Casavecchia et al., 2019).

Tabela 18. Índice de determinação de perigo de incêndio

Índice	Fórmulas utilizadas	Interpretação
FMA+	$FMA^+ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H} \right) e^{0,04v}$	FMA ⁺ = Fórmula de Monte Alegre Modificada; H = umidade relativa do ar (%) n = número de dias sem chuva superior ou igual a 13 mm v = velocidade do vento (m.s ⁻¹).
P-EVAP	$P - EVAP = \sum_{i=1}^n P - EVAP$	P-EVAP = relação entre a precipitação (P) e a evapotranspiração* (EVAP), expressa em mm.dia ⁻¹ .

Fonte: adaptado de Souza; Casavecchia; Stangerlin (2012); Casavecchia et al. (2019)

*evapotranspiração potencial (radiação extraterrestre e a temperatura média diária) obtida pelo modelo de Camargo (Camargo et al., 1999)

O índice de perigo de incêndio P-EVAP depende de dados de evapotranspiração potencial. Para o cálculo dessa variável, adotou-se como referência o modelo proposto por Camargo et al. (1999) (Eq. 29), por requerer um número reduzido de dados de entrada e por apresentar bom desempenho nas condições climáticas da área de estudo (Tanaka et al., 2016).

$$ET_0 = F \cdot H_o \cdot T_{med} \quad \text{Eq. 29}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração potencial; F é o fator de correção do modelo; H_o é a radiação extraterrestre em $\text{MJ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$ e T_{med} é a temperatura média diária, em $^{\circ}\text{C}$.

Além das fórmulas apresentadas, os índices de perigo de incêndio FMA+ e P-EVAP e têm restrições específicas quanto às condições de aplicação, com limites estabelecidos (Tabela 19).

Tabela 19. Restrição à aplicação dos índices de perigo de incêndio: FMA+ e P-EVAP

Índice de Perigo	Chuva do dia (mm)	Modificações nos cálculos
FMA+	$\leq 2,4$	Nenhuma
	2,5 a 4,9	Abater 30% da FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
	5,0 a 9,9	Abater 60% da FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
	10,0 a 12,9	Abater 80% da FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia.
	$> 12,9$	Interromper o cálculo ($FMA = 0$) e recomençar a somatória no dia seguinte.
P-EVAP	$\leq 2,0$	Nenhuma
	2,1 a 5,0	Abater 25 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
	5,1 a 8,0	Abater 50 % no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
	8,1 a 10,0	Abandonar a somatória anterior e recomençar o cálculo, isto é, $G = (d.t)$ do dia.
	$> 10,0$	Interromper o cálculo ($G=0$), recomençando a somatória no dia seguinte ou quando a chuva cessa

Fonte: Casavechia et al. (2019)

Após o cálculo dos índices, os resultados foram classificados em cinco classes de perigo de incêndio, conforme os níveis: nulo, pequeno, médio, alto e muito alto (Tabela 20).

Tabela 20. Agrupamento em classes de perigo de incêndio de acordo com o índice de perigo

Classes de Perigo	FMA+	P-EVAP
Nulo	$\leq 3,0$	≥ -5
Pequeno	3,1 a 8,0	-5 a -15
Médio	8,1 a 14,0	-15 a -35
Alto	14,1 a 24,0	-35 a -75
Muito Alto	$> 24,0$	< -75

Fonte: Casavechia et al. (2019)

4.2.3 Espacialização dos Índices de Perigo de Incêndio

A espacialização do perigo de incêndios para a área de estudo foi realizada no software QGIS (versão 3.40.10), seguindo um fluxo de processamento dividido em três etapas principais:

organização, tabulação, interpolação de dados e reclassificação categórica. Inicialmente, os dados provenientes das projeções climáticas e os dados *in situ* foram organizados em planilhas eletrônicas, contendo as coordenadas geográficas das estações e os respectivos valores calculados dos Índices de Perigo de Incêndios FMA+ e P-EVAP. Esta planilha foi importada para o ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) como uma camada de texto delimitado, utilizando o sistema de referência de coordenadas adequado à região. Em seguida, realizou-se a interpolação espacial para transformar os dados pontuais das planilhas em uma superfície contínua que cobrisse toda a área de estudo. Aplicou-se o método de interpolação IDW - inverso do quadrado da distância (Jiang, 2026). Esse processo permitiu estimar os níveis de perigo em áreas não amostradas, gerando um modelo raster para cada mês do ano. Após este processo, foram realizados uma reclassificação e um escalonamento, gerando mapas contínuos; os valores numéricos do índice foram reclassificados em uma escala qualitativa de perigo, conforme a literatura pertinente. A escala foi dividida em cinco classes distintas: Nulo, Pequeno, Médio, Alto e Muito Alto (Casavechia 2019). Para a representação visual, utilizaram-se a simbologia e uma paleta de cores em gradiente (do verde ao vermelho), o que facilitou a interpretação sazonal da suscetibilidade ao fogo.

Por fim, os mapas foram organizados em um painel multitemporal (de janeiro a dezembro), permitindo a análise comparativa da evolução espacial e temporal do perigo de incêndios ao longo do ano e evidenciando os períodos de maior vulnerabilidade ambiental.

4.2.4 Estatística

Com o objetivo de comparar as variáveis meteorológicas observadas *in situ* com as projeções do modelo HadGEM3-GC31-LL pertencente ao CMIP6, bem como seus resultados nos índices de perigo de incêndio, foram aplicados métodos estatísticos para avaliar o desempenho: a correlação de Pearson (Eq. 30), o índice de concordância (d) de Willmott (Eq. 31), o erro médio de viés MBE (Mean Bias Error) (Eq. 32), a raiz do erro quadrático médio RMSE (Root Mean Square Error) (Eq. 33) e o teste não paramétrico de Mann-Whitney (Eq. 34).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E)(O_i - O)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (E_i - E)^2] [\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2]}} \quad \text{Eq. 30}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad \text{Eq. 31}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)}{N} \quad \text{Eq. 32}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 33}$$

$$Z = \frac{U(YX) - n/2}{\sqrt{n(m+n+1)/12m}} \quad \text{Eq. 34}$$

em que: Pi são os dados observados (provenientes das estações meteorológicas); Oi são os dados estimados; neste trabalho, são os dados de reanálise.

O índice de concordância de Willmott avalia o grau de ajuste entre valores estimados e observados, variando de 0 (pior ajuste) a 1 (melhor ajuste possível) (Willmott, 1982). O erro médio de viés (MBE, *Mean Bias Error*) quantifica o desvio médio entre os valores estimados e os observados, sendo negativo quando há subestimação, positivo quando há superestimação e igual a zero em uma simulação perfeita. A raiz do erro quadrático médio (RMSE, *Root Mean Square Error*) expressa a magnitude da dispersão dos erros, sem indicar direção; quanto menor o valor, melhor o desempenho do modelo. Já o teste não paramétrico de Mann-Whitney avalia diferenças significativas entre as distribuições dos dois conjuntos de dados, considerando o valor de p ($< 0,05$) para validar a presença de tendências. O resultado, com base na posição relativa dos elementos entre as amostras, indica se há diferenças estatisticamente significativas entre as distribuições analisadas (Mabude et al., 2022).

A correlação de Pearson (r) foi empregada para avaliar a relação linear entre as variáveis meteorológicas observadas nas estações e os dados provenientes das projeções climáticas. Esse coeficiente permite quantificar a intensidade e a direção da associação entre duas variáveis contínuas, variando de -1 a +1, em que valores próximos de ± 1 indicam forte correlação e valores próximos de 0 sugerem ausência de relação linear (Souza et al., 2017; Silva, 2019).

4.3 Resultados

4.3.1 Estatística entre as variáveis meteorológicas dos dados obtidos nas estações meteorológicas do INMET e das projeções simuladas do ano médio referente ao período de 2015 a 2024

A aplicação do teste de Mann-Whitney na avaliação estatística dos dados observados das estações meteorológicas do INMET e dos dados simulados pelas projeções do CMIP6 indicou que os estados de Rondônia e Piauí apresentaram diferenças, com maior número de variáveis exibindo diferenças estatisticamente significativas e maior divergência entre os valores observados e os simulados.

As variáveis analisadas apresentaram valores de $p > 0,05$, indicando ausência de diferenças significativas entre os dados observados e os simulados. No entanto, no cenário SSP2-2.6, a temperatura média nos estados do Piauí e de Rondônia apresentou $p = 0,00$, assim como a variável de umidade relativa média em Rondônia, indicando diferenças estatística entre os dados observados do INMET e os simulados nas projeções do CMIP6 (Tabela 21).

O estado de Rondônia apresentou as maiores discrepâncias entre os dados observados e simulados no cenário SSP2-45, no qual a variável velocidade do vento apresentou $p > 0,05$. No Cenário SSP5-8.5, a temperatura média apresentou $p = 0,00$ nos estados do Piauí e de Rondônia, enquanto a umidade relativa média do ar apresentou diferença estatisticamente significativa em Rondônia ($p = 0,00$). Nos estados do Tocantins e do Maranhão, as variáveis não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre os cenários avaliados (Tabela 21).

Tabela 21. Valores médios do teste de Mann-Whitney das variáveis, por Estado, no ano médio dos dados observados e dos simulados da área de estudo

Cenário SSP1-2.6									
Variáveis	Estados						Ano médio		
	MT	TO	MA	PA	PI	RO	Média	Máx	Mín
Chuva	0,42	0,54	0,18	0,27	0,20	0,24	0,34	0,98	0,00
Tmed	0,18	0,36	0,06	0,11	0,01	0,00	0,15	0,96	0,00
URmed	0,31	0,54	0,39	0,25	0,85	0,00	0,35	0,95	0,00
Vvmed	0,39	0,32	0,07	0,21	0,18	0,14	0,26	0,93	0,00
Cenário SSP2- 4.5									
Variáveis	Estados						Ano médio		
	MT	TO	MA	PA	PI	RO	Média	Máx	Mín
Chuva	0,40	0,44	0,23	0,08	0,40	0,04	0,31	0,97	0,00
Tmed	0,20	0,12	0,07	0,12	0,00	0,00	0,13	0,88	0,00
URmed	0,39	0,31	0,23	0,09	0,82	0,00	0,30	0,96	0,00
Vvmed	0,68	0,18	0,07	0,06	0,13	0,62	0,26	0,92	0,00
Cenário SSP5-8.5									
Variáveis	Estados						Ano médio		
	MT	TO	MA	PA	PI	RO	Média	Máx	Mín
Chuva	0,37	0,55	0,27	0,31	0,28	0,12	0,34	0,92	0,00
Tmed	0,22	0,10	0,07	0,19	0,00	0,00	0,15	0,96	0,00
URmed	0,15	0,52	0,32	0,09	0,81	0,00	0,24	0,92	0,00
Vvmed	0,45	0,39	0,18	0,15	0,12	0,14	0,32	0,98	0,00

Nota: Chuva – precipitação pluviométrica (mm); Tmed – temperatura média (°C); URmed – umidade relativa média (%); Vvmed – velocidade média do vento a 2 metros de altura ($m.s^{-1}$).

A análise do erro médio de viés (MBE) revelou comportamentos distintos entre as variáveis meteorológicas. Quanto à chuva, observou-se uma discrepância sistemática entre os dados observados e os estimados. Os valores de MBE variaram de -0,08 a 1,91, o que evidencia predominância de vieses positivos. Embora uma pequena parcela (16%) das estações tenha apresentado valores negativos, a tendência geral indicou superestimação da chuva pelos modelos em todos os cenários analisados (Tabela 22).

As médias do MBE nos cenários foram positivas (0,47, 0,41 e 0,52), indicando que o modelo HadGEM3-GC31-LL tende a projetar volumes de chuva superiores aos observados. Destaca-se o cenário SSP5-8.5, que apresentou o maior viés médio (0,52), sugerindo uma tendência de intensificação da superestimação sob condições de maior forçante radiativa (Tabela 22). O valor máximo de 1,91 foi registrado na estação de Farol de Santana (MA) no cenário SSP1-2.6.

Em contrapartida, as variáveis temperatura média, umidade relativa média e velocidade do vento apresentaram ajustes satisfatórios, com valores de MBE próximos de zero. Apesar de os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 apresentarem médias ligeiramente negativas, sugerindo uma discreta subestimação, essas variações não foram estatisticamente significativas, confirmando a boa concordância entre os dados simulados e observados para essas variáveis (Tabela 22).

O indicador estatístico da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) apresentou valores de dispersão inferiores a 6,0%, considerados aceitáveis, o que demonstra que o modelo HadGEM3-GC31-LL apresenta baixa dispersão na variabilidade climática e bom ajuste entre os dados observados e estimados no ano médio em todos os cenários. No entanto, especificamente para a variável velocidade do vento, os valores de RMSE inferiores a 5,0 evidenciam as limitações e os erros dos modelos globais (Tabela 22). Tais diferenças ocorrem principalmente devido à dificuldade de simular a predominância de ventos fracos a moderados e à escala de grandeza reduzida dessa variável na região de estudo.

O índice de Willmott indicou uma concordância variando de moderada a excelente, com valores médios de 0,40 a 0,91 nas variáveis meteorológicas, validando a habilidade do modelo HadGEM3-GC31-LL em reproduzir a variabilidade climática, com melhores resultados para a variável umidade relativa, seguidos por temperatura e chuva, e as piores médias para a variável velocidade do vento, que apresentou os menores coeficientes de concordância (Tabela 22).

Na região norte do estado de Mato Grosso, o índice de umidade relativa foi superior a 0,97, enquanto as demais variáveis apresentaram valores superiores a 0,60, exceto a velocidade do vento, que foi inferior a 0,60. Em várias localidades, os valores obtidos foram próximos de zero ou negativos. Entretanto, no cenário SSP2-4.5, para Farol de Santana (MA), a umidade relativa (0,07) e a temperatura média (0,22) indicaram baixo desempenho do modelo, que não reproduziu as condições climáticas observadas nos dados (Tabela 22).

A análise da correlação de Pearson (r) revelou uma forte associação linear entre os dados observados e as simulações do modelo na maioria das estações. Os coeficientes obtidos do ano médio variam de -0,79 a 0,97, o que demonstra a capacidade do modelo HadGEM3-GC31-LL de captar com precisão a tendência e a variabilidade das variáveis meteorológicas na maioria

das estações. No entanto, para a variável vento, essa correlação não foi satisfatória. Nas regiões de Farol de Santana (MA), Serra dos Carajás (PA) e Grajau (MA), os valores negativos de -0,61, -0,79 e -0,15, respectivamente, não indicaram correlação, pois, quando o dado real sobe, o modelo desce de forma consistente, tornando a relação inversamente proporcional aos dados observados (Tabela 22).

Tabela 22. Indicadores estatísticos (MBE, RMSE, Willmott e Pearson) para os dados observados no INMET e para as projeções simuladas do ano médio (2015-2024)

Cenários	Variáveis			
	Chuva	Tmed	URmed	Vvento
MBE				
SSP-2.6	0,47	0,00	0,02	0,00
SSP-4.5	0,41	0,01	-0,01	0,00
SSP-8.5	0,52	-0,01	0,00	0,00
RMSE				
SSP-2.6	4,97	1,33	4,87	0,30
SSP-4.5	4,76	1,51	4,93	0,43
SSP-8.5	4,95	1,35	5,40	0,31
WILLMOTT				
SSP-2.6	0,71	0,72	0,91	0,58
SSP-4.5	0,73	0,71	0,91	0,59
SSP-8.5	0,72	0,71	0,88	0,58
PEARSON				
SSP-2.6	0,54	0,66	0,87	0,40
SSP-4.5	0,56	0,69	0,87	0,45
SSP-8.5	0,55	0,65	0,85	0,41

* SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*)- Caminhos Socioeconômicos Compartilhados.

4.3.2 Análise dos dados das variáveis meteorológicas observadas nas estações meteorológicas e simuladas pelas projeções nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, referente ao ano médio de 2015-2024

O comportamento das variáveis meteorológicas observadas no ano médio revela uma variabilidade sazonal, característica das regiões de interface entre o Cerrado e a Amazônia. Os padrões mensais bem definidos ao longo do ano permitiram identificar a alternância entre os períodos chuvoso e seco. A chuva apresentou grande variação nos primeiros meses do ano (de janeiro a março), com valores acima de $200 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ tanto nos dados observados quanto nos simulados pelas projeções. A partir de maio, o período é marcado pelo início da estação seca, caracterizada pela diminuição das chuvas, que se estende até setembro, com valores médios inferiores a $50 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ e baixa dispersão. Entretanto, a partir de outubro, o volume de chuva voltou a aumentar gradualmente, marcando o início do período chuvoso, com maiores volumes observados em dezembro, atingindo $200 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ nos dados observados e, nos dados

simulados do ano médio para todos os cenários, valores superiores a $300 \text{ mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ (Figura 23).

Na região de transição, a chuva apresentou valores superiores a $1.000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ e média anual de $1.624,91 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, com variação de $1.095,34$ a $2.104,75 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ nos dados observados do ano médio, enquanto nos dados simulados pelo modelo HadGEM3-GC31-LL, nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a média anual de chuva foi de $1.797,74$, $1.786,67$ e $1.816,39 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, respectivamente. Contudo, nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, as precipitações médias de agosto atingiram $1.202,46$ e $1.057,89 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, respectivamente.

As regiões com máximos pluviométricos anuais, a partir dos dados observados, ocorreram na porção oeste, no estado de Rondônia, representada por Cacoal e Vilhena, com totais anuais de $2.005,91$ e $1.990,30 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, respectivamente, e na porção norte, no estado do Pará, onde o município de Rondon do Pará registrou $2.080,85 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, seguido de São Luís, capital do estado do Maranhão, que apresentou $2.104,79 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Em contraste, a região Nordeste da área de estudo, localizada no estado do Maranhão, apresentou os menores totais pluviométricos, destacando-se o município de Colinas (MA), com o menor índice pluviométrico regional, de $1.095,34 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Nos dados simulados pelas projeções, para o ano médio, os valores foram superiores aos observados para as mesmas localidades e também para Araguaína (TO), com $2.086 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, e Farol de Santana (MA), com $2.633,97 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, no cenário SSP1-2.6. Enquanto no cenário SSP2-4.5 os valores simulados para Farol de Santana (MA) tiveram média de $2.551,77 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, no SSP5-8.5 a média foi de $2.048,24 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ para a região de Sorriso (MT).

A temperatura média dos dados observados variou de $25,5$ a $27,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$; o mês de junho apresentou a menor temperatura e o de setembro, a maior. Nos dados simulados para o ano médio, o cenário SSP2-4.5 apresentou as menores e maiores temperaturas: em junho, $23,6$ e $29,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. O período de abril a agosto apresentou as menores temperaturas, tanto nos dados observados quanto nos simulados, no ano médio (Figura 23).

As temperaturas médias diárias do ano médio observado oscilaram entre $25,6$ e $31,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto as mínimas apresentaram maior variabilidade, com queda mais acentuada entre maio e julho, período em que as medianas atingiram aproximadamente $20,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os valores médios de umidade relativa do ar foi de aproximadamente 70% sendo os mais elevados de janeiro a abril, com medianas de 79 a 82% , nos dados observados e nos simulados das projeções, com queda acentuada de junho a outubro, tanto nos dados observados e simulados do ano-médio, com os menores valores de 60 a 53% de umidade no mês de agosto, em todos os cenários, no entanto, a umidade relativa do ar nos cenários SSP1- 2.6 e SSP2- 4.5

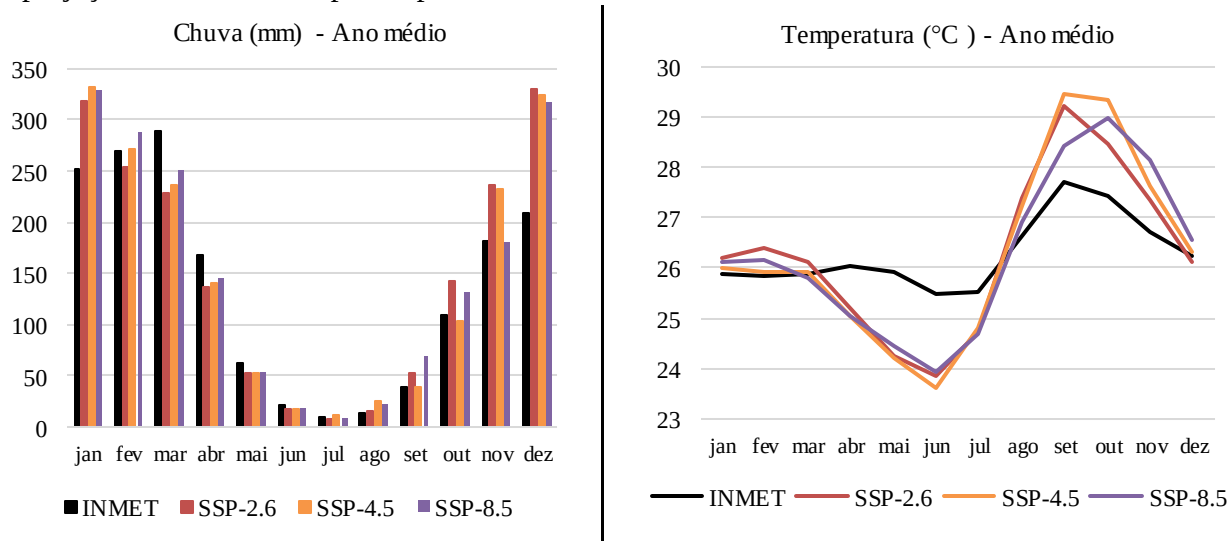
atingiram os percentuais mais baixos de 53 a 56%, nos meses de agosto e setembro, respectivamente (Figura 23).

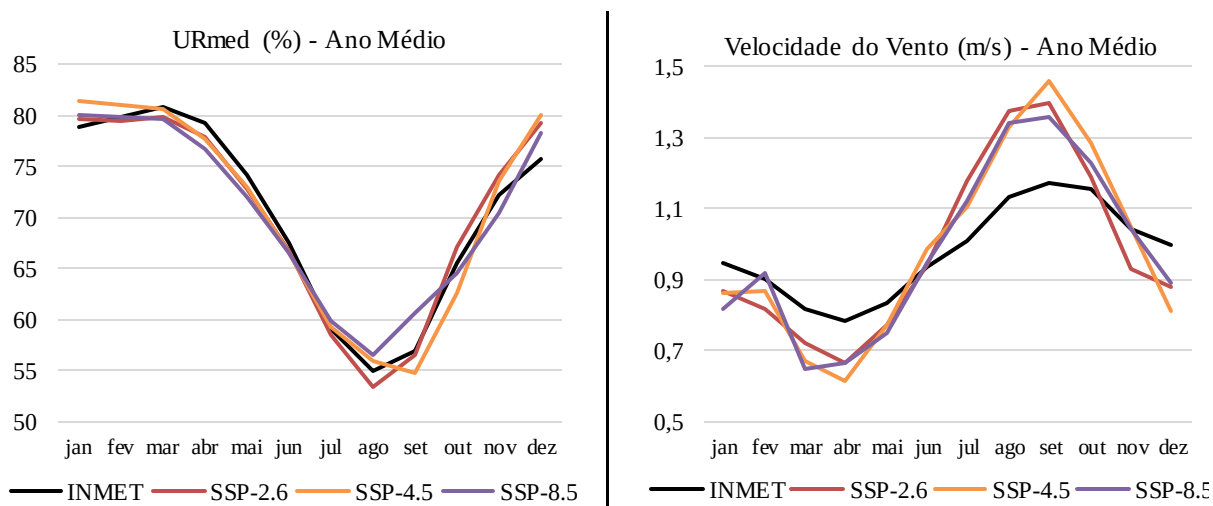
Constatou-se uma redução acentuada da umidade relativa do ar a partir de maio, atingindo os valores mais baixos entre junho e agosto (medianas de 50 a 60%), seguindo a mesma tendência de distribuição da chuva. Os valores extremos encontrados mostram que, em Nova Ubiratã (MT), a umidade diária atingiu 92% no período chuvoso e, em Palmas (TO), 31% no período de estiagem. A umidade relativa mínima evidencia a variabilidade climática na transição, com valores diários de umidade do ar entre 30 e 50% durante o período seco (de maio a setembro), considerando tanto os dados observados quanto os simulados pela projeção, em todos os cenários.

A velocidade do vento no ano médio dos dados observados variou de $0,77 \text{ m.s}^{-1}$ em abril a $1,17 \text{ m.s}^{-1}$ em setembro. Para o ano médio dos dados simulados, a velocidade variou de $0,61$ a $1,45 \text{ m.s}^{-1}$, com as menores e maiores velocidades registradas no cenário SSP2-4.5 (Figura 23).

As medianas da velocidade do vento variaram ao longo do ano, situando-se entre $0,11$ e $3,0 \text{ m.s}^{-1}$. Os valores diários ao longo de toda a transição variaram entre $0,73$ e $1,22 \text{ m.s}^{-1}$. Todavia, nos meses mais secos (de junho a setembro), houve um aumento da velocidade do vento em toda a região, principalmente nos estados de Piauí, Pará e Rondônia, seguido da dispersão dos dados e de valores superiores a 3 m.s^{-1} . Com valor máximo de $3,52 \text{ m.s}^{-1}$ em Parnaíba (PI) e mínimo de $0,11 \text{ m.s}^{-1}$ em Araguaína (TO).

Figura 23. Médias mensais das variáveis meteorológicas observadas nas estações e simuladas pela projeção, do ano médio para o período de 2015 a 2024





4.3.3 Análise dos dados das variáveis meteorológicas simuladas obtidos das projeções nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, referentes aos anos de 2030, 2050, 2075 e 2100

Nas projeções para 2030, 2050, 2075 e 2100, as médias anuais de chuva nos três cenários avaliados variaram entre 166,74 e 202 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. A análise espacial dos cenários projetados indicou que os maiores índices médios anuais de chuva se concentraram no estado de Rondônia (2.064,16 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$), seguido de Mato Grosso (1.828,19 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) e Pará (1.730,00 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$). Na sequência, observaram-se volumes inferiores nos estados do Maranhão (1.679,00 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$), Piauí (1.490,00 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) e Tocantins (1.485,00 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$).

A temperatura média anual nos cenários variou de 20,73 a 34,77 °C, com picos de até 39,6 °C. Quanto à umidade relativa, as médias anuais simuladas oscilaram entre 60,8 e 66,2%. Enquanto a velocidade do vento apresentou médias anuais de 0,88 a 1,34 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com valores máximos de 2,74 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e mínimos de 0,14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Para o cenário SSP1-2.6, o índice pluviométrico anual médio acumulado oscilou entre 1.558,78 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ em 2030 e 1.367,00 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ em 2075, com média geral de chuva na transição Cerrado-Amazônia de 192,02 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Entretanto, observou-se uma expressiva variabilidade interanual neste cenário, com valores que oscilaram entre 142,51 e 233 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, com volume mínimo de média diária estimado para 2075 e máximo para 2100.

No cenário SSP1-2.6, os meses de janeiro e fevereiro de 2030 registraram o maior volume de chuva, com menor valor mensal em julho, de 12 $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$, e maior em fevereiro, de 563 $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$. O ano de 2100 apresentou maior volume de chuva de agosto a outubro, com os menores volumes observados em março e abril (Figura 24).

As projeções de temperatura média anual dos cenários revelaram padrões distintos entre si. No cenário de baixas emissões (SSP1-2.6), os valores diários de temperatura oscilaram entre 20,7 e 33,1 °C, com mínimas em 2100 e máximas em 2075.

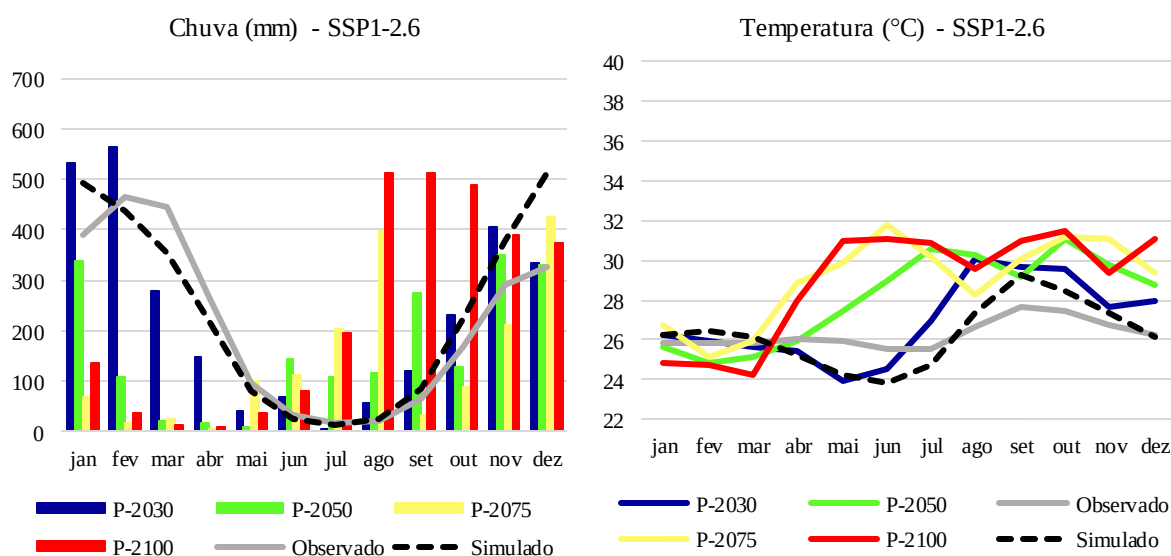
Os valores mensais de temperatura oscilaram entre 24 e 31,8 °C ao longo de todos os anos, com a temperatura mais baixa em março de 2100 e a mais alta em junho de 2075. De janeiro a março, os valores das temperaturas simuladas foram inferiores às observadas no ano médio; contudo, para o restante do período, os valores projetados foram superiores aos observados (Figura 24).

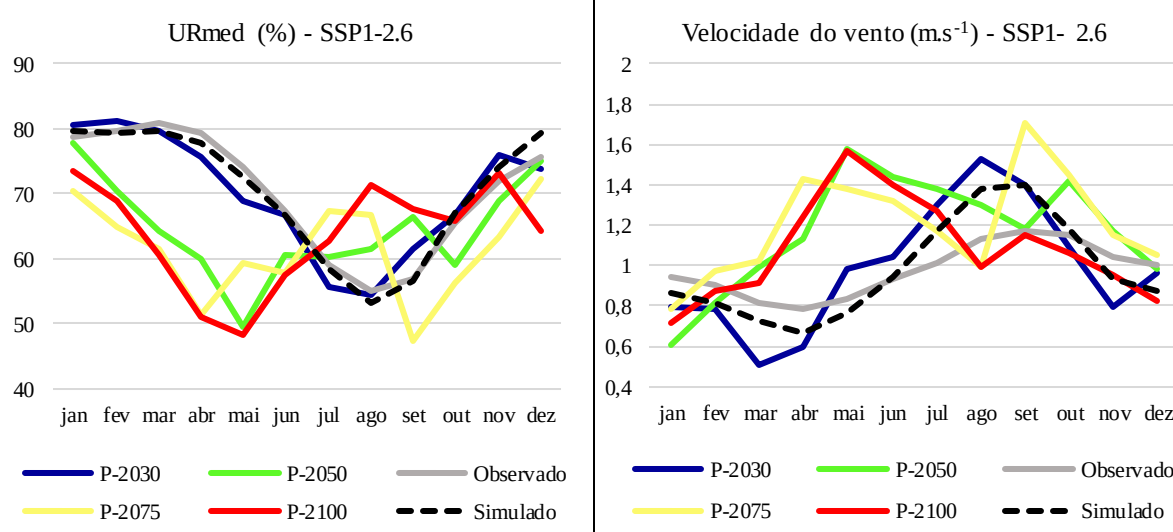
Em relação à umidade relativa média, as simulações indicaram um valor que oscilou entre 48,3% e 81,3% ao longo do período analisado. No primeiro semestre do ano médio, a umidade foi inferior aos valores observados. Nos anos de 2050 e 2100, os meses de abril e maio atingiram 50%, enquanto, de julho a outubro, os valores simulados foram superiores aos observados, com umidade de aproximadamente 70% (Figura 24). Neste cenário de baixas emissões (SSP1-2.6), foram observados máximos diários de 83% e mínimos próximos de 47%.

A velocidade média mensal do vento variou entre 0,5 e 1,70 m.s⁻¹, com o mínimo registrado em março de 2030 e o máximo em setembro de 2075. De modo geral, as velocidades projetadas superaram as observadas, exceto nos meses de fevereiro a abril de 2030 e de agosto a outubro de 2100, quando os valores foram inferiores à média observada (Figura 24).

A velocidade do vento neste cenário: em todos os anos analisados, as médias anuais variaram de 0,98 a 1,20 m.s⁻¹, com picos de 2,07 a 2,74 m.s⁻¹ nos dados simulados.

Figura 24. Gráfico das variáveis meteorológicas, chuva, temperatura, umidade relativa média e velocidade do vento, para o cenário SSP1-2.6, para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, além dos valores observados e simulados para o período de 2015 a 2024





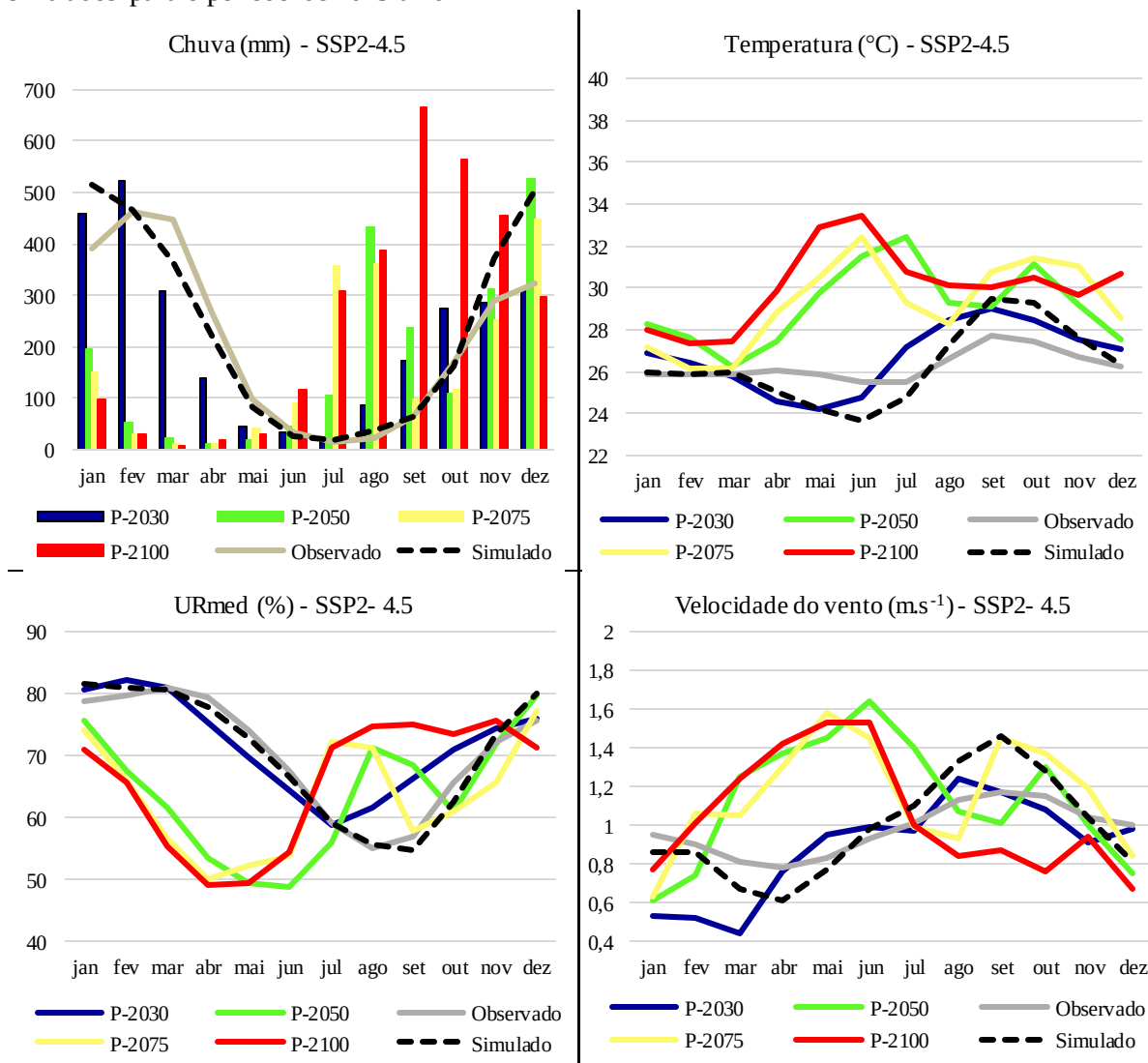
No cenário SSP2-4.5, as médias de chuva variaram de 166,37 a 249,35 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Em 2075, registrou-se o menor volume, com um acumulado de 1.265,13 mm, enquanto, em 2100, o maior volume, com 1.896,13 mm. De janeiro a junho, as médias mensais foram inferiores a 200 mm nos anos de 2050, 2075 e 2100, com maiores volumes pluviométricos de setembro a novembro no ano de 2100 (Figura 25).

A temperatura média anual neste cenário intermediário variou de 22,3 °C em 2030 a 34,5 °C em 2100. As médias mensais variaram de 26 °C em fevereiro de 2075 a 33,5 °C em junho de 2100; no entanto, em todos os anos do cenário, a temperatura simulada pelas projeções foi superior aos valores observados no ano médio.

A umidade relativa do ar nos cenários avaliados apresentou médias anuais entre 42,7 e 84,3%. Na escala mensal, os valores variaram de 49 a 83%, com comportamentos distintos ao longo do ano: de janeiro a julho, as médias simuladas foram inferiores à umidade observada e oscilaram de 49 a 74%; e, no período de agosto a novembro, os valores projetados superaram as observações, situando-se entre 58 e 75%.

A velocidade média do vento variou entre 0,88 e 1,15 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com máximas de 2,54 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ registradas em 2075 e 2100 (Figura 25). De março a julho, as velocidades situaram-se entre 1,01 e 1,64 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, superando os valores observados em todos os anos do cenário. Em contrapartida, de agosto a novembro de 2100, os valores foram inferiores aos observados, variando de 0,93 a 0,99 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figura 25. Médias mensais de chuvas, temperatura do ar, umidade relativa média do ar e velocidade do vento, para o cenário SSP2-4.5, nos anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, além dos valores observados e simulados para o período de 2015 a 2024



No cenário SSP5-8.5, a chuva média acumulada foi de 666,99 mm·ano⁻¹ nos anos analisados. As médias anuais diminuíram de 238,15 mm·ano⁻¹ em 2030 para 113,03 mm·ano⁻¹ em 2100. Em relação aos volumes máximos anuais, destacaram-se os anos de 2050, com 1.972,35 mm·ano⁻¹, e de 2100, com 1.104,64 mm·ano⁻¹.

A chuva registrou sua maior média mensal em janeiro de 2030, atingindo 551 mm·mês⁻¹. De modo geral, os maiores acumulados ocorreram no mesmo ano, entre novembro e fevereiro, com médias superiores a 400 mm·mês⁻¹. Em contrapartida, os menores volumes foram observados de abril a agosto de 2030, com médias de 25 a 347 mm·mês⁻¹ (Figura 26).

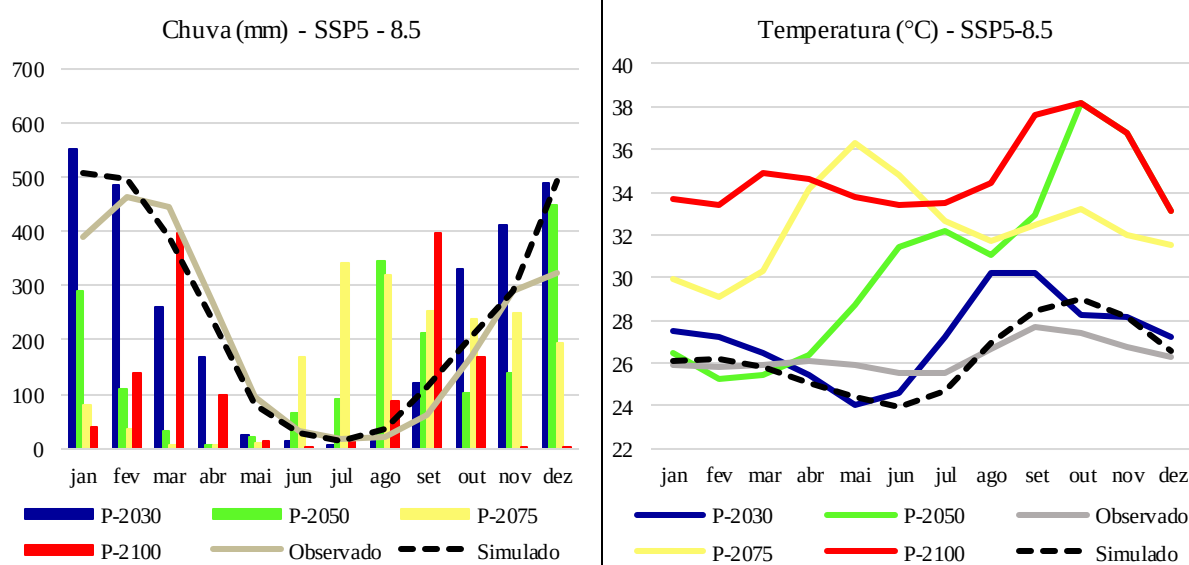
No cenário de altas emissões (SSP5-8.5), a temperatura média anual variou entre 27,2 e 34,8 °C, com o mínimo registrado em 2030 e o máximo em 2100, atingindo um extremo de 39,6 °C. As projeções mensais oscilaram de 25 °C em maio de 2030 a 38,2 °C em outubro de

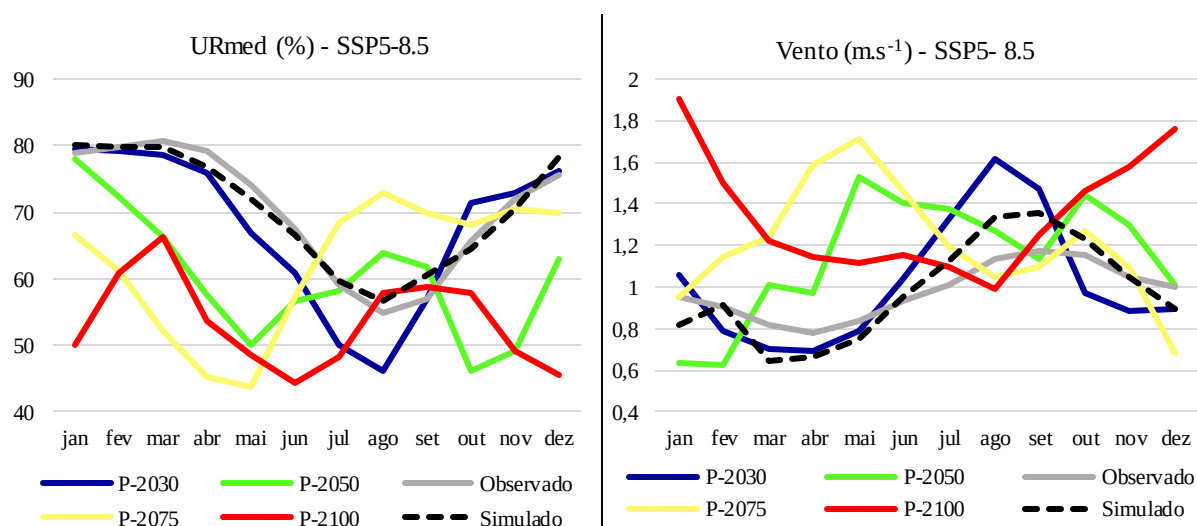
2100. Em quase todo o período, as temperaturas simuladas superaram as observadas, com exceção dos meses de março a junho nos anos de 2030 e 2050 (Figura 26).

A umidade relativa do ar oscilou entre 38,8 e 83,5%, com o valor máximo estimado para 2030 e o mínimo para 2100. As médias mensais no cenário variaram de 44% a 73%, com os menores percentuais registrados em maio e os maiores em agosto, ambos em 2030. De modo geral, os dados simulados apresentaram valores inferiores aos observados; apenas em 2030 e 2050, entre julho e outubro, as médias mensais foram superiores às observadas (Figura 26).

A velocidade do vento no cenário (SSP5-8.5) apresentou médias mensais de 0,63 a 1,90 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ em janeiro, nos anos de 2050 e 2100, respectivamente. A velocidade do vento estimada foi superior à observada em todos os anos do cenário, excetuados os meses de agosto e setembro de 2075 e 2100 (Figura 26). No entanto, as médias anuais oscilaram entre 1,02 e 1,34 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com máximas de 2,69 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e mínimas de 0,26 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Regionalmente, as maiores médias foram registradas no estado do Piauí (2,41 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e no Maranhão (1,26 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Figura 26. Gráfico das variáveis meteorológicas, chuva, temperatura, umidade relativa média e velocidade do vento, para o cenário SSP5-8.5, para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, além dos valores observados e simulados para o período de 2015 a 2024





4.3.4 Análise dos índices FMA+ e P-EVAP obtidos nas estações do INMET utilizando a média específica de 2015 a 2024

A análise do perigo de incêndio, por meio dos índices FMA+ e P-EVAP e da distribuição das classes de perigo, foi calculada com base no ano médio (365 dias), obtido a partir do processamento de 3.653 observações diárias, no período de 2015 a 2024 (Tabela 23).

Tabela 23. Número de dias de acordo com as classes de perigo de incêndios florestais, calculado com base nos índices observados em 2020 e no ano simulado, correspondentes à média específica do INMET e às projeções para o ano médio do período de 2015 a 2024, para a transição Cerrado-Amazônia

Índices de Perigo	Nulo	Pequeno	Médio	Alto	Muito Alto
INMET					
FMA+	85	38	71	27	144
P-EVAP	109	11	62	29	154
Ano médio - Cenário SSP1-2.6					
FMA+	78	97	9	16	165
P-EVAP	122	12	23	29	179
Ano médio -Cenário SSP2-4.5					
FMA+	85	84	9	18	169
P-EVAP	145	13	13	27	167
Ano médio -Cenário SSP5-8.5					
FMA+	145	13	13	27	167
P-EVAP	89	66	17	33	160

No período analisado, verificou-se que os índices FMA+ P-EVAP apresentaram maior porcentagem de dias na classe muito alta (Tabela 24).

Os níveis de perigo alto e muito alto concentraram-se de abril a outubro, tanto nos dados observados quanto nos simulados. O índice P-EVAP, no entanto, apresentou uma janela de perigo ampliada, que incluiu o mês de novembro. Essa sazonalidade coincide com o período de estiagem característico da região, quando a redução da umidade potencializa o perigo de incêndios (Tabela 24).

Tabela 24. Porcentagem das classes de índice para os dados médios observados e simulados na transição Cerrado-Amazônia

Índices de perigo	Nulo	Pequeno	Médio	Alto	Muito Alto
INMET					
FMA+	23,3	10,4	19,4	7,4	39,4
P-EVAP	29,9	3,0	16,9	7,9	42,2
Ano- Médio Cenário SSP1-2.6					
FMA+	21,4	26,6	2,5	4,4	45,2
P-EVAP	33,4	3,3	6,3	7,9	49,0
Ano- Médio Cenário SSP2-4.5					
FMA+	23,3	23,0	2,4	4,9	46,3
P-EVAP	39,7	3,6	3,5	7,4	45,7
Ano- Médio Cenário SSP5-8.5					
FMA+	39,7	3,5	3,5	7,4	45,7
P-EVAP	24,3	18,0	4,6	9,0	43,8

Durante o período avaliado, em concordância com o ano médio obtido a partir dos dados observados nas estações meteorológicas do INMET, verificou-se o predomínio de dias com perigo de incêndio, com porcentagens anuais nas classes alta e muito alta.

A análise do índice FMA+, calculado a partir dos dados observados (INMET), revelou que as classes de perigo elevado (alto e muito alto) predominam de maio a outubro, período que concentrou 46,8% (171 dias do ano), de junho a novembro. Embora a classe muito alta tenha contabilizado 144 dias, verificou-se variabilidade espacial nos meses de junho e setembro, quando municípios de Rondônia (Cacoal, Vilhena), Mato Grosso (Vila Bela, Pontes e Lacerda, Comodoro) e a capital maranhense (São Luís) apresentaram redução nos índices de perigo, com o grau de perigo nos níveis pequeno e médio (Tabela 25). Em contrapartida, o índice P-EVAP apresentou 50,1% dos dias nessas categorias de classificação, totalizando 183 dias de maio a dezembro (Tabela 25).

No cenário SSP1-2.6, a partir de dados simulados nas projeções, o ano médio do índice FMA+ indicou 181 dias (49,5%) classificados como de perigo alto e muito alto, concentrados entre maio e outubro, enquanto 47,9% dos dias apresentaram grau de perigo nulo ou pequeno.

Para o índice P-EVAP, as projeções simuladas para o ano médio (2015-2024) no cenário SSP1-2.6 registraram grau de perigo alto em 29 dias, distribuídos em abril, maio e novembro, com destaque para maio, em que a frequência dessa classe foi de 54,8%. A classe de grau de perigo muito alto, de maio a novembro, totalizou 179 dias (49,0%) dos dias simulados no ano médio (Tabela 25).

O índice P-EVAP, obtido a partir dos dados observados (Figura 34), evidenciou que, de abril a dezembro, ocorreram 154 dias (42,1%) classificados na categoria de perigo muito alto, enquanto, de janeiro a abril, foram registrados 29 dias (7,9%) na classe de perigo alto. Para a

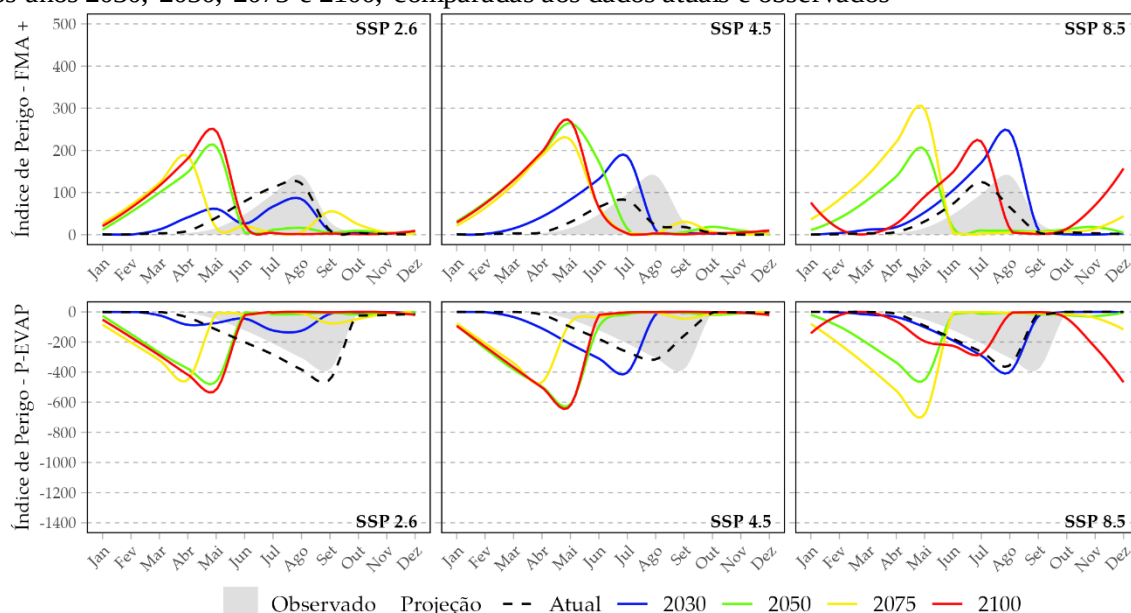
FMA +														
Alto					11					5			16	4,3
Médio				8	1								9	2,4
Muito Alto					19	30	31	31	30	24			165	45,2
Nulo	31	9									7	31	78	21,4
Pequeno		19	31	22						2	23		97	26,6
Total Geral	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	100
P-EVAP														
Alto				4	17						8		29	7,9
Médio				14							9		23	6,3
Muito Alto					14	30	31	31	30	31	12		179	49,0
Nulo	31	28	31								1	31	122	33,4
Pequeno				12									12	3,3
Total Geral	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	100
CENÁRIO SSP2-4.5														
FMA +														
Alto					14						4		18	4,9
Médio				4	3						2		9	2,4
Muito Alto					14	30	31	31	30	31	2		169	46,3
Nulo	31	17	16								1	20	85	23,3
Pequeno		11	15	26							21	11	84	23,0
Total Geral	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	100
P-EVAP														
Alto					19						8		27	7,4
Médio				10	2						1		13	3,5
Muito Alto					10	30	31	31	30	31	4		167	45,7
Nulo	31	28	31	7							17	31	145	39,7
Pequeno				13									13	3,5
Total Geral	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	100
CENÁRIO SSP5-8.5														
FMA +														
Alto					14					6	13		33	9,0
Médio				6	4						7		17	4,6
Muito Alto					13	30	31	31	30	25			160	43,8
Nulo	31	28	14									16	89	24,4
Pequeno			17	24							10	15	66	18,1
Total Geral	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	100
P-EVAP														
Alto					18						7	13	38	10,4
Médio				8	3							3	14	3,8
Muito Alto					10	30	31	31	30	31	23		186	50,9
Nulo	31	28	31	7								15	112	30,7
Pequeno				15									15	4,1
Total Geral	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	100

4.3.5. Desempenho dos índices FMA+ e P-EVAP na Transição Cerrado-Amazônia

No cenário SSP1-2.6, as médias anuais do índice FMA+ variaram de 27,9 a 88,03, com valor máximo diário de 469,3 na estação de Cuiabá. Os picos diários do índice ocorreram em diferentes momentos ao longo das projeções, nos meses de abril de 2075, maio de 2050 e 2100 e agosto de 2030. Nos anos de 2030, 2075 e 2100, o município de Santo Antônio do Leste apresentou a maior média (109,13), destacando-se também pelo maior valor máximo em 2030 (393,43). Nos anos de 2050 e 2100, os valores mais elevados do índice foram registrados na região de Cuiabá.

A dinâmica dos índices em Mato Grosso demonstrou que as mudanças climáticas tendem a alterar o calendário do fogo na região (Figura 27). Observou-se uma antecipação do pico de perigo de agosto/setembro, presente nos índices observados para maio/junho, nas projeções de longo prazo (2075–2100) (Figura 27). Esse padrão foi evidente tanto no índice FMA+ quanto no P-EVAP. Igualmente, no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), a importância do perigo projetado para 2100 superou, em geral, os registros históricos, sugerindo condições de inflamabilidade, inclusive com aumento do perigo no mês de dezembro.

Figura 27. Gráfico da variação mensal dos Índices de Perigo FMA+ e P-EVAP no estado de Mato Grosso, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados



A análise dos índices de perigo (Figura 28) revelou alterações no calendário do fogo no estado do Maranhão sob diferentes cenários de emissão. Ao analisar o comportamento dos dados, observa-se que o pico de severidade ocorre de agosto a setembro nas estações meteorológicas. No entanto, nas projeções futuras, indicou-se a interrupção desse padrão. Para

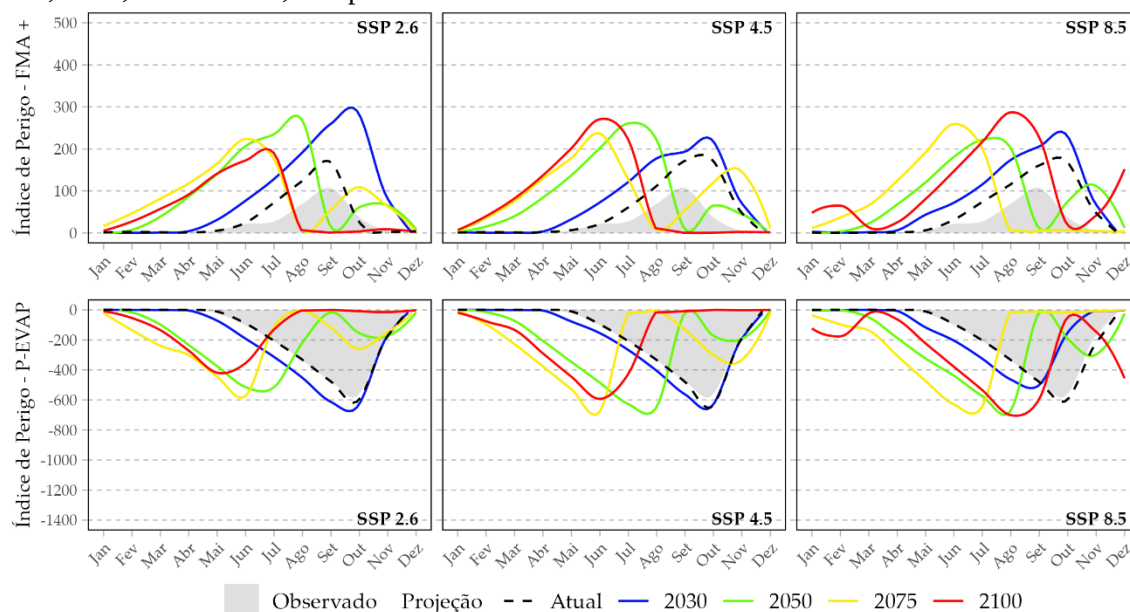
2030, observou-se uma tendência de transferência da estação de fogo, com o pico de perigo em outubro e níveis elevados até novembro, principalmente no índice FMA+, no cenário SSP2-4.5. Todavia, para os anos de 2075 e 2100, verificou-se uma condição inversa, com antecipação do período crítico de risco de incêndios.

No cenário 2.6 de baixas emissões, o índice FMA+ na projeção atual permanece dentro da faixa observada, com uma leve tendência de aumento no pico de perigo em relação aos observados. As projeções futuras (2030 a 2100) para o estado do Maranhão mostraram um aumento no índice de perigo, principalmente de março a julho, e uma antecipação do pico para junho em 2100 e para julho em 2050. O índice P-EVAP não apresenta grandes alterações em relação aos valores observados; no entanto, antecipa o perigo para o mês de abril em todos os anos do cenário (Figura 28).

No cenário SSP2-4.5, ocorreu um aumento do índice FMA+ e uma antecipação nos meses mais secos, com valores acima dos observados; no entanto, no período observado de perigo alto de incêndios, as projeções apresentam declínio, principalmente para os anos de 2050 e 2100. No índice P-EVAP, devido à redução da umidade, o perigo aumenta, antecipando-se ao período analisado, especialmente a partir de 2050, com declínio acentuado a partir de agosto, estendendo-se até dezembro, principalmente em 2100 (Figura 28).

No cenário de altas emissões (SSP5-8.5), em todos os anos das projeções para a FMA+, foram observados índices de perigo superiores aos valores atuais, com antecipação do período de perigo de incêndios, principalmente em 2075 e 2100, de maio a agosto. No entanto, o P-EVAP apresentou aumento em quase todos os meses, antecipando o período de perigo de maio a setembro, com valores extremos no segundo semestre, que, nos dados observados, se caracterizam de julho a novembro (Figura 28).

Figura 28. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP no estado do Maranhão, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados.



No estado do Pará, no cenário SSP1-2.6 (Figura 29), o índice FMA+ apresentou valores elevados nas projeções atuais, superando o máximo histórico observado. Enquanto nas projeções atuais e futuras o índice FMA+ indicou um aumento do índice de perigo de junho a setembro, em todos os anos do cenário, houve antecipação da estação de fogo. Os valores para o ano de 2030 sugerem um pico elevado em agosto, e as projeções para o ano de 2100 indicam que o momento de maior severidade ocorrerá de abril a junho.

No índice P-EVAP, no cenário SSP1-2.6, constatarem-se pequenas variações nas projeções atuais, que se mantiveram próximas ao padrão observado. Contudo, nas projeções futuras, o índice indicou uma antecipação do período crítico de perigo de incêndios, em contraste com o padrão observado, cujos picos ocorrem em agosto e setembro; os anos de 2050 e 2100 apresentam picos entre abril e junho no estado do Pará (Figura 29).

A Figura 29 mostra os resultados dos índices obtidos no cenário SSP2-4.5 para a FMA+ a partir dos dados observados e dos simulados por meio da projeção atual. O gráfico demonstra que os valores da FMA+ permaneceram próximos ao intervalo observado, sugerindo baixa intensificação do perigo, com o pico concentrado nos meses de agosto e setembro. No entanto, os padrões variaram conforme o cenário de emissões. Observou-se uma tendência de antecipação do perigo de incêndio, que se confirma e se intensifica a partir de janeiro, com aumento do período, especialmente nos meses mais secos, com valores acima dos observados, especialmente nos anos de 2075 e 2100, com um pico de perigo que se desloca para abril e maio. Em 2050 e 2075, os picos também ocorrem em outubro e mantêm-se em níveis elevados

até novembro. Enquanto no período de julho a dezembro de 2100, o índice apresenta valores inferiores aos observados (Figura 29).

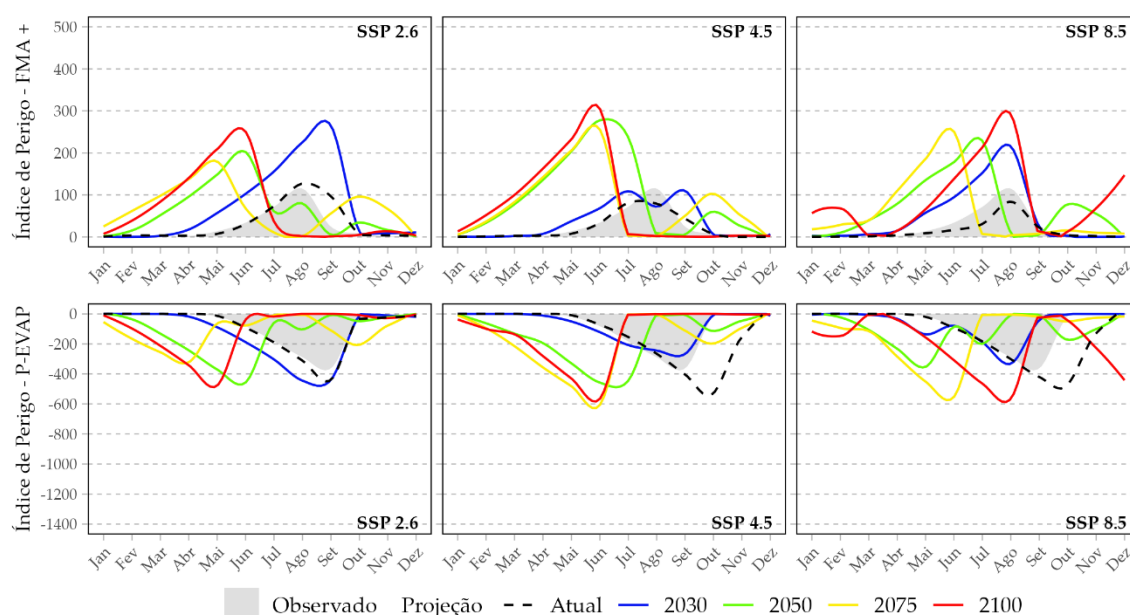
No cenário SSP2-4.5, o índice P-EVAP indicou uma condição de perigo acentuada, atingindo valores de -600, que se iniciou imediatamente após o fim da estação chuvosa. Neste cenário intermediário (SSP-4.5), destaca-se a redução da umidade ao longo das décadas, com aumento do perigo a partir de 2050 e intensificação nos anos de 2075 e 2100, com antecipação dos picos para os meses de abril e maio (Figura 29).

No cenário SSP5-8.5, a FMA+ apresentou valores extremos de perigo em 2075, de março a junho, e em 2100, de maio a agosto. Atingindo picos que triplicam a média histórica observada. No ano de 2100, projeta-se um pico de severidade em agosto, que supera todas as referências históricas, seguido de um aumento do perigo em dezembro (Figura 29).

No cenário SSP5-8.5, o índice P-EVAP no estado do Pará apresentou um aumento acentuado em quase todos os meses, com valores inferiores a -600 (Figura 29). Esse comportamento reflete uma severa deficiência hídrica e um elevado perigo de incêndios no estado do Pará. As projeções indicam uma antecipação dos picos em relação ao período observado; em 2050, o pico ocorre em maio; em 2075, concentra-se em junho; e, em 2100, desloca-se para agosto. Contudo, em 2030, os valores permanecem próximos ao padrão observado (Figura 29).

Este cenário, além da intensidade, evidenciou uma variação mensal do perigo. Enquanto nos dados observados e no padrão atual, o perigo de incêndios concentrou-se no segundo semestre, as projeções indicaram a manutenção do índice de perigo também nos meses de transição chuvosa (novembro e dezembro).

Figura 29. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP para o estado do Pará, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1- 2.6, SSP2- 4.5 e SSP5- 8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados



A Figura 30 apresenta a variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP no estado do Piauí. No cenário considerado otimista (SSP1-2.6), observou-se a manutenção parcial do padrão de sazonalidade atual no FMA+, com o pico de perigo concentrado de setembro a outubro tanto nos dados observados quanto na projeção atual. No entanto, notou-se uma antecipação do período crítico para os próximos anos. As projeções para 2075 e 2100 indicaram que o início do aumento do grau de perigo, que historicamente ocorria em julho, tende a se adiantar para maio ou junho, atingindo proporções superiores às observadas.

No cenário SSP1-2.6, o índice P-EVAP projeta um aumento do déficit hídrico, pois, nos anos de 2075 e 2100, atingem-se valores mínimos inferiores (mais negativos) aos observados na série histórica. O período de deficiência hídrica acentuada, que atualmente se concentra de julho a outubro, demonstrou tendência de se intensificar e de se antecipar ao período de abril a agosto (Figura 30).

O cenário intermediário (SSP2-4.5) revelou, para o índice FMA+, uma mudança no período de fogo. Diferentemente do histórico observado, em que o perigo declina após o mês de outubro, as projeções, especialmente em 2075, sugerem a prolongação da estação de perigo até o final do ano. A curva de 2075, por exemplo, manteve índices elevados até dezembro, indicando um possível atraso no início da estação chuvosa ou chuvas insuficientes para mitigar o risco de incêndio (Figura 30).

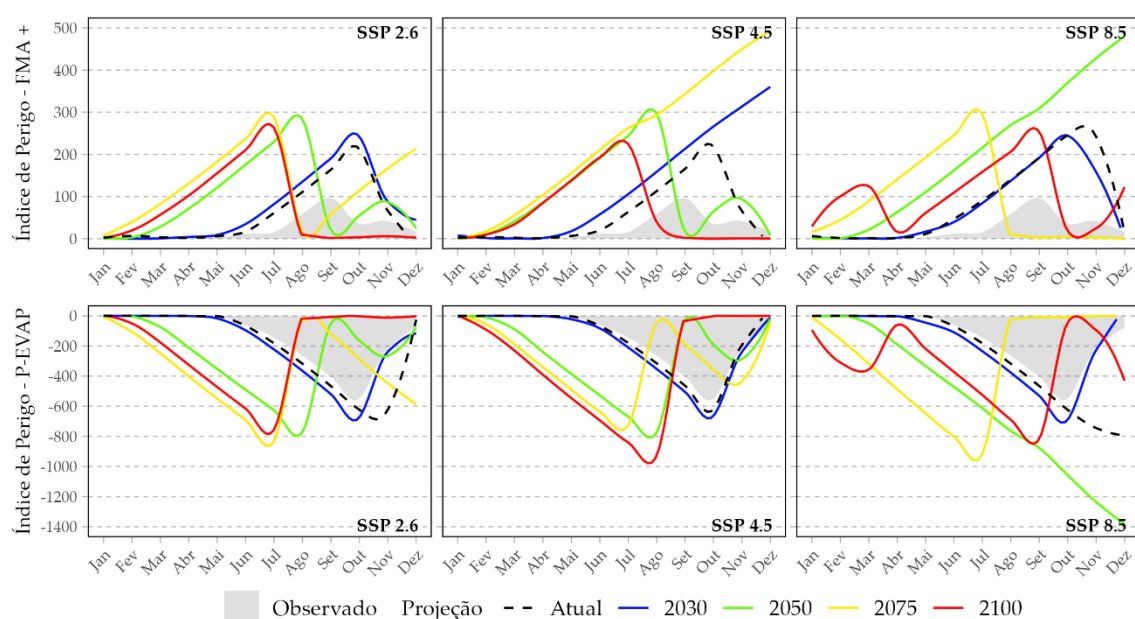
No cenário SSP2-4.5, observou-se uma ampliação do período de perigo de incêndios, com maior intensidade de setembro a novembro no índice P-EVAP. As projeções indicaram

que, com a redução das chuvas, o período de perigo alto poderá se iniciar precocemente, em abril e maio, estendendo-se com intensidade até dezembro. A projeção para 2100 destacou-se por apresentar uma queda intensa e prolongada, sugerindo secas mais intensas e duradouras do que as atualmente registradas (Figura 30).

As alterações mais drásticas na FMA+ ocorrem no cenário pessimista (SSP5-8.5), para o ano de 2050, quando o índice apresenta comportamento exponencial no segundo semestre, sem o declínio característico ao final do ano. Para o ano de 2100, observou-se um ajuste sazonal no perigo de incêndio: picos distintos ocorreram no primeiro trimestre (fevereiro e março) e no final do ano, sugerindo que o estado do Piauí poderá enfrentar condições favoráveis ao fogo em meses tradicionalmente úmidos (Figura 30).

O índice P-EVAP, no cenário SSP5-8.5 para o ano de 2050, demonstrou que o índice de perigo nos anos futuros inicia-se meses antes do período observado e atual, com pico em maio de 2075; em 2075, o pico ocorre em setembro, com grandes oscilações ao longo de todos os anos do cenário, indicando escassez severa de água durante o segundo semestre. A projeção para 2100 indicou um comportamento instável, com múltiplos períodos de déficit intenso ao longo do ano (Figura 30).

Figura 30. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP para o estado do Piauí, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1- 2.6, SSP2- 4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados



A Figura 31 demonstra o comportamento do FMA+ em Rondônia e evidencia um padrão de deslocamento sazonal distinto. Enquanto os dados observados e atuais indicaram um pico de perigo concentrado no período tradicional de estiagem (de julho a setembro), as projeções

futuras sugerem a antecipação deste perigo para o primeiro semestre. No cenário SSP1-2.6, ao analisar o índice FMA+, verificou-se uma ruptura notável em relação à sazonalidade tradicional. Para os anos de 2050, 2075 e 2100, o pico de incêndios desloca-se de agosto para março a maio. A projeção para o ano de 2100 agrava essa tendência, apresentando o maior pico de intensidade neste cenário, concentrado em maio, período tradicionalmente caracterizado por menor perigo de incêndio (Figura 31).

Ao analisar o cenário SSP2-4.5 apresentado na Figura 31, observa-se um comportamento heterogêneo do P-EVAP ao longo dos anos projetados. Em 2030, o índice mantém-se mais próximo do padrão atual, com pico em julho, embora de menor magnitude. Contudo, as projeções de longo prazo (2050, 2075 e 2100) confirmaram a tendência de antecipação da estação de perigo para o período de fevereiro a abril. A intensidade do pico em 2100 neste cenário é menor do que em 2050, sugerindo uma variabilidade mais complexa nas condições de precipitação projetadas para este cenário intermediário (Figura 31).

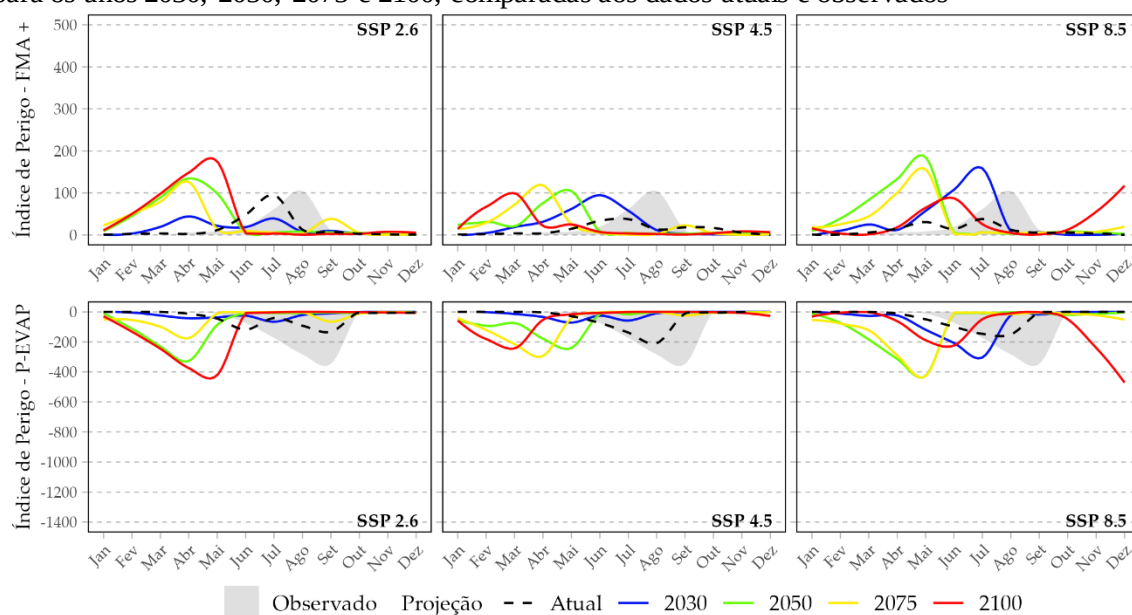
O índice P-EVAP, representado no gráfico da Figura 30, corrobora a associação entre estresse hídrico e picos de FMA+, evidenciando que a antecipação do perigo de fogo é impulsionada por déficits hídricos precoces. No cenário SSP1-2.6, o balanço hídrico tornou-se negativo mais cedo no ano, especialmente em comparação com o histórico observado, no qual o déficit se acentua em agosto. As projeções futuras, especialmente para 2100, mostraram um pico concentrado em maio e, no segundo semestre do ano, as projeções foram inferiores às observadas (Figura 31).

No cenário SSP2-4.5, o índice FMA+ apresentou antecipação do período crítico nas projeções futuras, com picos iniciando em fevereiro e estendendo-se até julho. Esse comportamento diverge dos dados observados e das projeções atuais, nos quais o pico ocorre entre julho e agosto. O índice P-EVAP no cenário SSP2-4.5: a tendência de deslocamento sazonal se mantém, com ocorrência predominantemente de março a maio, entre 2050 e 2100 (Figura 31).

O cenário SSP5-8.5 apresentou discrepâncias anuais no índice FMA+ e registrou o valor mais elevado entre todos os cenários. Enquanto em 2030 ainda se reflete a sazonalidade típica, com pico em julho, os anos de 2050 e 2075 apresentaram picos intensos antecipados para abril/maio. Os valores projetados para 2100 apresentaram um comportamento atípico e preocupante: no início do ano, observou-se uma leve variação; no final do ano (dezembro), uma tendência de crescimento do perigo, indicando uma possível inversão ou extensão do período seco para meses que deveriam marcar o auge da estação chuvosa (Figura 31).

O P-EVAP, no cenário SSP5-8.5, também refletiu o comportamento observado no FMA+. Com período antecipado de perigo de incêndio entre 2050 e 2075 e déficit acentuado em maio. Todavia, para 2100, a curva sofre uma queda drástica no final do ano (Figura 31).

Figura 31. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP para o estado do Rondônia, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1- 2.6, SSP2- 4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados



Os gráficos da Figura 32 para o estado do Tocantins, no cenário SSP1-2.6, demonstraram que as projeções da FMA+ apresentaram um padrão de antecipação severa da sazonalidade. Diferentemente do observado e da projeção atual, em que o pico de perigo ocorre no final da estação seca, em agosto e setembro, as projeções indicaram que o período crítico se deslocará para o meio do ano, em maio, junho e julho. As projeções para 2030 e 2100 deslocam os picos de perigo para agosto e julho, respectivamente. A severidade do índice agrava-se nas projeções para 2075 e 2100, que já iniciam o ano em ascensão e se estendem até agosto. Após esse período, o índice entra em declínio, atingindo níveis inferiores aos observados no ano médio, embora o pico projetado supere o histórico (Figura 32).

No cenário SSP1-2.6, o índice P-EVAP apresentou uma antecipação do período crítico, que tradicionalmente ocorre nos meses de agosto e setembro, passando a ser uma ameaça já desde abril e se estendendo até junho nas projeções futuras. Os picos nas projeções para anos de 2030, 2050 e 2100 foram superiores aos observados.

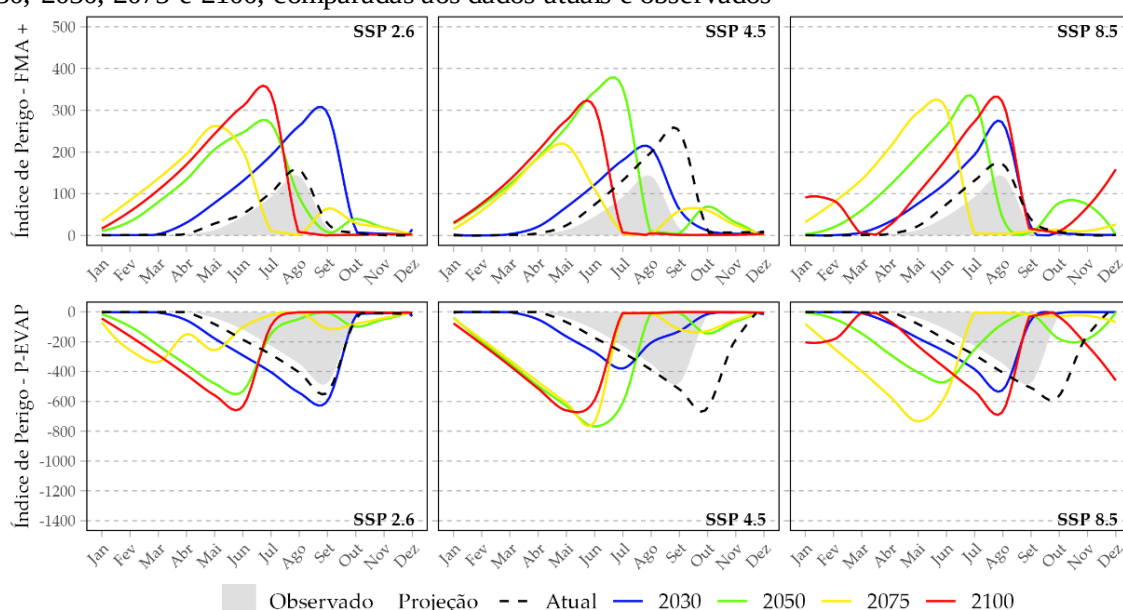
O índice FMA+ no cenário SSP2-4.5 mostrou que o ano de 2050 apresenta o maior índice de perigo entre todas as projeções deste cenário, com picos em junho e julho. Isso representa não apenas um aumento do grau de intensidade do perigo, mas também uma

antecipação de quase três meses no pico da temporada de incêndios, em comparação com o padrão atual, que ocorre no mês de setembro (Figura 32). Enquanto o P-EVAP ocorre a antecipação do período crítico, com picos de abril a junho nos anos de 2050 a 2100 e inferiores aos observados para os meses de agosto a dezembro (Figura 32).

A análise da Figura 32, referente ao índice FMA+ do cenário SSP5 8.5, revelou um início de perigo de fogo extremamente precoce para o estado do Tocantins na projeção de 2075. O índice apresenta elevação já em janeiro, atingindo o ápice entre maio e junho, com magnitudes superiores às observadas e às simulações atuais. Além disso, o ano de 2100 sugere um comportamento com dois picos ou um perigo estendido; após o pico na estação seca, o índice retoma a ascensão em dezembro, indicando que a precipitação de final de ano poderá ser insuficiente para suprimir o risco de ignição (Figura 32).

O cenário SSP5-8.5 para o P-EVAP prevê que o estado deixará de ter um período seco bem definido no final do terceiro trimestre, passando a enfrentar janelas de perigo de incêndio muito mais amplas e precoces. Os meses de maio e junho sinalizam que o período de maior risco de incêndio pode se antecipar em até quatro meses em relação ao histórico atual. Nos anos de 2075 e 2100, apresentou picos máximos entre março e junho. Após esse intervalo, observa-se um declínio e projeções inferiores às históricas em agosto e setembro, seguidos de uma nova elevação de outubro a dezembro, nos anos de 2030 e 2100 (Figura 32).

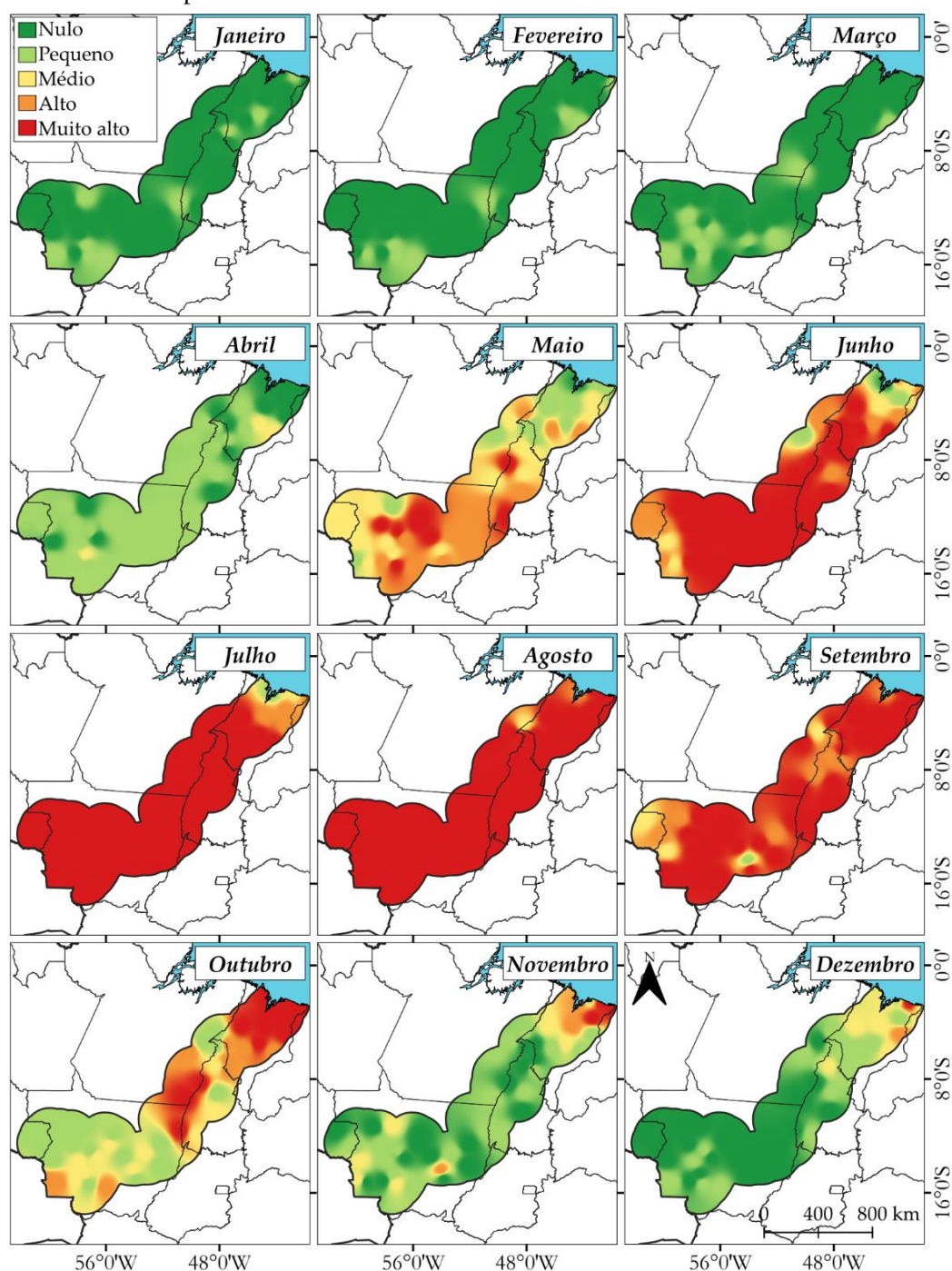
Figura 32. Gráfico da variação mensal dos índices de perigo FMA+ e P-EVAP no estado do Tocantins, sob diferentes cenários climáticos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com projeções para os anos 2030, 2050, 2075 e 2100, comparadas aos dados atuais e observados



A Figura 33 apresenta a distribuição das classes de perigo de incêndio ao longo da transição Cerrado-Amazônia. No índice FMA+ para os dados observados, destacaram-se as classes de perigo nulo a médio, nos meses de janeiro a abril, com concentração na classe média em abril. No entanto, de maio a setembro evidencia-se o período mais crítico, com predominância muito alta na classe alta e muito alta, especialmente em julho e agosto, em toda a área de estudo.

No mês de outubro, a porção central da região, abrangendo áreas dos estados do Pará, Mato Grosso e Tocantins, além de Piauí e Maranhão, permaneceu enquadrada nas classes de perigo alto e muito alto, evidenciando a persistência do perigo de incêndios mesmo após o período crítico da estiagem. Nos meses de novembro e dezembro, observou-se que, nas demais regiões, o perigo se reduz, variando de nulo a médio (Figura 33).

Figura 33. Mapa do índice de perigo de incêndio FMA+ com base nos dados observados (INMET) do ano médio referente ao período de 2015 a 2024

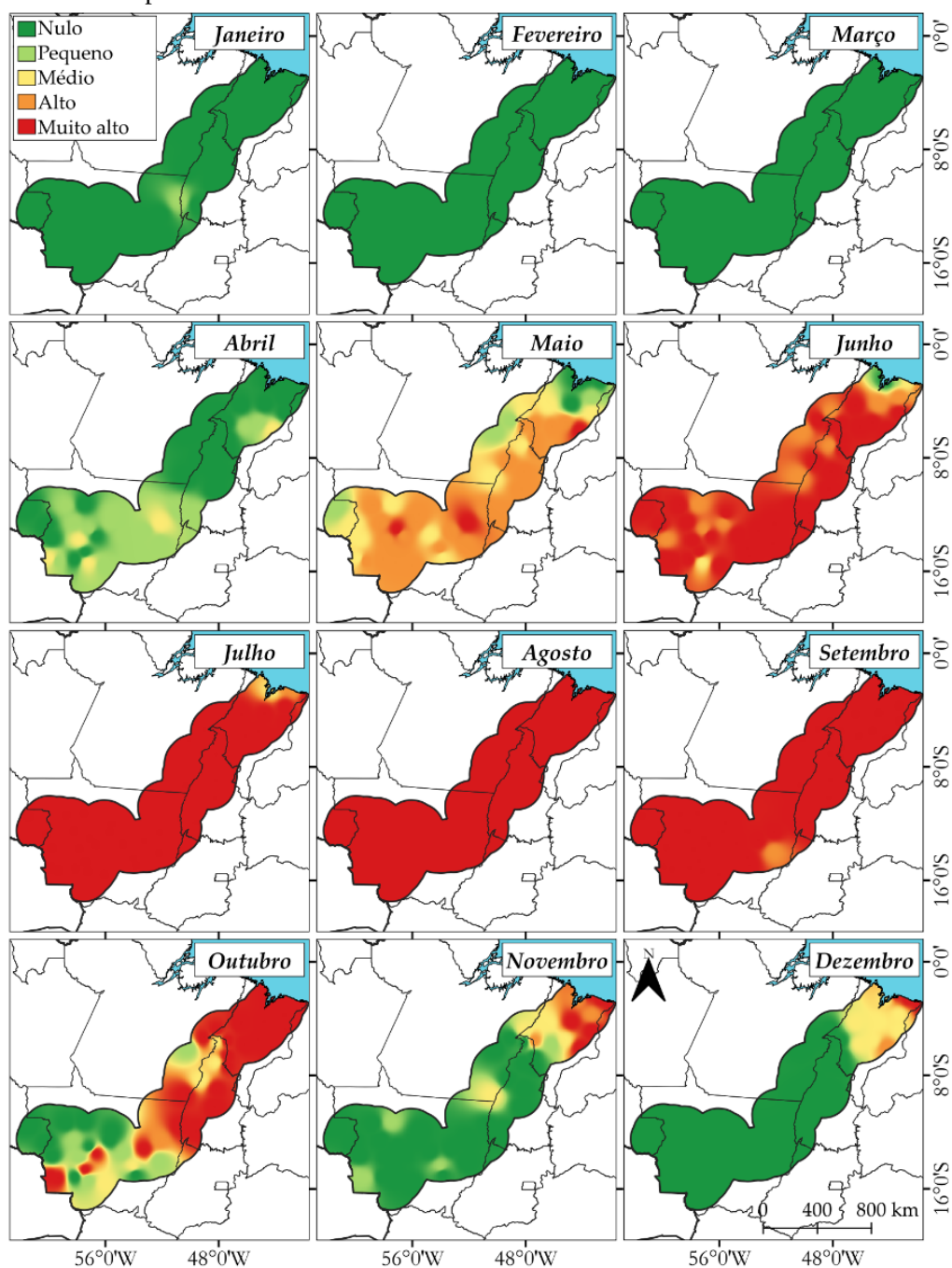


A distribuição das classes de perigo observadas no índice P-EVAP, representada na Figura 34, mostra que, de janeiro a março, toda a faixa de transição apresentou perigo nulo ou baixo. A partir de abril, já se observa perigo médio nos estados de Mato Grosso e Piauí. De maio a setembro, a região passa a ser dominada pelas classes de perigo alto e muito alto, com exceção dos estados do Maranhão e do Piauí, que, em maio, ainda registram condições de perigo nulo ou pequeno.

Os meses mais críticos para este índice ocorreram de julho a setembro, período marcado pela estiagem, quando o perigo de incêndios aumenta. Em outubro, o estado de Rondônia e a área central de Mato Grosso retornam às classes de perigo nulo e pequeno, condição que se estende aos demais estados nos meses de novembro e dezembro. No entanto, os estados do Maranhão e do Piauí mantiveram, até dezembro, níveis de perigo variando de médio a muito alto, evidenciando a persistência do perigo mesmo após o término da estação seca (Figura 34).

O índice P-EVAP, obtido a partir dos dados observados, evidenciou que, de abril a dezembro, ocorreram 154 dias (42,1%) classificados na categoria de perigo muito alto, enquanto, de janeiro a abril, foram registrados 29 dias (7,9%) na classe de perigo alto (Figura 34). Para a classe de perigo nulo, foram 109 dias, o que corresponde a 29,8% do ano médio simulado, sem perigo de incêndio.

Figura 34. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP, com base nos dados observados (INMET), para o ano médio do período de 2015 a 2024



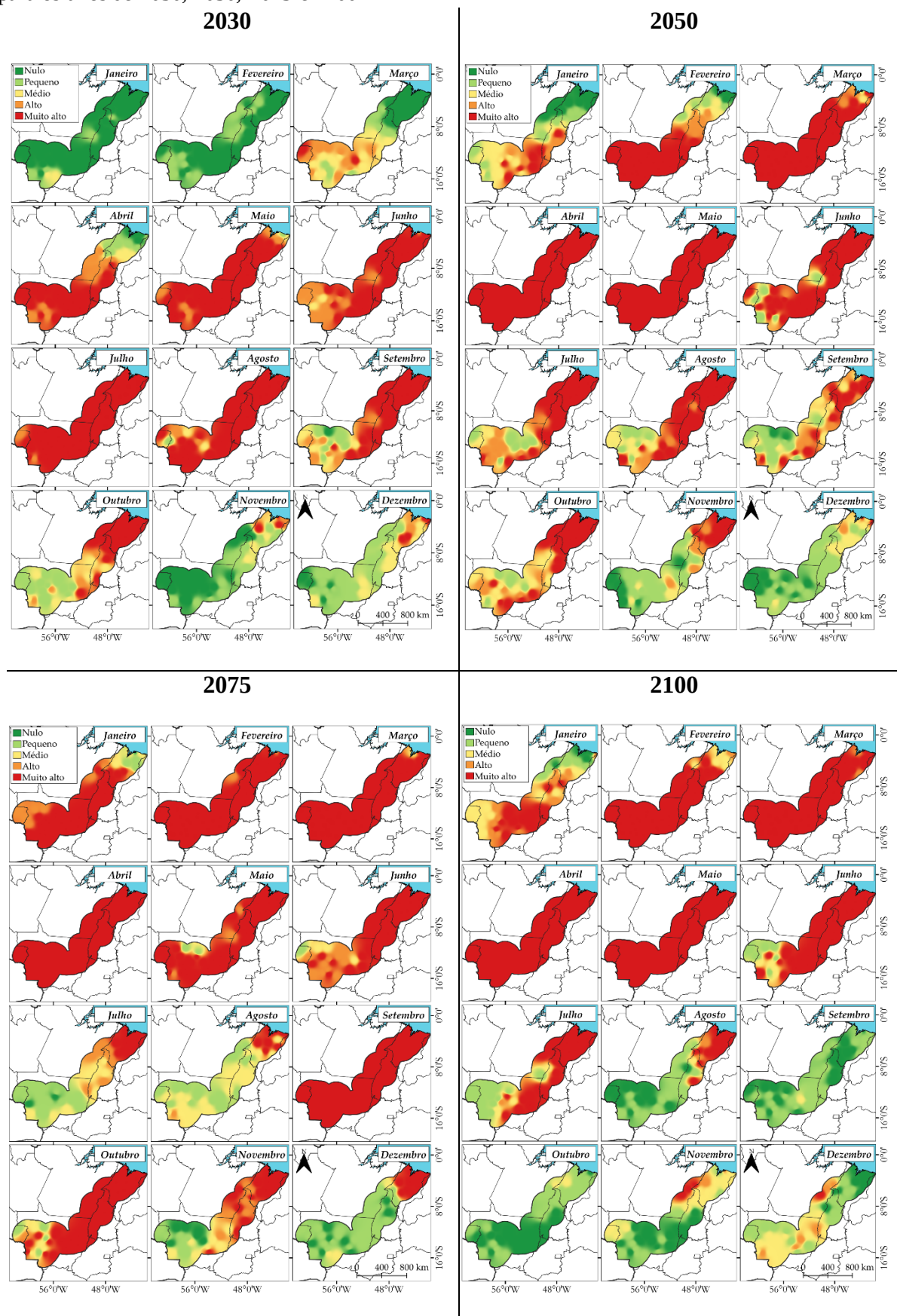
No contexto das projeções futuras para o cenário SSP1-2.6 (Figura 35), as médias do índice FMA+ indicaram predominância da classe de perigo muito alto, representando 66,7% dos dias ao longo de todos os anos simulados. Em cada ano analisado, essa categoria apresentou valores superiores a 50% dos dias. Em 2050, foram registrados 264 dias (77,3%) nessa classe, enquanto em 2075, o número aumentou para 308 dias, o que corresponde a 89,4% do total anual.

O índice FMA+ no cenário SSP1-2.6 de projeções futuras, mostra que, em 2030, nos meses de janeiro e fevereiro, predominou o perigo de incêndio nulo ou pequeno (Figura 35). Entretanto, já no início de março, observou-se um alto nível de perigo nos estados do Maranhão, Pará, Rondônia, Mato Grosso e Tocantins. De abril a setembro, o grau de perigo se intensificou, atingindo a categoria muito alta, com destaque para as regiões de São Luís (MA) e Parnaíba (PI), que permaneceram nessa condição durante todo o período. A partir de setembro, o estado de Mato Grosso apresentou redução do perigo, retornando às classes nulo ou pequeno. Contudo, nos estados do Maranhão e do Piauí, o perigo permaneceu elevado até o final de dezembro (Figura 35).

Em 2050, a FMA+ nos estados de Mato Grosso e Tocantins já entrará em período de perigo nas classes alta e muito alta. De março a junho, essa condição se estende por toda a faixa de transição, mantendo-se predominante. No terceiro trimestre do ano, observou-se uma redução do perigo nos estados de Rondônia e Mato Grosso, com ocorrência de perigo nulo na porção norte do Mato Grosso. Contudo, nos estados do Maranhão e do Piauí, os graus de perigo alto e muito alto iniciam-se em março e se prolongam até novembro (Figura 35).

No ano de 2075, no cenário SSP1-2.6, predomina a classe de grau de perigo alto e muito alto de janeiro a junho. Nos estados de Rondônia e Mato Grosso, observa-se uma redução temporária do perigo nas categorias de pequeno e médio porte em junho e julho. Entretanto, a partir de setembro e outubro, o grau de perigo volta a se intensificar em toda a região, retornando às classes mais críticas. Nos estados do Maranhão e do Piauí, o perigo elevado se inicia em fevereiro e se mantém até dezembro. No ano de 2100, o período de perigo, classificado como alto e muito alto, se estende de janeiro a julho em toda a região. Nos estados do Maranhão, Tocantins e Piauí, essa condição crítica se prolonga até agosto (Figura 35).

Figura 35. Mapas do índice de perigo de incêndio FMA+ para os cenários SSP1-2.6 de projeção futura para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100



As projeções futuras para o cenário SSP2-4.5 (Figura 36) indicaram que os valores médios do índice FMA+ nas classes de perigo alto e muito alto totalizaram 1347 dias, o que correspondeu a 92% do período analisado, evidenciando a predominância da condição mais crítica ao longo dos anos. Em 2030, a classe de perigo muito alto foi registrada em 32,2% dos dias de março e em 36,7% dos dias de abril, enquanto os meses de janeiro a março apresentaram cerca de 60% dos dias nas categorias de perigo nulo ou pequeno. No ano de 2050, a classe de perigo muito alto predominou em grande parte da região de estudo, com exceção dos meses de janeiro e fevereiro (90,3% dos dias) e de outubro (70% dos dias). Na classe de perigo alto, destacaram-se os meses de janeiro (9,6%) e setembro (30% dos dias).

Para o ano de 2030, a classe de perigo muito alto foi em março, com 32,2% dos dias, e em abril, com 36,7%. Enquanto os meses de janeiro a março representaram 60% dos dias com grau de perigo nulo ou pequeno. Em 2050, a classe de perigo muito alto predominou na região de estudo, exceto nos meses de janeiro e fevereiro (90,3%) e de outubro (70%); na classe alta, janeiro apresentou 9,6% e setembro, 30% na classe alta e muito alta; e, nos anos de 2075 e 2100, predominou a classe de perigo muito alto. Nos anos de 2075 e 2100, observou-se a predominância absoluta das classes de perigo alto e muito alto, de janeiro a outubro, consolidando um cenário de perigo crítico e persistente em toda a região (Figura 36).

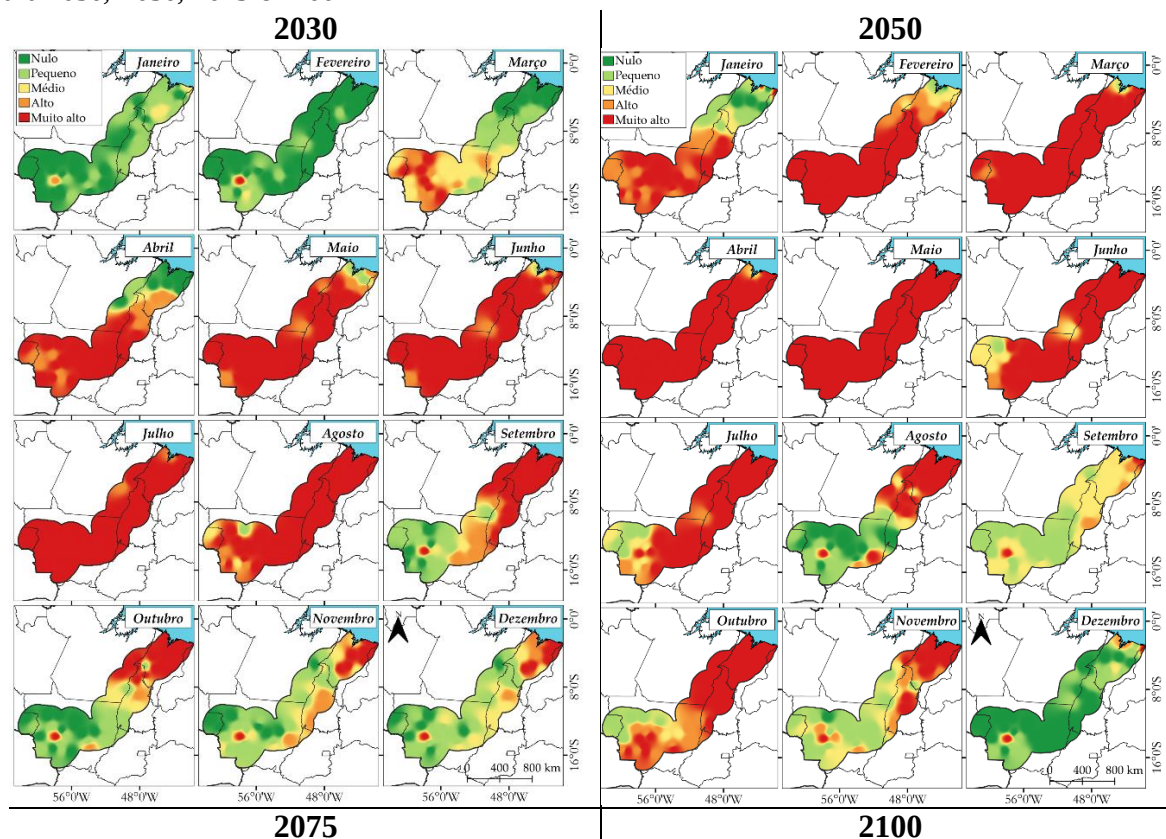
Evidencia-se que, em 2030 (Figura 36), nos meses de janeiro e fevereiro, surgem áreas com risco de incêndio, classificadas como alto e muito alto, nas regiões de Campo Novo do Parecis (MT), Tangará da Serra (MT) e Grajaú (MA). A partir de março, o perigo se intensifica, abrangendo praticamente todo o estado de Mato Grosso e de Rondônia, com exceção das áreas próximas ao litoral, como São Luís (MA), que permanecem na classe de perigo nulo. Somente em maio, os graus de perigo alto e muito alto atingem essas regiões litorâneas, mantendo-se nessa condição até dezembro. De setembro a dezembro, observou-se uma redução do perigo nos estados de Mato Grosso e Rondônia, onde passaram a predominar classes de perigo nulo a médio, indicando uma diminuição sazonal da intensidade dos incêndios.

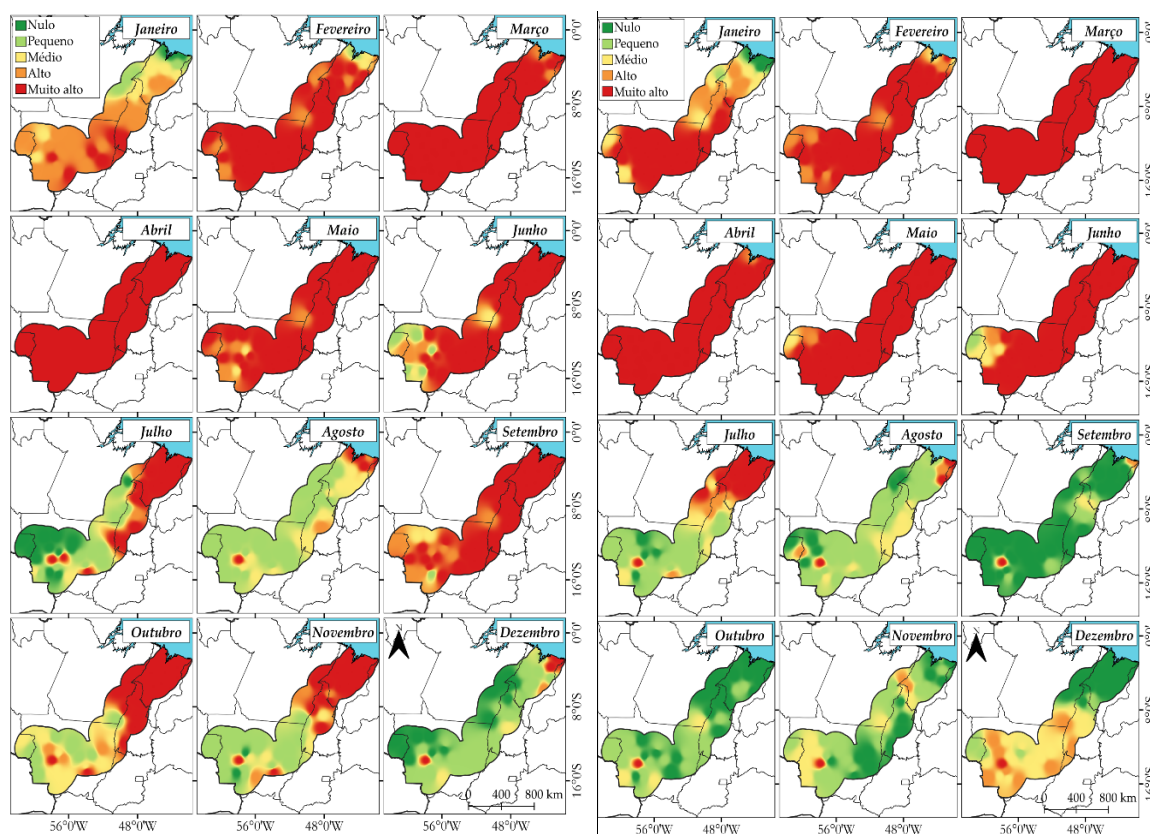
Nos anos de 2050, 2075 e 2100, observou-se que os graus de perigo alto e muito alto se iniciam em janeiro e se prolongam até setembro em toda a região. Em 2050, a condição mais crítica é registrada de fevereiro a julho, período em que o perigo permanece elevado. Em 2075, as classes de perigo alto e muito alto continuam elevadas, permanecendo nessa condição até julho em todos os estados (Figura 36).

Contudo, há uma breve redução em julho nos estados do Pará, Maranhão e Piauí, seguida de uma retomada em agosto, quando toda a faixa de transição volta a se enquadrar nas classes de alto e muito alto. Nos meses de novembro e dezembro, há um intervalo em que

predomina a classe de nulo a médio, exceto nos estados de Mato Grosso e Tocantins, onde o grau de perigo retorna às categorias de médio e alto, evidenciando a persistência regional do perigo. Em 2100, a persistência do perigo elevado se prolonga até setembro, consolidando um cenário de perigo prolongado e abrangente (Figura 36).

Figura 36. Mapas do índice de perigo de incêndio FMA+ para os cenários SSP2-4.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100





As projeções do índice FMA+ para o cenário SSP5-8.5 indicaram predominância absoluta das classes de perigo alto e muito alto, sempre superiores a 60% dos dias do ano. O ano de 2030 registrou a menor frequência nesse período, com 229 dias nessas classes, o que corresponde a 62,7% do total anual (Figura 37).

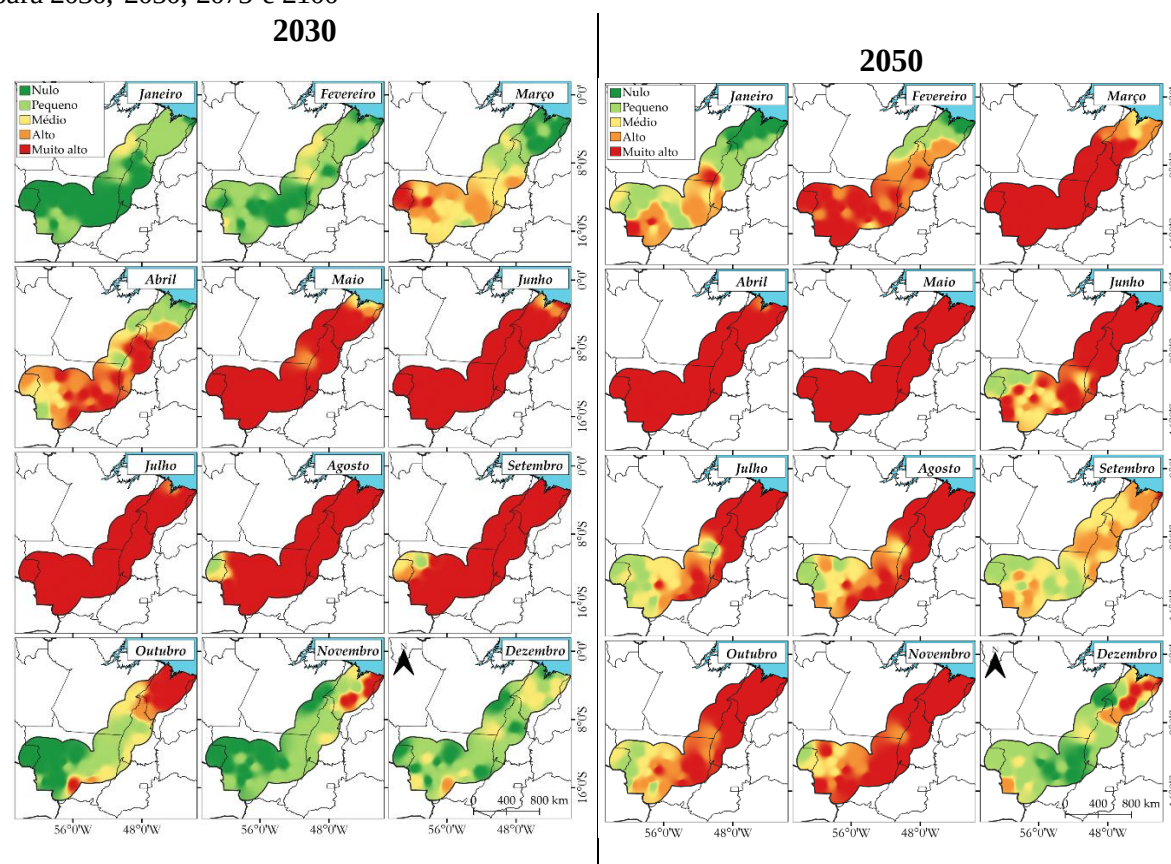
As projeções indicaram uma intensificação gradual do perigo de incêndio, com percentual que variou de 62,7% (mínimo em 2030) a 94,2% (máximo em 2100). Em 2050, a frequência dos dias críticos alcançou 83,8%; em 2075, 67,7%; e, em 2100, atingiu o valor máximo de 94,2%, considerando a frequência de dias nas classes de perigo de incêndio alto e muito alto. Enquanto em 2050 essas condições críticas se restringiram ao período de abril a novembro, nos anos de 2075 e 2100 o perigo elevado torna-se constante, abrangendo todo o ciclo anual, de janeiro a dezembro (Figura 37).

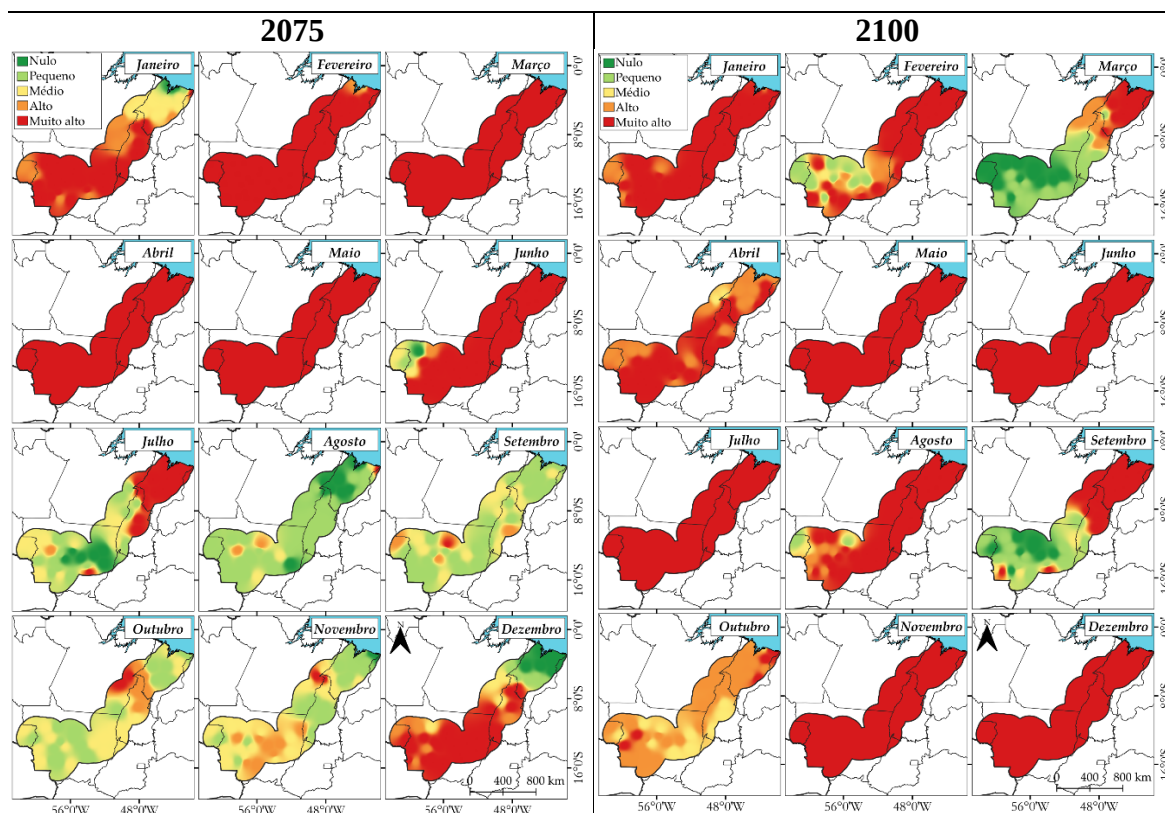
Conforme demonstrado na Figura 37, o índice FMA+ no cenário SSP5-8.5 caracterizou-se, em 2030, por uma ampla distribuição de classes de perigo alto e muito alto nos estados de Rondônia, Mato Grosso, Tocantins e Pará. A dinâmica temporal apontou o período de abril a setembro como o de maior criticidade, no qual a intensificação do perigo de incêndio abrangeu a totalidade da zona de transição estudada.

Em 2050, o período crítico antecipou-se para fevereiro, e estendeu-se até novembro, com severidade generalizada de março a maio. Neste ano, Rondônia apresentou risco elevado

até maio, em contraste com Tocantins, Pará e Mato Grosso, que mantiveram a criticidade até novembro. Em 2075, o intervalo crítico vai de janeiro a junho, estendendo-se até julho no Tocantins, no Piauí e no Maranhão. De agosto a novembro, o perigo recua para níveis médios e baixos, exceto no Pará, que apresenta essa condição apenas em agosto. A partir de novembro, Rondônia, MT e TO voltam a apresentar risco elevado. Por fim, em 2100, o grau de perigo nas classes altas e muito altas predomina em toda a área de estudo ao longo do ano, exceto nos estados de Mato Grosso e Rondônia, que apresentam redução do perigo de incêndio nas classes nulas a médias, especificamente nos meses de março e setembro (Figura 37).

Figura 37. Mapa do índice de perigo de incêndio FMA+ para os cenários SSP5-8.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100





O comportamento do índice P-EVAP no cenário SSP1-2.6 apresentou médias elevadas de perigo de incêndio em todos os anos analisados. Principalmente para a classe de perigo muito alto, manteve-se acima de 90% dos dias anuais ao longo de todo o período projetado. Para 2075, o cenário prevê uma condição crítica ainda mais acentuada, com 99,7% dos dias classificados na categoria de perigo muito alto (Figura 38).

Observou-se que, no cenário SSP1-2.6, o P-EVAP indicou que a evolução do perigo de nulo e pequeno (verde) no primeiro trimestre passa a ser de grau muito alto a partir de abril. O período de maio a agosto representa o pico de severidade em toda a região. Notou-se, nos meses de setembro e outubro de 2030, a persistência do perigo elevado na porção nordeste da área de estudo, em contraste com a redução do perigo na porção sudoeste (Figura 38).

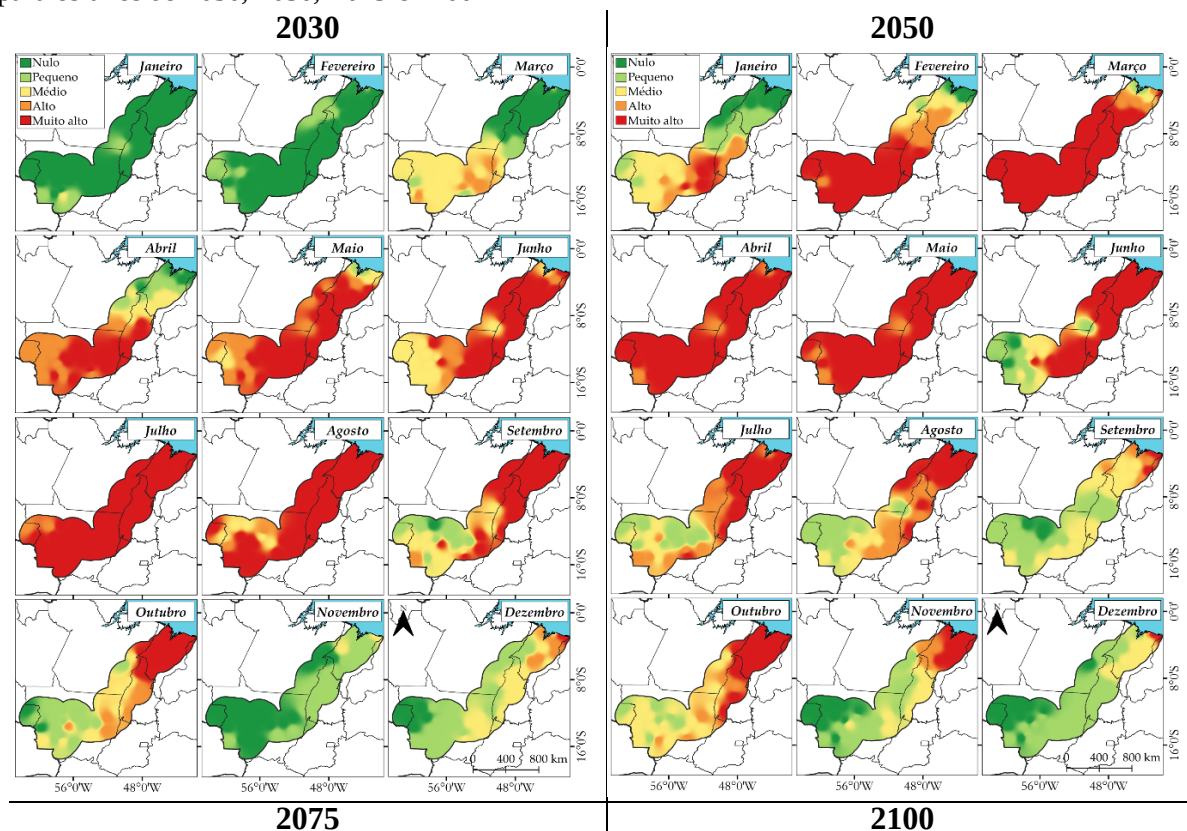
A Figura 38 apresenta a espacialização do índice P-EVAP projetada para o ano 2030 no cenário SSP1-2.6, e evidencia diferenças sazonais na distribuição do perigo de incêndio. Nos meses de janeiro e fevereiro, há perigo pequeno ou nulo (em verde) em quase toda a área de estudo. A partir de março, surgem áreas de perigo médio e alto (em vermelho) na porção central e no nordeste da região (MT e MA). Contudo, é a partir de abril que ocorre um aumento do grau de perigo, com classe muito alta, que domina a porção sudoeste de Vilhena (RO), com expansão latitudinal. O período de maio a agosto representa o pico de severidade em toda a

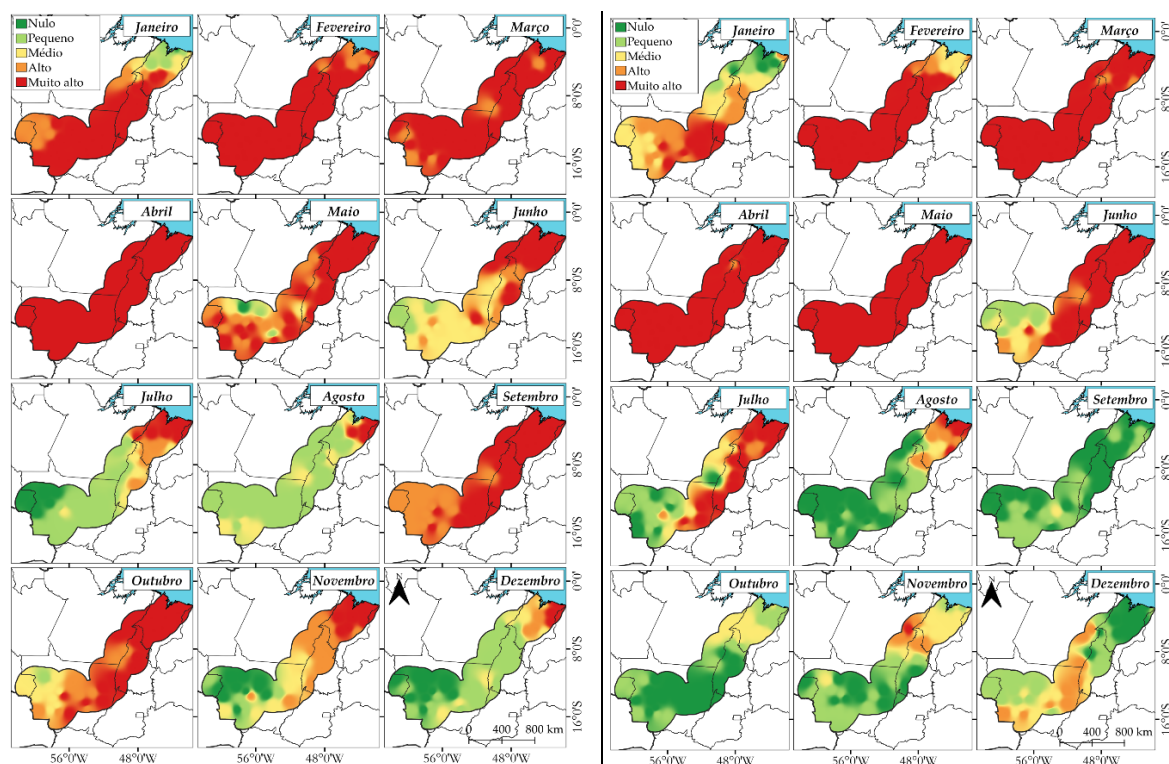
região, quando a classe de perigo muito alta abrange toda a área, indicando condições extremas para a propagação de incêndios.

A evolução temporal do índice P-EVAP revelou dinâmicas distintas entre os cenários futuros. Em 2050, a severidade concentrou-se de fevereiro a agosto, com diminuição do perigo de incêndio ao final do ano, exceto nos estados (PA, PI, MA, TO), que mantiveram índices elevados até novembro. Em 2075, observou-se um padrão que se apresenta de duas formas: com perigo de incêndio nas classes altas e muito altas, generalizado no primeiro semestre (janeiro a junho), com redução parcial em julho/agosto, mantendo-se apenas em TO, PI e MA, e um aumento em setembro/outubro em toda a região (Figura 38).

Os estados do Maranhão e do Piauí destacaram-se por estarem classificados na classe de grau de perigo alto ao longo do tempo, exceto em janeiro, quando se mantiveram em grau de perigo nulo ou pequeno. Por fim, em 2100, o período de fevereiro a maio consolida-se como crítico para toda a região. Observou-se variabilidade nos meses de seca tradicional para a região. Enquanto Rondônia e Mato Grosso oscilaram em junho/julho, com grau de perigo de nulo a alto, os estados do Pará e do Tocantins apresentaram a mesma variação de perigo de agosto a dezembro. Contudo, em São Luís (MA) e Parnaíba (PI), o grau de perigo se manteve em nível muito alto em agosto, evidenciando a persistência localizada do perigo de incêndio (Figura 38).

Figura 38. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP para os cenários SSP1-2.6 de projeção futura para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100





Para o cenário SSP2-4.5, em 2030, o P-EVAP, no perigo de incêndios na classe muito alta, variou de abril a dezembro em 66% dos dias. No mês de dezembro, em 77,4% dos dias, o índice foi classificado como de perigo muito alto. Em todos os anos do cenário, foram 1274 dias (87,2%) dos 1460 dias analisados e 104 dias (7,1%) na classe alta. Os maiores números de dias nestas classes foram registrados em 2050, 2075 e 2100 (Figura 39).

A Figura 39 apresenta a distribuição mensal do índice P-EVAP no cenário SSP2-4.5, ilustrando um perigo acentuado e recorrente ao longo dos anos. Em 2030, observa-se a predominância das classes de perigo nulo e pequeno no primeiro trimestre. A mudança para a classe muito alta ocorre de forma abrupta a partir de abril e se mantém até setembro. Entretanto, persiste o perigo na região Nordeste da área de estudo, que abrange os estados do Maranhão e do Piauí.

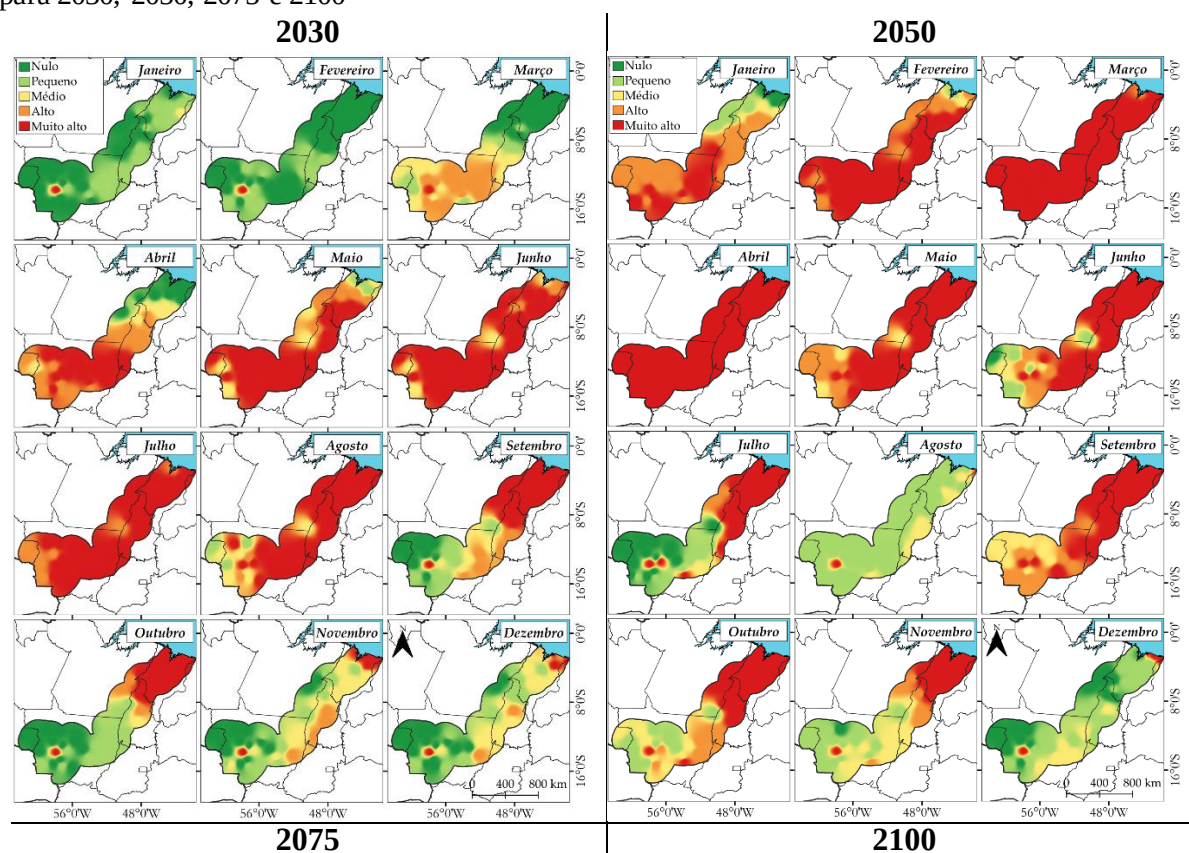
Enquanto a porção sudoeste (MT e RO) tende a apresentar redução do perigo em outubro, a área a nordeste mantém índices elevados, prolongando o período de incêndios até o início de novembro em todos os anos projetados, indicando maior vulnerabilidade desta sub-região no cenário intermediário (Figura 39). Para 2050, as classes de perigo alta e muito alta já se iniciam em janeiro e se estendem até julho, com severidade expressiva que abrange toda a região em março e abril.

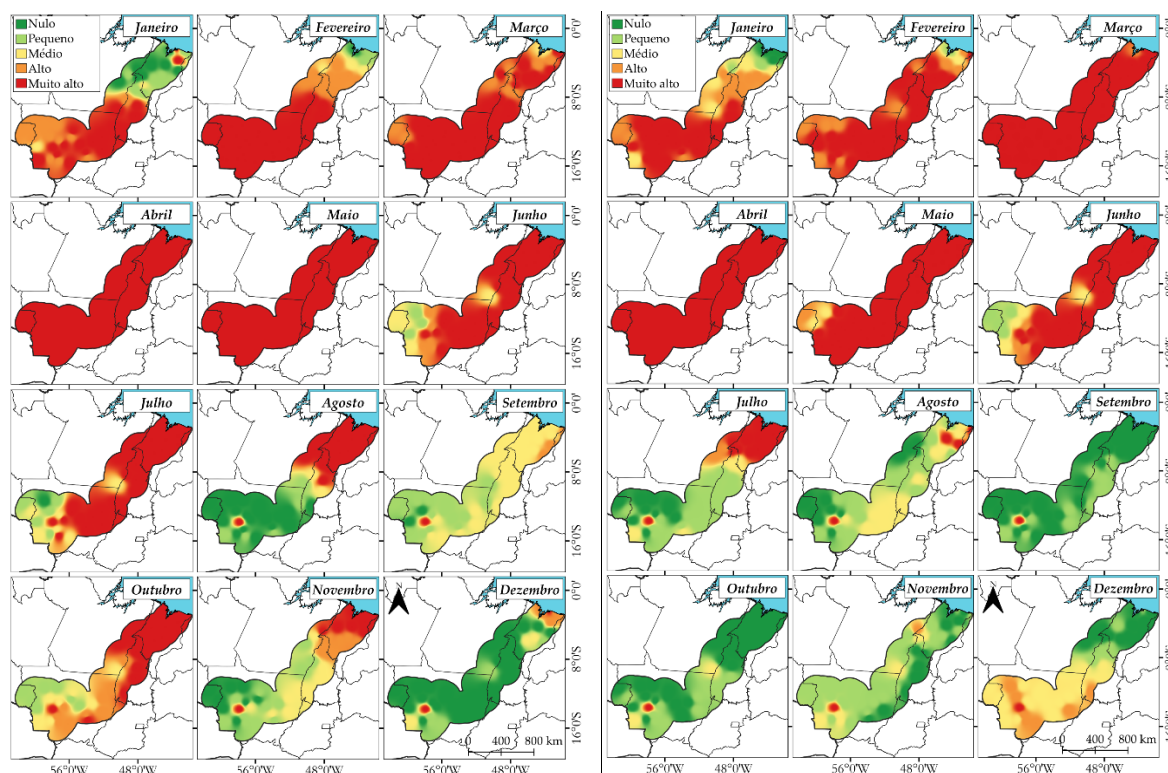
Na porção nordeste da região, que corresponde aos estados do Piauí e do Maranhão, e na porção sul do estado do Pará, o índice permanece na classe de perigo muito alto de setembro

a novembro (Figura 39). Apenas nos meses de agosto e dezembro identificou-se a predominância de níveis de perigo de nulo a médio na área de transição.

Nos anos de 2075 e 2100, as projeções indicaram que as classes de perigo alto e muito alto já se iniciam em janeiro e se estendem até julho, principalmente na porção sul-sudoeste da região, com destaque para o estado de Mato Grosso. A partir de março, observou-se predominância da classe muito alta em toda a faixa de transição, o que indica um cenário crítico de perigo de incêndios (Figura 39).

Figura 39. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP para os cenários SSP2-4.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100





No cenário SSP5-8.5, para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100, o grau de perigo de incêndio apresentou as maiores porcentagens nas classes altas (11,9%) e muito alta (64%). Os anos de 2050 e 2100 destacaram-se pelo maior percentual na classe muito alta, com 73,7% e 80,8% dos dias do ano, respectivamente (Figura 40).

No ano de 2030, no cenário de altas emissões (SSP5-8.5), o índice concentrou 90% dos dias nas classes de grau de perigo alto e muito alto, de maio a outubro, nos estados de Mato Grosso, Rondônia, Tocantins e Pará; no entanto, nos estados do Maranhão e do Piauí, essa condição permanece até outubro. O grau de perigo pequeno ocorreu de dezembro a março, em 12,3% dos dias calculados nos anos analisados no cenário (Figura 40).

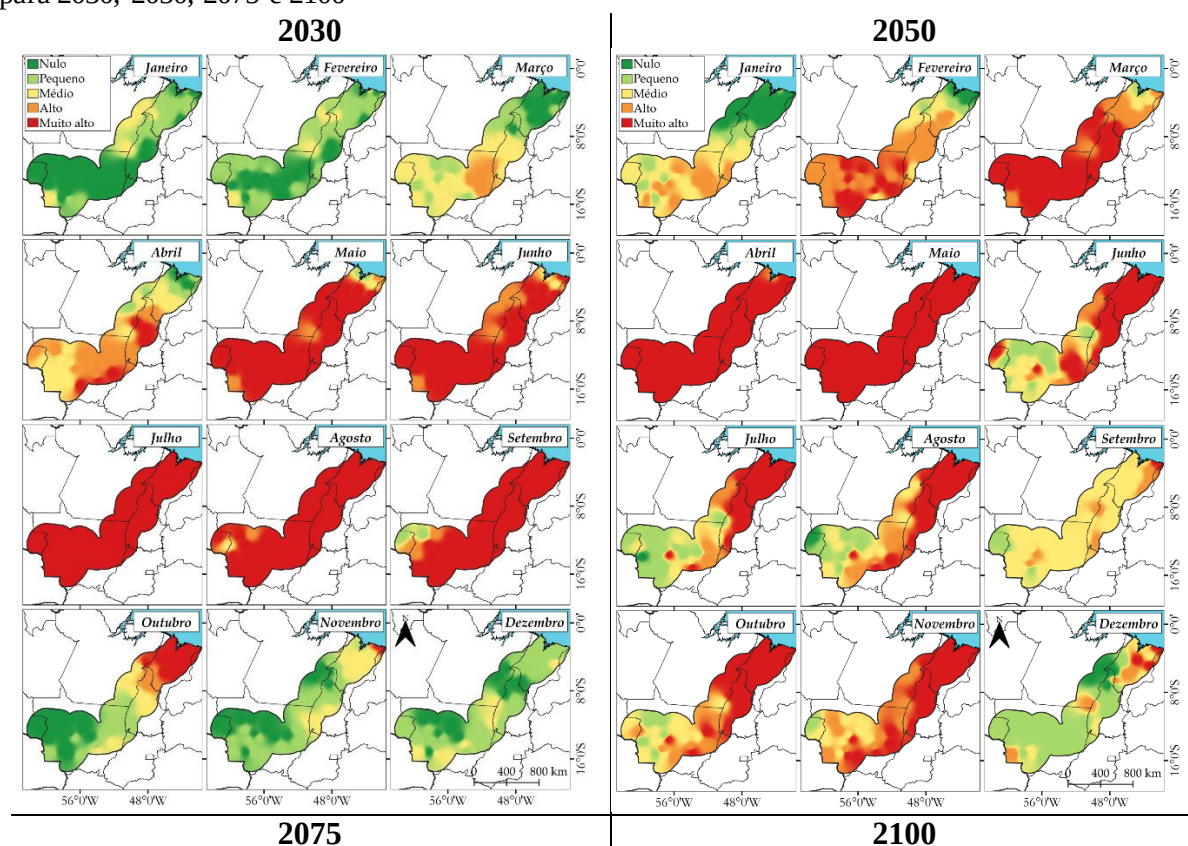
No ano de 2050, o índice registrou grau de perigo muito alto a partir de fevereiro, em 28,6% dos dias, e, de março a novembro, a média foi de 90% dos dias. Os estados de Rondônia, Mato Grosso e Tocantins apresentaram perigo médio a partir de fevereiro. Apenas nos meses de janeiro, setembro e dezembro, com grau de perigo de nulo a médio na região de estudo. Destaca-se que, no mês de dezembro, Piauí e Maranhão ainda apresentam grau de perigo alto e muito alto; o mesmo ocorreu em Santana do Araguaia (PA), Pontes e Lacerda e Vila Bela de Santíssima Trindade (MT) (Figura 40).

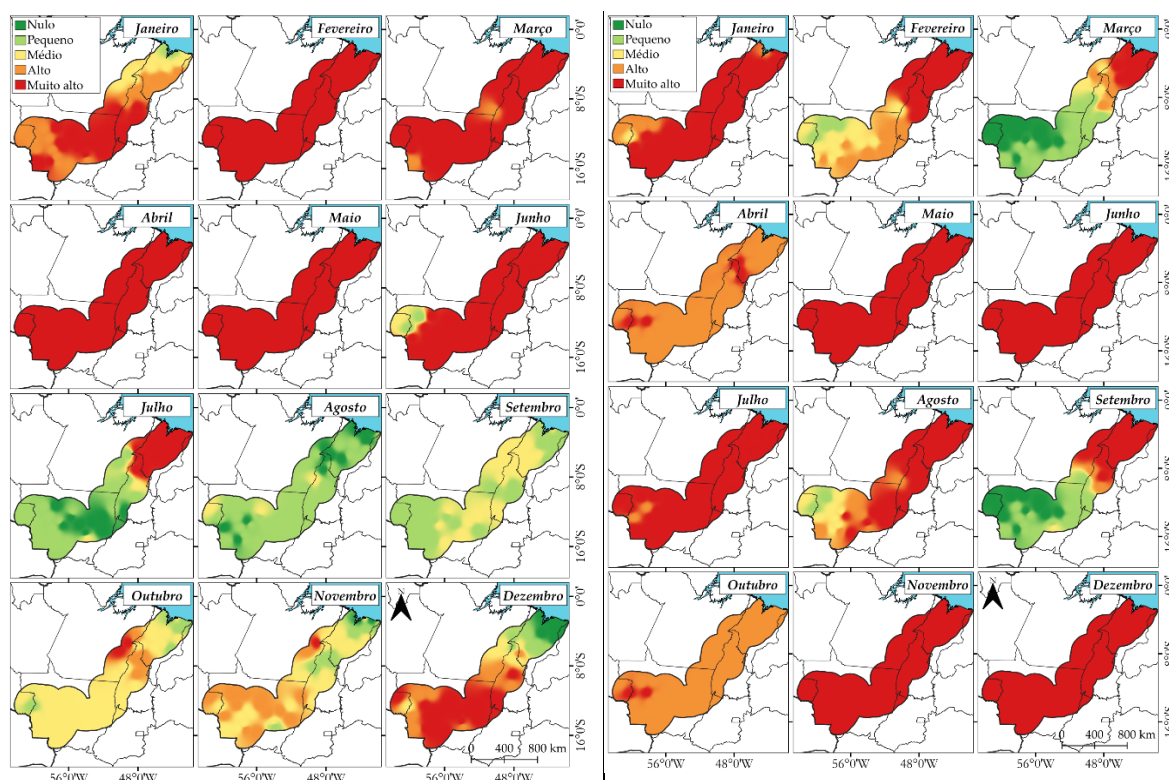
Para o ano de 2075, o grau de perigo já é observado logo no primeiro mês, com 25,8% dos dias, seguido de fevereiro a maio, com 100% dos dias, de julho (77,4%) e de dezembro (48,4%), em todos os estados analisados na área de transição. Para a classe alta, os dias com

maior percentual de perigo de incêndio foram observados em 2075: janeiro (70,9%), outubro (16,1%), novembro (26,7%) e dezembro (51,6%). De agosto a novembro, o grau de perigo oscilou de nulo a médio em toda a área, com classe muito alta na região de Santana do Araguaia (PA), e, em dezembro, classes de nulo a médio, apenas na porção norte e nordeste dos estados do Piauí e do Maranhão (Figura 40).

Em todos os meses do ano de 2100 no cenário SSP5-8.5, o índice P-EVAP, demonstrou um grau de perigo de incêndio muito alto, que se inicia no mês de fevereiro, seguidos pelos meses de maio a agosto e de novembro a dezembro, com todos os dias inseridos nesta classe, nos meses de setembro com 73,3% abrangendo os estados do (PA, TO, MA e PI) e outubro com 25,5% dos dias na classe alta em toda a área de estudo. No ano de 2100, as projeções indicaram que as classes de perigo nulo a médio limitaram-se aos meses de março e setembro, concentrando-se principalmente na região dos estados de Mato Grosso e Rondônia (Figura 40).

Figura 40. Mapa do índice de perigo de incêndio P-EVAP para os cenários SSP5-8.5 de projeção futura para 2030, 2050, 2075 e 2100





4.4 Discussão

O ecótono Cerrado-Amazônia desempenha um papel fundamental na conectividade e na dinâmica dos ecossistemas (Silva, Souza, Jasper, 2024). Reconhecida como a maior savana-floresta do mundo, essa zona de transição caracteriza-se por sua complexidade física e variabilidade climática (Marques et al., 2020). Nesse contexto, a ocorrência de condições meteorológicas extremas, como baixa umidade, altas temperaturas e ventos intensos, contribui significativamente para o aumento da inflamabilidade da vegetação (Fiedler et al., 2020; Sari, 2021). Diante disso, os índices de perigo FMA+ e P-EVAP consolidam-se como instrumentos essenciais para a prevenção de incêndios florestais (Souza, Casavecchia, Stangerlin, 2012; Delgado et al., 2022b).

Os índices FMA+ e P-EVAP indicaram uma expansão do número de dias classificados com grau de perigo alto e muito alto. Criticamente, houve uma tendência do período de perigo se estender até novembro e dezembro, meses tradicionalmente associados ao início da estação chuvosa.

As projeções climáticas mostraram uma transição alarmante no regime de fogo da interface Cerrado-Amazônia. No cenário SSP1-2.6, mesmo diante de projeções otimistas voltadas à mitigação, o índice FMA+ manteve valores elevados, com predominância da classe muito alta em mais de 66% dos dias projetados. A persistência do perigo extremo nos anos de

2050 e 2075 abrange ~89% dos dias do ano, o que demonstra que o perigo não se limita a eventos ou períodos isolados, mas constitui um padrão contínuo.

No cenário SSP2-4.5, o perigo de incêndios para os anos de 2075 e 2100 deixará de ser um fenômeno sazonal para se tornar permanente, com implicações diretas na gestão de monitoramento, exigindo uma reestruturação do calendário operacional das agências de controle, alinhadas às políticas públicas de prevenção, com antecipação do início da temporada de fogo, o prolongamento até o final do ano e a intensificação espacial em áreas específicas, como Maranhão, Piauí e Mato Grosso. Esses fatores, apontam para a necessidade urgente de revisão das estratégias de manejo e de adaptação às novas condições climáticas.

A transição do perigo de incêndio de um evento sazonal para uma condição permanente, conforme projetado para os horizontes de 2075 e 2100, impõe uma revisão profunda das estratégias de governança ambiental e de resposta a desastres. O modelo tradicional de contratação temporária de brigadistas, concentrado apenas no segundo semestre, se tornará obsoleto diante da antecipação da temporada de fogo para o primeiro semestre e de seu prolongamento até dezembro. Nesse contexto, a implementação de brigadas permanentes surge como uma medida imperativa para garantir a prontidão diante de um risco que agora permeia todo o ciclo anual (Soares; Batista; Tetto, 2025).

Paralelamente, o Manejo Integrado do Fogo (MIF) deverá enfrentar desafios crescentes na execução de queimas prescritas (Soares, 2017). A redução das janelas de oportunidade para queimas controladas, que se tornarão mais estreitas e meteorologicamente instáveis, exigirá uma precisão analítica superior, fundamentada na integração oficial de índices como o FMA+ e o P-EVAP aos boletins de risco estaduais (Soares; Batista; Tetto, 2025). Essa vigilância deverá evoluir para um sistema por via satélite e terrestre, com monitoramento contínuo, eliminando períodos que antes eram considerados de baixa prioridade e fortalecendo os mecanismos de alerta precoce para a detecção imediata de focos de calor (Ma et al., 2022).

Geograficamente, a intensificação espacial do perigo nos estados do Maranhão, Piauí e Mato Grosso demanda uma descentralização estratégica dos recursos. A eficácia do combate dependerá do deslocamento antecipado de bases operacionais, aeronaves e equipamentos (Soares; Batista; Tetto, 2025) para essas zonas de maior vulnerabilidade. Ademais, considerando que a propagação do fogo transcende limites administrativos, torna-se essencial o fortalecimento de consórcios interestaduais e de políticas públicas integradas que facilitem o compartilhamento de recursos e de inteligência em crises de longa duração (Ma et al., 2022).

Por fim, a adaptação às novas condições climáticas exige uma revisão normativa das leis de uso do solo. As autorizações para a limpeza de pastagens e o manejo agropastoril devem

ser recalibradas para considerar o déficit hídrico severo que, nas projeções futuras, antecede o calendário histórico (Soares; Batista; Tetto, 2017). Complementarmente, as ações de educação ambiental e de extensão rural devem ser intensificadas para reorientar a percepção de risco dos produtores locais (Costa et al., 2025). É fundamental comunicar que o regime de chuvas de final de ano pode não ser mais suficiente para a extinção natural de incêndios, o que exige uma nova consciência sobre a segurança no uso do fogo em um cenário de aridez persistente (Ma et al., 2022).

A análise espacial mostrou que a vulnerabilidade não é homogênea. Enquanto a porção sudoeste da região, nos estados de Mato Grosso e Rondônia, apresentou redução do perigo a partir de outubro, a área nordeste (Maranhão e Piauí) manteve índices elevados até novembro, indicando maior suscetibilidade nessa sub-região. Essa heterogeneidade reforça a necessidade de estratégias diferenciadas de manejo e de prevenção do fogo (Ma et al., 2022).

O índice P-EVAP, no cenário intermediário, classificou 66,03% dos dias de abril a dezembro com grau de perigo muito alto, com um pico de 77,4% em dezembro. Enquanto no índice FMA+, 92% dos dias avaliados ao longo do período se enquadraram nas mesmas classes. Em 2075 e 2100, observa-se a predominância absoluta dessas categorias, o que consolida um cenário de perigo crítico e persistente em toda a faixa de transição Cerrado-Amazônia. Esse padrão evidencia que, mesmo em anos relativamente próximos, o perigo de incêndio deixa de ser restrito ao período seco tradicional e se prolonga até o final do ano.

No cenário SSP5-8.5, os resultados são ainda mais críticos. A sazonalidade do fogo, historicamente restrita ao período seco (de abril a novembro), tende a desaparecer, dando lugar a um regime de perigo permanente ao longo de todo o ano. Em 2100, a frequência de dias classificados como críticos atingiu 94,2%, indicando que o fogo poderá se tornar uma ameaça constante ao longo de todo o ano. Essa ruptura da sazonalidade compromete práticas de manejo agrícola e florestal, que dependem de janelas seguras para a realização de queimadas prescritas (Ma et al., 2022; Aragão et al., 2023). Principalmente das comunidades tradicionais, com o fim da previsibilidade, precisarão ressignificar o uso das queimas, pois o colapso da sazonalidade histórica lhes imporá o desafio de reinventar práticas. A convivência com o fim dos ciclos de queimas ancestrais não deve significar a proibição do fogo, o que muitas vezes gera o acúmulo de biomassa e incêndios catastróficos milenares (Bueloth et al., 2026), mas sim a adoção de um Manejo Integrado do Fogo (MIF) de base comunitária (Soares; Batista; Tetto, 2025), com queimas de baixa intensidade ou preventivas no início da estação úmida (quando o solo ainda tem umidade), criando mosaicos de paisagem que impedem a propagação de grandes incêndios no período crítico projetado para 2075 e 2100. Poder desenvolver ainda, a transição para

sistemas agroecológicos mais resilientes, como os Sistemas Agroflorestais (SAFs), e incorporar tecnologias de monitoramento ao saber local são estratégias vitais para mitigar a vulnerabilidade hídrica. Utilizando Protocolos Comunitários de Manejo, que definem normas internas sobre quando e onde usar o fogo, baseadas nas novas projeções de perigo permanente, bem como a implementação de brigadas comunitárias, com formação de brigadistas da própria comunidade, que possuem conhecimento do terreno e podem agir imediatamente antes que um foco de calor se torne um incêndio de grandes proporções. Essa adaptação cultural será necessária para que o manejo do fogo deixe de ser uma prática baseada apenas na memória do passado e torne-se uma estratégia de sobrevivência diante do futuro projetado de aridez persistente (Bueloth et al., 2026).

No índice P-EVAP de 2075, no cenário SSP5-8.5, foi identificada uma condição incomum na região de transição em agosto. Nesse período, que normalmente corresponde ao pico de seca e fogo, o perigo de incêndio variou apenas entre as classes nulo e médio, o que pode ser interpretado como uma anomalia específica ou como erros dos modelos matemáticos na simulação da projeção. Assim, pode-se inferir que o modelo foi incapaz de representar as condições climáticas locais (Babaousmail, 2021).

O trabalho de Silva et al. (2019b), com base em índices de perigo de incêndio calibrados a partir de simulações climáticas regionais para o bioma Cerrado, utilizou três cenários (otimista, intermediário e pessimista), com índice de perigo de incêndio como preditor e dados de saída de um modelo climático regional. Este modelo explicou mais de 70% da variabilidade da área queimada e fez previsões para um aumento significativo em todos os cenários de mudanças climáticas, com um aumento de 39% no cenário intermediário e de 95% no cenário de maior forçante radiativa, enquanto no cenário SSP1-2.6 os resultados se mostraram compatíveis com uma tendência de moderação a longo prazo. Ainda no bioma Cerrado, Melo et al. (2021) avaliaram os incêndios em função das condições climáticas e identificaram incêndios recorrentes na estação seca, de junho a novembro, com variação ao longo dos anos estudados.

O estudo de Delgado et al. (2022b), realizado no Parque Nacional de Itatiaia, previu o grau de perigo de incêndios utilizando o índice FMA+, que se mostrou confiável e adequado à região, podendo ser aplicado em outras regiões com condições climáticas semelhantes. Este estudo também demonstrou sua aplicabilidade a modelos que simulam o clima futuro em cenários de Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs). No cenário futuro proposto, o índice indicou que os anos de 2035, 2041 e 2049 terão grandes incêndios na Mata Atlântica (Delgado et al., 2022b).

No estudo de De Sousa et al. (2025), o declínio prolongado da umidade do solo e a seca em sistemas hidrográficos interligados da Amazônia, do Cerrado e da Mata Atlântica são determinantes para as temporadas extremas de incêndios, reforçando a vulnerabilidade crescente do Pantanal. O sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) mostrou que temperaturas mais elevadas do ar podem contribuir para um aumento no número de incêndios de grande porte, capazes de causar perdas permanentes em áreas florestais (IPCC, 2021). Alterações nesses elementos, como a temperatura do ar e a umidade relativa, levarão a eventos de incêndio mais extremos no futuro (Touma et al., 2021; Burrell et al., 2022).

Em um estudo recente na América do Sul, que utilizou os cenários futuros SSP1-2.6 e SSP5-8.5 para todos os biomas do Fundo Mundial para a Natureza, os autores verificaram um aumento da temperatura do ar, principalmente nas regiões tropicais, entre 2021 e 2040 (Delgado et al., 2022b). Corroborando o presente estudo, que estimou um aquecimento progressivo, as projeções indicaram temperaturas máximas superiores a 39 °C no cenário SSP5-8.5, acompanhadas de umidade relativa inferior a 40%, o que intensifica a inflamabilidade da vegetação e eleva o perigo de incêndios. Além disso, os cenários futuros apontaram para um aquecimento ainda mais acentuado e para uma seca climática progressiva, com temperaturas médias atingindo picos de até 39,6 °C em 2100 (SSP5-8.5). A redução sistemática da umidade relativa e dos volumes pluviométricos durante a estação seca sugere um colapso potencial do regime de precipitação regional (Xu et al., 2020; Delgado et al., 2022b), confirmando a hipótese de savanização da Amazônia e de desertificação em áreas de transição (Ma et al., 2022; Aragão et al., 2023). Desta forma, regiões florestais tropicais, tradicionalmente resilientes ao fogo, agora enfrentam uma vulnerabilidade crescente (Marques et al., 2020). Esse perigo decorre da intensificação da seca, da fragmentação da vegetação e do aumento das fontes de ignição (Silva et al., 2024). Esses resultados estão em consonância com a literatura estabelecida (Cochrane & Barber, 2009; Silva Júnior, 2018; Le Roux et al., 2022).

O aspecto mais crítico identificado neste estudo foi a alteração do calendário do fogo. O deslocamento do pico de perigo para os meses imediatamente posteriores ao término da estação chuvosa (maio e junho) reduz a janela de segurança para o manejo do fogo e aumenta a vulnerabilidade da vegetação (Xu et al., 2020; Delgado et al., 2022a), o que contribui para o aumento do perigo de incêndios. Em estados como Pará, Piauí e Maranhão, observa-se ainda o alargamento da estação seca, com manutenção do risco elevado até dezembro e ressurgimento precoce no início do ano.

A desconfiguração do calendário sazonal impõe desafios logísticos e técnicos ao Manejo Integrado do Fogo (MIF). A antecipação do déficit hídrico para o primeiro semestre compromete a eficácia das queimas prescritas, pois a janela de baixa inflamabilidade é drasticamente reduzida. As ações de prevenção que normalmente ocorriam em junho/julho precisarão ser antecipadas para março/abril, período em que, historicamente, o solo ainda estaria muito saturado (Aragão et al., 2023; Bueloth et al., 2026). Contudo, a rápida transição para o estado crítico em maio e junho, eleva o risco de escape das queimadas controladas, pois o déficit hídrico precoce altera a inflamabilidade do combustível fino. Isso significa que a biomassa estará disponível para queimar muito antes do que os brigadistas estariam habituados (Soares; Batista; Tetto, 2025). Portanto, o MIF deixará de ser guiado por cronogramas fixos, exigindo uma governança baseada em limiares dinâmicos de umidade e de biomassa (Ma et al., 2022; Aragão et al., 2023).

O teste de Mann–Whitney indicou que, em geral, não há diferenças significativas entre os dados observados e os simulados das variáveis meteorológicas, o que valida a robustez do modelo. Os baixos valores de RMSE ($< 6,0\%$) e o índice de Willmott próximo de 1 (especialmente para a umidade relativa, $d > 0,9$) confirmam a capacidade do modelo de replicar a sazonalidade e a alternância entre períodos secos e chuvosos. Entretanto, observou-se uma heterogeneidade espacial que reforça a complexidade climática regional (Oliveira & Martins, 2026). Estados como Rondônia e Piauí apresentaram as maiores divergências. Em Rondônia, as discrepâncias podem estar associadas à dificuldade do Modelo de Circulação Geral (GCM) em capturar efeitos de microescala decorrentes de mudanças rápidas no uso do solo e de desmatamento intenso, que alteram os fluxos de calor. No Piauí, a variabilidade da temperatura e a influência de sistemas atmosféricos distintos do restante da Amazônia contribuem para o viés nas simulações, sugerindo a necessidade de correções de viés mais robustas para aplicações locais (Xu et al., 2020; Pampuch et al., 2023) ou de integração de múltiplas fontes de dados e ajustes nos modelos, o que pode melhorar a acurácia das estimativas via satélite (Pampuch et al., 2023).

A avaliação dos indicadores estatísticos (MBE) revelou uma tendência sistemática de superestimação da precipitação pelo modelo em todos os cenários, com maior intensidade no cenário SSP5-8.5. Esse comportamento é comum em GCMs aplicados a regiões tropicais, nas quais a parametrização de nuvens convectivas tende a produzir chuviscos excessivos. Embora o modelo represente adequadamente a variabilidade geral, essa superestimação pode mascarar a duração real dos períodos de seca severa. Os resultados de Babousmail (2021) mostram que o modelo do CMIP6 reproduziu adequadamente a climatologia média anual dos meses secos e

úmidos, apresentando uma ligeira superestimação ou subestimação entre ambos, enquanto, no conjunto médio, o desempenho foi relativamente bom durante o período chuvoso, corroborando os resultados obtidos no presente estudo. No entanto, outra limitação refere-se à velocidade do vento, em que os baixos coeficientes de correlação de Pearson e de concordância de Willmott (inclusive negativos no Maranhão e no Pará) refletem a dificuldade intrínseca do modelo em representar a dinâmica dos ventos locais, que podem ter sido influenciados pela rugosidade da superfície e pela topografia (Xu et al., 2020; Oliveira & Martins, 2026). Apesar disso, destaca-se que, no cenário SSP2-4.5 para Rondônia, o vento foi a única variável com ajuste estatístico satisfatório ($p > 0,05$), o que preserva a utilidade do modelo para análises de propagação de frentes de fogo.

As projeções simuladas do ano médio confirmaram que a sazonalidade pluviométrica ainda rege o ciclo de acúmulo e secagem de biomassa, mas a análise conjunta das variáveis meteorológicas revelou um comportamento perigoso durante o trimestre mais seco. A redução abrupta da precipitação, associada à queda da umidade relativa e ao aumento da velocidade dos ventos, criou condições ideais para incêndios de rápida propagação e de difícil controle (Oliveira et al., 2023). O fato do modelo climático reproduzir essa dinâmica de forma consistente em quase todas as variáveis reforça a confiabilidade das projeções para estudos de prevenção de incêndios futuros (Babousmail et al., 2021).

A projeção demonstrou uma elevação da temperatura global em 2100 no pior cenário (IPCC, 2021), evidenciando um avanço acelerado das mudanças climáticas, com repercussões diretas sobre os biomas, especialmente durante a estação seca (Matteo et al., 2025). Esse cenário reforça a vulnerabilidade da região de transição Cerrado–Amazônia, onde a sazonalidade já exerce forte influência sobre a dinâmica ecológica e a ocorrência de incêndios (Hofmann et al., 2023; Silva; Souza; Jasper, 2024).

O aumento global na gravidade das condições meteorológicas favoráveis à ocorrência de incêndios (Di Nunno & Granata, 2025) evidencia que os elementos climáticos têm acelerado a intensificação de cenários de alto perigo (IPCC, 2021; Abatzoglou, 2025), com impacto significativo nos biomas, pois alteram o período de fogo e elevam o índice de perigo de incêndios (Oliveira et al., 2023). Nos estudos analisados por Abatzoglou et al. (2025) e por Liu et al. (2025), os autores relatam uma elevação na probabilidade de ocorrência de incêndios. Essas evidências alinham-se aos alertas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS 13) de Ação Contra a Mudança Global do Clima da ONU, que preconiza a urgência do fortalecimento da resiliência e da capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e catástrofes naturais. Adicionalmente, o avanço desses incêndios ameaça diretamente as metas

do ODS 15 (Vida Terrestre), comprometendo a conservação dos ecossistemas florestais e a reversão da degradação da terra.

Os incêndios florestais recorrentes podem promover mudanças nas condições meteorológicas regionais, levando os ecossistemas de florestas úmidas à transição para formações savânicas (Brando et al., 2014; Silva Júnior et al., 2022; Bourgoïn et al., 2025). Essa dinâmica é influenciada pelas condições meteorológicas, consideradas fatores cruciais para a dinâmica do fogo em regiões como o Pantanal e a transição Amazônia-Cerrado (De Sousa et al. 2025). Este padrão regional é apoiado por evidências de tendências de secas severas (Marques et al. 2021; Da Veiga et al. 2025) e reforça a compreensão de que os regimes de incêndio locais e regionais estão intimamente ligados à reciclagem de umidade e às mudanças climáticas.

Os resultados do estudo evidenciam a influência direta das condições meteorológicas sobre o perigo de incêndio, caracterizado pelos períodos tradicionais de seca e de chuva na região. Nessa dinâmica, os índices FMA+ e P-EVAP apontaram predominantemente graus de perigo classificados como alto ou muito alto, reforçando a relação entre a variabilidade meteorológica e o perigo de incêndios no período atual. No entanto, as projeções futuras indicam intensificação desse perigo, que se manifesta em quase todos os meses do ano, especialmente em cenários de maior força radiativa. No trabalho de Silva, Souza e Jasper et al. (2024), ao avaliar a eficiência dos índices FMA+ e P-EVAP com dados meteorológicos de estações localizadas no sudeste da Amazônia, os autores identificaram padrões semelhantes aos encontrados neste estudo, estação chuvosa de outubro a abril e estação seca de maio a setembro, utilizando dados de superfície das estações meteorológicas. Tal condição corrobora este estudo, pois as variáveis meteorológicas contribuem para o aumento do perigo de incêndios, com o índice FMA+ indicando que 100% dos dias se enquadraram nas classes de perigo alto e muito alto, enquanto o índice P-EVAP revelou que, de junho a agosto, 97,4% dos dias apresentaram perigo elevado ou muito elevado de incêndio.

As projeções futuras indicam mudanças significativas na sazonalidade climática, com elevação das temperaturas e de eventos climáticos extremos (IPCC, 2021), o que aumenta o risco de incêndios, que representam um perigo para a conservação e preservação dos biomas Cerrado e Amazônia (Hofmann et al., 2023; Silva, Souza e Jasper, 2024). Observou-se uma tendência clara de antecipação e prolongamento do período seco, corroborada pela redução da umidade e pelo aumento da velocidade do vento, fatores que intensificam exponencialmente o risco de incêndios (Oliveira & Martins, 2026). Essa alteração no calendário do fogo é evidente nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, com predominância das classes alto e muito alto em mais

de 60% dos dias do ano, reforçando a necessidade urgente de revisar as políticas públicas de prevenção e manejo do fogo, atualmente baseadas em uma sazonalidade que tende a se reconfigurar nas próximas décadas.

Entre as ações recomendadas destacam-se: sistemas de prevenção com regime contínuo de operação, monitoramento climático dinâmico por meio de Sistemas de Alerta Precoce, fortalecimento do Manejo Integrado do Fogo (MIF) como instrumento legal, implementação de zoneamento de risco e descentralização operacional (Soares; Batista; Tetto, 2025). Além disso, sugere-se substituir calendários fixos por gatilhos baseados em indicadores e criar centros logísticos de pronta resposta em áreas de maior intensificação espacial (Aragão et al., 2023). As políticas públicas também devem prever o deslocamento permanente de equipamentos pesados e aeronaves para regiões de vulnerabilidade extrema, reduzindo o tempo de resposta, que atualmente depende de bases distantes (Soares; Batista; Tetto, 2025).

Além disso, a governança do fogo deve evoluir para um modelo de gestão adaptativa, em que os instrumentos regulatórios, como as moratórias de queimadas (Aragão et al., 2023), sejam acionados por limiares críticos de déficit hídrico (P-EVAP) e não por cronogramas civis. Essa reconfiguração é essencial para que o manejo deixe de ser uma resposta à crise e se torne uma estratégia de manutenção da integridade ecossistêmica frente à aridez projetada. O decreto de proibição ou de autorização de queimadas deve basear-se no monitoramento em tempo real. Se os dados indicarem criticidade em maio, a política deve ser antecipada automaticamente, independentemente do mês vigente.

A análise regional evidencia cenários distintos para o estado do Piauí e para a região leste do ecótono. Independentemente da trajetória das emissões, esses locais tendem a apresentar maior risco de incêndio, pois; a região sofre forte influência do Oceano Atlântico sobre o clima local, que regula a entrada de umidade e a sazonalidade das chuvas, além de sua proximidade à linha do Equador e de condições de relevo que intensificam contrastes regionais e tornam essas áreas mais vulneráveis a secas e incêndios, evidenciando a necessidade de políticas públicas de prevenção que operem em um regime de continuidade operacional e de brigadas em favor de estruturas fixas no território.

A transição para cenários pessimistas não apenas altera a magnitude dos índices, mas também transforma meses historicamente seguros em períodos de severo déficit hídrico. Rondônia, Pará e Mato Grosso, apesar de concentrarem os maiores índices pluviométricos, apresentam maior variabilidade e discrepâncias nas simulações, o que exige cautela na interpretação dos extremos.

4.5 Conclusão

Nas projeções simuladas nos cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, o modelo climático global HadGEM3-GC31-LL é considerado uma ferramenta robusta para representar a macroescala climática e a sazonalidade da transição Cerrado-Amazônia. As projeções para os anos de 2030, 2050, 2075 e 2100 evidenciam mudanças significativas na distribuição das variáveis meteorológicas, com forte variabilidade da precipitação e heterogeneidade espacial, sendo que os estados de Rondônia, Mato Grosso e Pará concentraram os maiores índices pluviométricos, enquanto Maranhão, Piauí e Tocantins registraram os menores totais.

Os índices FMA+ e P-EVAP são ferramentas estratégicas para prever cenários de perigo de incêndio. No cenário SSP1-2.6, ainda há manutenção de uma sazonalidade definida, mas com janelas de perigo ampliadas e picos de julho a setembro, o que compromete o calendário tradicional de prevenção de incêndios. No cenário SSP2-4.5, há uma transição gradual, com perigo elevado mais persistente ao longo do ano, o que exige estratégias adaptativas. Enquanto no cenário SSP5-8.5 consolida-se um quadro extremo, em que o perigo muito alto predomina quase continuamente, tornando o fogo uma condição permanente na região.

Considerando os períodos analisados nos cenários, o perigo de incêndios florestais exigirá estratégias específicas de mitigação e adaptação para cada sub-região, de acordo com suas particularidades climáticas. O uso de índices robustos, como FMA+ e P-EVAP, aliados a modelos climáticos ajustados, constitui uma ferramenta estratégica para orientar políticas públicas de prevenção e combate, que devem abandonar a abordagem de condição sazonal atual e adotar monitoramento contínuo e adaptativo, estabelecendo uma reestruturação das políticas estaduais de contratação e de orçamento de brigadistas, com vínculos mais duradouros, equipes permanentes e prontidão em áreas críticas. O planejamento financeiro precisa migrar de alocações fixas para fundos flexíveis acionados por indicadores de risco, incluindo recursos específicos para logística e para monitoramento climático dinâmico. Além disso, a integração institucional deve vincular o orçamento ao Manejo Integrado do Fogo (MIF), fortalecendo as parcerias regionais e ampliando a participação comunitária. Essa mudança transforma o manejo do fogo em uma estratégia preventiva e adaptativa, alinhada à nova realidade climática.

Em última análise, a mitigação do perigo futuro de incêndios dependerá tanto de políticas climáticas globais quanto de uma gestão territorial adaptada a cada região, vinculando o orçamento das brigadas ao Manejo Integrado do Fogo (MIF), estimulando parcerias intermunicipais e interestaduais, reduzindo a dependência de bases distantes e criando mecanismos de participação comunitária na prevenção, com recursos destinados à capacitação local. Pois, a diferenciação regional reforça que soluções homogêneas não serão eficazes; é

essencial desenvolver planos específicos para cada estado, reconhecendo que a porção oeste (Rondônia e Mato Grosso) seca mais cedo do que a leste (Tocantins e Maranhão), mas que toda a região caminha para um futuro de maior inflamabilidade e perigo elevado de incêndios.

5. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A presente pesquisa consolidou a eficácia dos índices FMA+ e P-EVAP como as ferramentas mais precisas e consistentes para a estimativa do perigo de incêndio na interface Cerrado-Amazônia, apresentando maior precisão e consistência em diferentes condições meteorológicas, superando métricas tradicionais, como Angstron e EVAP/P, que demonstraram elevada variabilidade e menor confiabilidade. Embora o índice FMA possa ser considerado uma alternativa intermediária, a eficiência dos modelos depende diretamente da observação das características meteorológicas locais, o que reforça a importância de análises regionais para maior representatividade.

A integração desses índices ao modelo climático HadGEM3-GC31-LL (CMIP6) revelou uma transformação crítica na dinâmica do fogo nas próximas décadas. As projeções indicam uma ruptura progressiva da sazonalidade. No cenário SSP1-2.6 (otimista), projeta apenas a ampliação das janelas tradicionais de perigo de incêndio, enquanto no cenário intermediário SSP2-4.5 indica uma trajetória de perigo mais persistente, de maior intensidade e duração ao longo dos anos. No cenário pessimista, SSP5-8.5 consolida-se como uma condição extrema, em que o perigo muito alto se torna praticamente contínuo, transformando os incêndios de eventos esporádicos em uma característica permanente. A antecipação e prolongamento da estação de fogo exigem maior capacidade de resposta, planejamento integrado e uso contínuo de modelos ajustados às especificidades regionais.

O resultado mais crítico deste estudo reside na alteração do calendário do fogo. A análise dos índices FMA+ e P-EVAP demonstrou que as mudanças climáticas não atuarão apenas na intensificação do perigo, mas, fundamentalmente, no deslocamento temporal e na extensão do período de incêndios. No entanto, o Manejo Integrado do Fogo (MIF) continua sendo uma ferramenta viável, mas precisará ser profundamente adaptado e transformado em uma política de Estado robusta, com base na Prevenção contínua (brigadas permanentes e centros logísticos regionais). Com monitoramento dinâmico (alertas climáticos e indicadores de risco), governança adaptativa (integração institucional e participação comunitária). Assim, o manejo deixa de ser uma resposta emergencial e passa a ser uma estratégia preventiva e resiliente, capaz de lidar com a permanência do fogo sem aumentar desproporcionalmente o risco de escape.

Historicamente, nos estados de Mato Grosso, Pará e Tocantins, o pico de perigo ocorre em agosto e setembro. As projeções indicam uma migração desse pico para maio e junho nos anos de 2075 e 2100. No Pará, o índice P-EVAP atingiu valores extremos, indicando um déficit hídrico acumulado que torna a floresta de transição mais inflamável. No entanto, na porção oriental da transição, observou-se um aumento na duração da estação seca. No cenário SSP5-8.5, no Piauí e no Maranhão, o perigo declina em novembro e permanece elevado até dezembro; em cenários extremos para o ano de 2100, o perigo ressurgiu precocemente no início do ano. Porém, o estado de Mato Grosso poderá enfrentar condições críticas de perigo muito alto durante praticamente todo o ano até 2100. Isso sugere erros nos modelos matemáticos utilizados na simulação da projeção ou falhas no início da estação chuvosa, comprometendo a recarga hídrica necessária para suprimir o perigo de ignição do fogo e contribuindo para um perigo de incêndio elevado ao longo do ano.

A comparação e validação estatísticas entre dados de estações meteorológicas e de reanálise mostraram que o uso de reanálises, como o ERA5-Land, é uma alternativa válida e confiável, especialmente para o monitoramento em áreas com escassez de dados observacionais de estações meteorológicas de superfície. Além disso, as projeções climáticas do modelo HadGEM3-GC31-LL (CMIP6) demonstraram capacidade de representar a variabilidade sazonal da região de transição, embora com heterogeneidade espacial. As simulações revelaram mudanças significativas na distribuição das variáveis meteorológicas até o final do século, destacando-se a forte variabilidade da precipitação e a acentuada variabilidade regional.

Portanto, a adoção de índices robustos como FMA+ e P-EVAP, aliados a modelos climáticos ajustados, é estratégica para orientar políticas públicas de prevenção e combate. Tais políticas devem abandonar abordagens homogêneas e considerar as particularidades de cada sub-região, reconhecendo que o oeste da área de estudo seca mais cedo do que o leste. Em última análise, a mitigação do perigo futuro de incêndios dependerá da integração entre políticas climáticas globais e gestão territorial regionalizada, preparada para enfrentar um futuro de elevado perigo de incêndios, garantindo monitoramento contínuo, adaptação permanente das brigadas e conservação dos ecossistemas na interface Cerrado–Amazônia.

6. REFERÊNCIAS

Abatzoglou, John Theodore *et al.* Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, p. 6390. 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-61608-1>. Acesso em: 10 dez. 2025.

ALLEN, Richard George *et al.* **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. v. 285. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em 23 jul. 2024. Acesso em 23 jul. 2024.

ALMAGRO, André *et al.* Performance evaluation of Eta/HdGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. *Atmospheric Research*, 244, 105053, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809519316989?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2025.

AMERICO, Núria *et al.* Avaliação da inflamabilidade de espécies vegetais do Cerrado. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 9, p. 187–191, 12 jun. 2021. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/10479/18746>.

ARAGÃO, Mariana de Aquino *et al.* Risk of forest fires occurrence on a transition island, Amazon-Cerrado: Where to act? **Forest Ecology and Management**, v. 536, p. 120858, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112723000919?via%3Dihub>. Acesso em 23 jul. 2024.

BABAOUSMAIL, Hassen. *et al.* Evaluation of the Performance of CMIP6 Models in Reproducing Rainfall Patterns over North Africa. *Atmosphere*, v. 12, n. 4, p. 475, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/4/475>. Acesso em: 20 Jan. 2024.

BALLARIN, André Simões *et al.* CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, p. 47.2023???. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41597-023-01956-z>. Acesso em: 20 jan. 2025

BATISTA, Antonio Cartos. Detecção de incêndios florestais por satélites. **Floresta**, v. 34, n. 2, 2004. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2402>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BENFICA, Nayanne Silva; SILVA, Danilo Paulúcio da; DELGADO, Rafael Coll. Dynamics of burned areas through orbital data from the MODIS sensor and climate influence in the Chapada Diamantina National Park. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 75875–75890, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/33753>. Acesso em: 2 ago. 2024.

BOURGOIN, Clément *et al.* Extensive fire-driven degradation in 2024 marks the worst Amazon forest disturbance in over 2 decades. **Biogeosciences**, v. 22, n. 19, p. 5247–5256. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/22/5247/2025/>. Acesso em: 8 out. 2025.

BRANDO, Paulo Monteiro *et al.* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 17, p. 6347–6352, 2014. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1305499111>. Acesso em: 8 out. 2025.

BURRELL, Arden Louise. *et al.* Climate change, fire return intervals and the growing risk of permanent forest loss in boreal Eurasia. **Science of the Total Environment**, v. 831, p.

154885, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722019787>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BUELOTH, Aritza Revilla *et al.* Community participation, governance, and environmental education as drivers of local sustainable development: Tutumberos community, Peruvian Amazon. **World Development Sustainability**, v. 8, 2026, p. 100283. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772655X26000169>. Acesso em: 15 dez 2025

CAMARGO, Ângelo Paes de *et al.* Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 251–257, 1999. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1999/1999_RB_Agro_7\(2\)_251-257_ETPThTefetiva.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1999/1999_RB_Agro_7(2)_251-257_ETPThTefetiva.pdf). Acesso em: 18 nov. 2025.

CASAVECCHIA, Bruno Henrique *et al.* Índices de perigo de incêndios em uma área de transição Cerrado-Amazônia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, p. 842–854, 13 ago. 2019. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/17756>. Acesso em: 10 fev. 2024.

COCHRANE, Mark Andrew.; BARBER, Christopher P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. **Global Change Biology**, v. 15, n. 3, p. 601–612, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2008.01786.x>. Acesso em: 20 out. 2025.

COSTA, Tito Ricardo Vaz da; ARAUJO, Gilvan Charles Cerqueira de; LIMA, Clarissa Melo. Environmental education and forest fire prevention in energy transmission networks. **Revista DCS**, v. 22, n. 82, p. e3405, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistadcs.com/index.php/revista/article/view/3405>. Acesso em: 13 mar. 2026.

DE OLIVEIRA, Gabriel *et al.* Smoke pollution's impacts in Amazonia. **Science**, v. 369, n. 6504, p. 634–635, 2020. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abd5942>. Acesso em: 7 ago. 2024.

DE SOUSA, Bruna Rodrigues *et al.* Pantanal wetland wildfires are associated with drought in interconnected biomes. **Natural Hazards**, v. 121, n. 14, p. 16719–16745, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-025-07446-2>. Acesso em: 1 ago. 2025.

DE SOUSA, Jocy Ana Paixão *et al.* Forest fire risk indicator (FFRI) based on geoprocessing and multicriteria analysis. **Natural Hazards**, v. 114, n. 2, p. 2311–2330, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-022-05473-x>. Acesso em: 1 nov. 2024.

DA VEIGA, Renata Moura *et al.* Review article: Fire emissions in the Brazilian Cerrado – dynamics, estimates, management, and their role in the global carbon budget. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 25, n. 9, p. 3581–3601. 2025. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/25/3581/2025/>. Acesso em: 23 set. 2025.

DHAWAN, Pranjul *et al.* A comprehensive comparison of bias correction methods in climate model simulations: applications on ERA5-Land across different temporal resolutions. **Heliyon**

2024, 10(23), e40352. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024163839>. Acesso em: 13 nov. 2025.

DELGADO, Rafael Coll *et al.* Degradation of South American biomes: What to expect for the future? **Environmental Impact Assessment Review**, v. 96, p. 106815, 2022a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925522000816?via%3Dihub>. Acesso em: 1 set. 2024.

DELGADO, Rafael Coll *et al.* Assessment of a new fire risk index for the Atlantic Forest, Brazil. **Forests**, v.13, n.11, 1844, 2022b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/11/1844>. Acesso em: 1 set. 2025.

DI NUNNO, Fabio; GRANATA, Francesco. Análise espaço-temporal do FWI sobre a Europa e o Norte da África: tendências históricas e projeções climáticas sob RCP4.5 e RCP8.5. **Geosci. Front.**, 16, 102178, 2025. Disponível em: journal homepage: www.elsevier.com/locate/gsf. Acesso em: 23 jan. 2026.

EYRING, Veronika *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/gmd-9-1937-2016.html>. Acesso em: 21 set. 2025.

FAN, Xuewei *et al.* Global surface air temperatures in CMIP6: historical performance and future changes. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 104056, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abb051> Acesso em: 21 nov. 2025.

FARFÁN, Hugo Hinostroza *et al.* Correção de viés na previsão climática global da temperatura da superfície do mar por meio de filtros adaptativos no domínio da frequência. *Revista Brasileira de Climatologia* 2024, 34(20), 620–642. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/17005>. Acesso em: 13 nov. 2025.

FIEDLER, Nilton Cesar *et al.* Firefighting combat with fire retardants at different concentrations. **FLORESTA**, v. 50, n. 1, p. 1107–1112, 2020. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203499755>. Acesso em: 21 set. 2025.

FIRPO, Mári Ândrea Feldman *et al.* Assessment of CMIP6 models' performance in simulating the present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 4, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.948499/full>. Acesso 21 set. 2025.

FONSECA, Marisa Gesteira *et al.* Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2931–2946, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.14709>. Acesso em: 20 janeiro. 2026

HOFMANN, Gabriel Selbach, *et al.* Mudanças na circulação atmosférica e na evapotranspiração estão reduzindo a precipitação no Cerrado brasileiro. **Scientific Reports**,

13, 11236, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-38174-x>. Acesso em: 21 dez. 2025.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 19 dez. 2025.

IPCC. **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. [Editores]: H. Lee; J. Romero. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023b. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 13 jan. 2026.

JIANG, Lu *et al.* Análise comparativa de métodos de interpolação espacial para dados diários de precipitação em terrenos complexos. **Theor Appl Climatol**, v.157, n. 130, 2026. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-026-06041-0?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article#citeas. Acesso em: 23 mar. 2026.

LE ROUX, Renan *et al.* How wildfires increase the sensitivity of Amazon forests to droughts. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 4, p. 044031, 2022. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac5b3d/pdf>. Acesso em: 01 mar. 2026.

Liu, Zhongwei *et al.* Avaliação global de mudanças históricas em condições climáticas extremas de incêndio: insights de conjuntos CMIP6 e implicações para a atribuição probabilística ao aquecimento global. **Glob. Planet. Change**, 252, 104822, 2025. Disponível em: <https://pub.epsilon.slu.se/37221/1/liu-z-et-al-20250526.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2026.

LOTUFO, Juliana Barbosa da Silva *et al.* Evaluation of reanalysis and remote sensing products for wind speed estimation in the Brazilian Central-West. **Revista Brasileira de Geografia Física** 2025, 28(5), 3859-2871. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/view/261612>. Acesso em: 13 jan. 2026.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon tipping point: Last chance for action. **Science Advances**, v. 5, n. 12, p. eaba2949, 20 dez. 2019. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aba2949>. Acesso em: 17 jan. 2026.

MA, Yuanfan *et al.* Emissions of gaseous pollutants released by forest fire in relation to litter fuel moisture content. **Atmospheric Environment**, v. 284, p. 119215, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231022002801?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MABUDE, Khumbulani. *et al.* Gráficos de Mann-Whitney mistos GWMA-CUSUM e CUSUM-GWMA livres de distribuição para monitorar mudanças desconhecidas na localização do processo. **Communications in Statistics**. 51 (11), 6667–6690. 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/03610918.2020.1811331?scroll=top&needAccess=true>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MARAUN, Douglas. Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. **Current Climate Change Reports**, v. 2, n. 4, p. 211–220, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40641-016-0050-x>. Acesso em: 28 fev. 2025.

MARENGO, Jose Antônio; ESPINOZA, Jhan Carlo. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2016. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.4420>. Acesso em: 25 out. 2025.

MARENGO, Jose Antônio *et al.* Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 457, 10 Jan. 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-04241-4>. Acesso em: 28 fev. 2025.

MARENGO, Jose Antônio. *et al.* Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. **Natural Hazards**, v. 116, n. 3, p. 3617–3644, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-023-05827-z?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 25 out. 2025.

MARQUES, Susete Maria de Fátima Oliveira *et al.* Characterization of wildfires in Portugal. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 5, p. 775–784, 2011. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-010-0470-4?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 28 fev. 2025.

MARQUES, Eduardo Queiroz. *et al.* Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1501–1517, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-019-01720-z?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 15 ago. 2025.

MARQUES, Juliana Fazolo *et al.* Fire dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. **Journal of Environmental Management**, v. 299, p. 113586, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721016480?via%3Dihub>. Acesso em: 15 ago. 2025

MATTEO, Aurora *et al.* Challenges in assessing Fire Weather changes in a warming climate. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 8, n. 1, p. 284, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41612-025-01163-0>. Acesso em: 28 fev. 2025

MELO, Pedro *et al.* Assessing Wildfire Regimes in Indigenous Lands of the Brazilian Savannah-Like Cerrado. **Fire**, v. 4, n. 3, p. 34, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/4/3/34>. Acesso em: 08 fev. 2025

MORANDI, Paulo Sérgio *et al.* Tree diversity and above-ground biomass in the South American Cerrado biome and their conservation implications. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1519–1536, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-018-1589-8?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 28 fev. 2025

MOTA, Pedro Henrique Santos *et al.* Forest fire hazard zoning in Mato Grosso State, Brazil. **Land Use Policy**, v. 88, p. 104206, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837719304624?via%3Dihub>. Acesso em: 25 out. 2025.

NOBRE, Carlos Afonso; BORMA, Laura De Simone. ‘Tipping points’ for the Amazon forest. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 28–36, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877343509000062>. Acesso em: 25 out. 2025.

NUNES, José Renato Soares; SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos. FMA+ - Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná, Brasil. **FLORESTA**, v. 36, n.1, 2006. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/5509/4039>. Acesso em: 15 out. 2024.

OLIVEIRA, Ana Paula; GIL MARTINS, Paulo. Global Shifts in Fire Regimes Under Climate Change: Patterns, Drivers, and Ecological Implications Across Biomes. **Forests**, v. 17, n. 1, p. 104, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/17/1/104>. Acesso em: 02 mar. 2026.

PAMPUCH, Luana Albertani *et al.* A Review on Clustering Methods for Climatology Analysis and Its Application over South America. *International Journal of Geosciences*, v. 14, n. 9, 2023. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=127980>. Acesso em: 25 out. 2025.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro *et al.* Compreendendo a ação do fogo nos ecossistemas brasileiros. *Biodiversidade Brasileira*, v. 14, n. 1, p. 8–25, 2024. Disponível em: <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/index.php/BioBR/article/view/2180>. Acesso em: 25 out. 2025.

RIBEIRO, Andreia F. S. *et al.* The time since land-use transition drives changes in fire activity in the Amazon-Cerrado region. **Communications Earth & Environment**, v. 5, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01248-3>. Acesso em: 25 out. 2025.

SABINO, Marlus *et al.* Desagregação de chuvas diárias no Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 427–439, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/3GkHcFqtn8KYRZcvWfPWMgk/?lang=pt>. Acesso em: 25 out. 2025.

SANNIGRAHI, Srikanta *et al.* Examining the effects of forest fire on terrestrial carbon emission and ecosystem production in India using remote sensing approaches. **Science of the Total Environment**, v. 725, p. 138331, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720318441>. Acesso em: 25 out. 2025.

SANTOS, Sérgio Rodrigo Quadros dos *et al.* Classificação de Eventos Extremos de Precipitação em Múltiplas Escalas de Tempo em Belém-PA: Utilizando o Índice de Precipitação Normalizada. **Revista Brasileira de Geografia Física**.v. 7, n. 4, p. 628–635,

2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233179>. Acesso em: 22 jan. 2026.

SARI, Fatih. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*, v. 480, p. 118644, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112720314134>. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVA, Patrícia Santos *et al.* Impactos da meta de aquecimento global de 1,5 °C na futura área queimada no Cerrado brasileiro. *Forest Ecology and Management*, v. 446, p. 193–203, 2019b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112719301914?via%3Dihub>. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVA, Igor David de Barros *et al.* A wildfire warning system applied to the state of Acre in the Brazilian Amazon. *Applied Soft Computing*, v. 89, p. 106075, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494620300156?via%3Dihub>. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVA, Wanderson Carvalho da; SOUZA, Adilson Pacheco; JASPER, André. Vegetation fires and hydroclimatic relationships in watersheds in southeastern Amazonia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 6, p. 4206–4228, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/259689>. Acesso em: 15 mar. 2026.

SILVA JUNIOR, Carlos Antonio da. *et al.* Fires are driving long-term environmental degradation in the Amazon Basin. *Remote Sensing*, 14, 338, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/2/338>. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVA JÚNIOR, Celso H. L. *et al.* Deforestation-Induced Fragmentation Increases Forest Fire Occurrence in Central Brazilian Amazonia. *Forests*, v. 9, n. 6, p. 305, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/9/6/305>. Acesso em: 25 out. 2025.

SILVÉRIO, Divino Vicente *et al.* Agricultural expansion dominates climate change in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 10, p. 104015, 2015. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/10/104015/pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos; TETTO, Alexandre França. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. 2. ed. rev. Curitiba, 2017. 255 p. Disponível em: <https://online.pubhtml5.com/yinsa/yrtg/>. Acesso em 05 março 2026.

SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antônio Carlos; TETTO, Alexandre França. **Manual de prevenção e combate aos incêndios florestais**. 3. ed. Curitiba: Ed. dos Autores, 2025. Disponível em: <https://online.pubhtml5.com/yinsa/ikjv/>. Acesso em 05 março 2026.

SOUZA, Adilson Pacheco de *et al.* Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 52, n. 04, p. 215–227, 2017. <https://www.scielo.br/j/pab/a/JCmVwSyNRGmtJs93STFrTVB/?lang=en>

SOUZA, Adilson Pacheco *et al.* Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34–43, 2013. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/1334/pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

SOUZA, Adilson Pacheco de; CASAVECCHIA, Bruno Henrique; STANGERLIN, Diego Martins. Avaliação dos riscos de ocorrência de incêndios florestais nas regiões Norte e Noroeste da Amazônia Mato-grossense. **Scientia Plena**, v. 8, n. 5, 2012. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/17756/14465>. Acesso em: 25 out. 2025.

STEPHENS, Scott Lawrence *et al.* Fire and climate change: conserving seasonally dry forests is still possible. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 18, n. 6, p. 354–360, 2020. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/fee.2218>. Acesso em: 25 out. 2025.

TOUMA, Danielle *et al.* Human-driven greenhouse gas and aerosol emissions cause distinct regional impacts on extreme fire weather. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 212, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-20570-w>. Acesso em: 10 dez. 2025.

XU, Xiyan *et al.* Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 26, n. 10, p. 5874–5885, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15279>. Acesso em: 10 dez. 2025.

ZEFERINO, Leiliane Bozzi *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to long-term pasture in the Amazon rainforest-Cerrado transition environment. **CATENA**, v. 231, p. 107346, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S034181622300437X>. Acesso em: 20 out. 2025.