

TENDÊNCIAS E PADRÕES ECORREGIONAIS DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS FAVORÁVEIS A INCÊNDIOS NA AMÉRICA DO SUL COM BASE NO FIRE WEATHER INDEX — FWI (1981–2024)

Trends and Ecoregional Patterns of Meteorological Conditions Favorable to Wildfires in South America Based on the Fire Weather Index — FWI (1981–2024)

Shayene Bernardo Dutra

Universidade de São Paulo (USP), Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7513-9291>

shayenedutra@usp.br

Maria Eduarda Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Graduação em Geografia

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-9162-1925>

maedppro@gmail.com

João Batista F. Neto

Universidade de São Paulo (USP), Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7144-2901>

joao.geo@usp.br

Francielle da Silva Cardozo

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEOG)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4775-4649>

franciellecardozo@ufsj.edu.br

Gabriel Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Departamento de Geociências (DEGEO)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2093-9942>

pereira@ufsj.edu.br

Artigo recebido em janeiro/2026 e aceito em abril/2026

RESUMO

Este estudo analisou as tendências e os padrões ecorregionais das condições meteorológicas favoráveis a incêndios na América do Sul entre 1981 e 2024, com base no Fire Weather Index — FWI. Foram utilizados dados históricos em grade do sistema FWI, disponibilizados pelo Global Wildfires Information System — GWIS e calculados a partir das forçantes meteorológicas da reanálise ERA5. As anomalias anuais do FWI foram processadas e espacializadas segundo as ecorregiões de Nível III da América do Sul, permitindo avaliar a variabilidade interanual, as tendências lineares e os agrupamentos de ecorregiões com comportamento semelhante. Os resultados indicaram forte heterogeneidade espacial e temporal das condições favoráveis ao fogo, com alternância de anomalias positivas e negativas entre diferentes setores do continente. As ecorregiões 17.1.6, 20.1.3 e 17.1.4 destacaram-se como áreas críticas, apresentando as tendências positivas mais

expressivas, com maior coeficiente angular observado na ecorregião 17.1.6. O ano de 2021 foi identificado como o período de maior anomalia positiva da série, enquanto 2011 apresentou o menor valor mínimo, associado a condições meteorológicas mais úmidas. O biênio 2015–2016 também se destacou pela intensificação das anomalias positivas, compatível com os efeitos de um El Niño de forte intensidade. A abordagem ecoregional mostrou-se adequada para interpretar a distribuição espacial do perigo meteorológico de incêndio, oferecendo uma base histórica para subsidiar estratégias preventivas e adaptativas de manejo do fogo em escala continental.

Palavras-chave: Fire Weather Index; incêndios florestais; ecorregiões; anomalias climáticas; América do Sul.

ABSTRACT

This study analyzed the trends and ecoregional patterns of meteorological conditions favorable to wildfires in South America from 1981 to 2024, based on the Fire Weather Index — FWI. Historical gridded FWI data provided by the Global Wildfires Information System — GWIS and computed from ERA5 atmospheric reanalysis forcing were used. Annual FWI anomalies were processed and spatialized according to Level III ecoregions of South America, allowing the assessment of interannual variability, linear trends, and groups of ecoregions with similar behavior. The results revealed strong spatial and temporal heterogeneity in fire-weather conditions, with positive and negative anomalies alternating across different sectors of the continent. Ecoregions 17.1.6, 20.1.3, and 17.1.4 emerged as critical areas, showing the most pronounced positive trends, with the highest linear slope observed in ecoregion 17.1.6. The year 2021 was identified as the period with the highest positive anomaly in the series, whereas 2011 showed the lowest minimum value, associated with wetter meteorological conditions. The 2015–2016 biennium also stood out due to the intensification of positive anomalies, consistent with the effects of a strong El Niño event. The ecoregional approach proved suitable for interpreting the spatial distribution of meteorological fire danger, providing a historical baseline to support preventive and adaptive fire management strategies at the continental scale.

Keywords: Fire Weather Index; wildfires; ecoregions; climate anomalies; South America.

1. INTRODUÇÃO

As queimadas e os incêndios florestais constituem fenômenos de grande relevância ambiental, climática e socioeconômica, especialmente em regiões tropicais, onde sua ocorrência está associada tanto à variabilidade natural do clima quanto às transformações antrópicas da paisagem. Seus impactos ultrapassam a escala local, afetando a cobertura vegetal, a biodiversidade, a dinâmica dos ecossistemas, a composição atmosférica e a saúde humana. A queima de biomassa interfere diretamente no ciclo do carbono e libera aerossóis e gases de efeito estufa, como monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e óxidos de nitrogênio, contribuindo para alterações na atmosfera e para processos de retroalimentação climática (Page *et al.*, 2002; Mckenzie *et al.*, 2004; Fearnside *et al.*, 2009; Friedlingstein *et al.*, 2022; 2023).

Na América do Sul, essa problemática assume especial importância em razão da elevada diversidade ecológica do continente e da presença de ecossistemas estratégicos para a regulação

climática global, como a Amazônia, o Cerrado, a Caatinga, os Andes, as formações florestais subtropicais e as estepes meridionais. A dinâmica espaço-temporal dos incêndios nessa região é complexa e resulta da interação entre fatores climáticos, ambientais e socioeconômicos, incluindo eventos extremos, mudanças no uso e cobertura da terra, expansão agrícola, desmatamento, fragmentação florestal e práticas de manejo associadas ao uso do fogo (Moritz *et al.*, 2012; Barlow *et al.*, 2016; Aragão *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2022).

A Amazônia representa um dos exemplos mais sensíveis dessa interação. Embora historicamente protegida por condições atmosféricas úmidas, a floresta tem apresentado aumento da vulnerabilidade ao fogo em função da intensificação do desmatamento, da degradação florestal, da abertura de áreas agrícolas e da ocorrência de secas severas. A redução da cobertura florestal altera o microclima, abre o dossel, diminui a capacidade de manutenção da umidade no interior da mata e amplia a inflamabilidade da biomassa, favorecendo a ocorrência de incêndios de sub-bosque e a propagação de novos eventos de fogo (Cochrane; Shulze, 1998; Moutinho *et al.*, 2011; Morton *et al.*, 2013; Alencar *et al.*, 2015; Fonseca *et al.*, 2019).

Além da pressão antrópica, fenômenos climáticos de grande escala exercem papel determinante na modulação das condições favoráveis ao fogo. Eventos como o El Niño podem reduzir a precipitação, elevar a temperatura do ar e intensificar o déficit hídrico em frações importantes da América do Sul, especialmente na Amazônia e nas savanas centrais. Por outro lado, fases associadas à La Niña podem favorecer condições mais úmidas em determinadas regiões, reduzindo temporariamente o perigo meteorológico de incêndio. Essa variabilidade climática interanual reforça a necessidade de ferramentas capazes de monitorar, espacializar e interpretar as condições atmosféricas que favorecem a ignição e a propagação do fogo (Chen *et al.*, 2011; Barlow *et al.*, 2016; Cai *et al.*, 2020; Jain *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o Canadian Forest Fire Weather Index System (FWI) constitui uma ferramenta relevante para avaliar as condições meteorológicas favoráveis a incêndios. O sistema integra variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação acumulada, além de componentes relacionados à umidade dos combustíveis e ao comportamento potencial do fogo. Dessa forma, o FWI permite estimar a componente meteorológica do perigo de incêndio, funcionando como indicador das condições atmosféricas e de combustível que favorecem a ignição, a propagação e a intensidade do fogo (Van Wagner, 1987; Lawson; Armitage, 2008).

Entretanto, a análise do fogo em escala continental exige unidades espaciais capazes de representar a heterogeneidade ambiental da América do Sul. As divisões político-administrativas, embora úteis para fins de gestão territorial, nem sempre refletem a continuidade dos processos ecológicos, climáticos e biofísicos que condicionam a dinâmica dos incêndios. Nesse sentido, o uso

de ecorregiões permite organizar a análise a partir de unidades com maior coerência ambiental, considerando características como clima, relevo, solos, vegetação e biodiversidade. As ecorregiões constituem, portanto, unidades relevantes para o planejamento da conservação, para a avaliação de vulnerabilidades ambientais e para a compreensão das respostas diferenciadas dos ecossistemas às mudanças climáticas e ao uso da terra (Olson *et al.*, 2001; Olson; Dinerstein, 2002; Bailey, 2004; Dinerstein *et al.*, 2017; Smith *et al.*, 2018).

A adoção de uma abordagem ecorregional é particularmente importante na América do Sul, onde a diversidade de biomas e formações vegetais produz respostas distintas às condições meteorológicas favoráveis ao fogo. Enquanto florestas úmidas dependem, em geral, de secas severas e prolongadas para apresentar maior inflamabilidade, formações savânicas e semiáridas podem responder rapidamente ao acúmulo sazonal de combustível fino seco e à variabilidade da precipitação. Assim, a análise das anomalias do FWI por ecorregiões permite identificar padrões espaciais e temporais que dificilmente seriam capturados por recortes administrativos convencionais.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar as tendências e os padrões ecorregionais das condições meteorológicas favoráveis a incêndios na América do Sul, no período de 1981 a 2024, com base no Fire Weather Index — FWI. Para isso, são avaliadas anomalias anuais do índice, tendências lineares e agrupamentos de ecorregiões com comportamentos semelhantes, buscando identificar áreas críticas, padrões de variabilidade interanual e regimes espaciais associados ao perigo meteorológico de incêndio. Com essa abordagem, pretende-se estabelecer uma linha de base histórica capaz de subsidiar estratégias preventivas, adaptativas e transnacionais de manejo do fogo e conservação dos ecossistemas sul-americanos.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o continente sul-americano, localizado aproximadamente entre as latitudes de 13° N e 56° S e as longitudes de 82° W e 34° W, abrangendo uma ampla diversidade de ambientes tropicais, subtropicais, temperados, semiáridos, montanhosos e úmidos. Essa configuração territorial confere à América do Sul elevada complexidade climática, ecológica e geomorfológica, refletida na presença de diferentes domínios climáticos, formações vegetais e sistemas biofísicos. Entre os principais conjuntos ambientais do continente destacam-se a Amazônia, o Cerrado, a Caatinga, as formações andinas, as florestas subtropicais, as estepes patagônicas e as áreas secas costeiras do Pacífico, que apresentam distintas respostas às variações de temperatura, precipitação, umidade e disponibilidade de combustível vegetal.

A América do Sul abriga ecossistemas estratégicos para a regulação climática e para a conservação da biodiversidade, especialmente a Amazônia e o Cerrado, ambos submetidos a

crescentes pressões decorrentes das mudanças climáticas, da expansão agrícola, da degradação ambiental e das mudanças no uso e cobertura da terra. Essa heterogeneidade ambiental influencia diretamente os regimes de umidade do solo, a estrutura da vegetação, a disponibilidade de biomassa combustível e, conseqüentemente, as condições favoráveis à ignição e propagação do fogo. Dessa forma, o continente apresenta forte variabilidade espacial no perigo meteorológico de incêndios, exigindo uma abordagem capaz de representar suas diferenças ecológicas e climáticas internas.

Para representar essa diversidade, este estudo adota como unidade espacial de análise as ecorregiões de Nível III da América do Sul, conforme a classificação proposta por Griffith, Omernik e Azevedo (1998). Essa compartimentação permite superar as limitações das divisões político-administrativas tradicionais, uma vez que agrupa áreas com maior coerência biofísica, considerando atributos como clima, relevo, geologia, solos, vegetação natural e biodiversidade. As ecorregiões constituem, portanto, unidades relevantes para o planejamento ambiental, para a conservação da biodiversidade e para a avaliação de processos ecológicos que não respeitam fronteiras nacionais ou administrativas.

A adoção da escala ecorregional é particularmente importante para estudos sobre fogo, pois diferentes ambientes sul-americanos apresentam distintos mecanismos de suscetibilidade. Florestas úmidas, como aquelas associadas à Amazônia, tendem a apresentar maior inflamabilidade em condições de seca prolongada, abertura do dossel e redução da umidade interna da mata. Por outro lado, formações savânicas, semiáridas e campestres, como o Cerrado e a Caatinga, respondem de maneira mais rápida à sazonalidade climática, ao acúmulo de combustível fino seco e à variabilidade interanual da precipitação. Assim, a análise por ecorregiões permite interpretar com maior precisão as diferenças espaciais das condições meteorológicas favoráveis a incêndios.

A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo e a distribuição das ecorregiões de Nível III no continente sul-americano. Essa representação evidencia a elevada fragmentação ecológica do continente e a presença de unidades ambientais transfronteiriças, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada para a análise do Fire Weather Index — FWI. Ao utilizar as ecorregiões como base espacial, o estudo busca compreender como as anomalias e tendências do FWI se organizam em unidades ambientais relativamente homogêneas, contribuindo para identificar áreas críticas, padrões regionais de variabilidade e possíveis prioridades para estratégias preventivas e adaptativas de manejo do fogo.

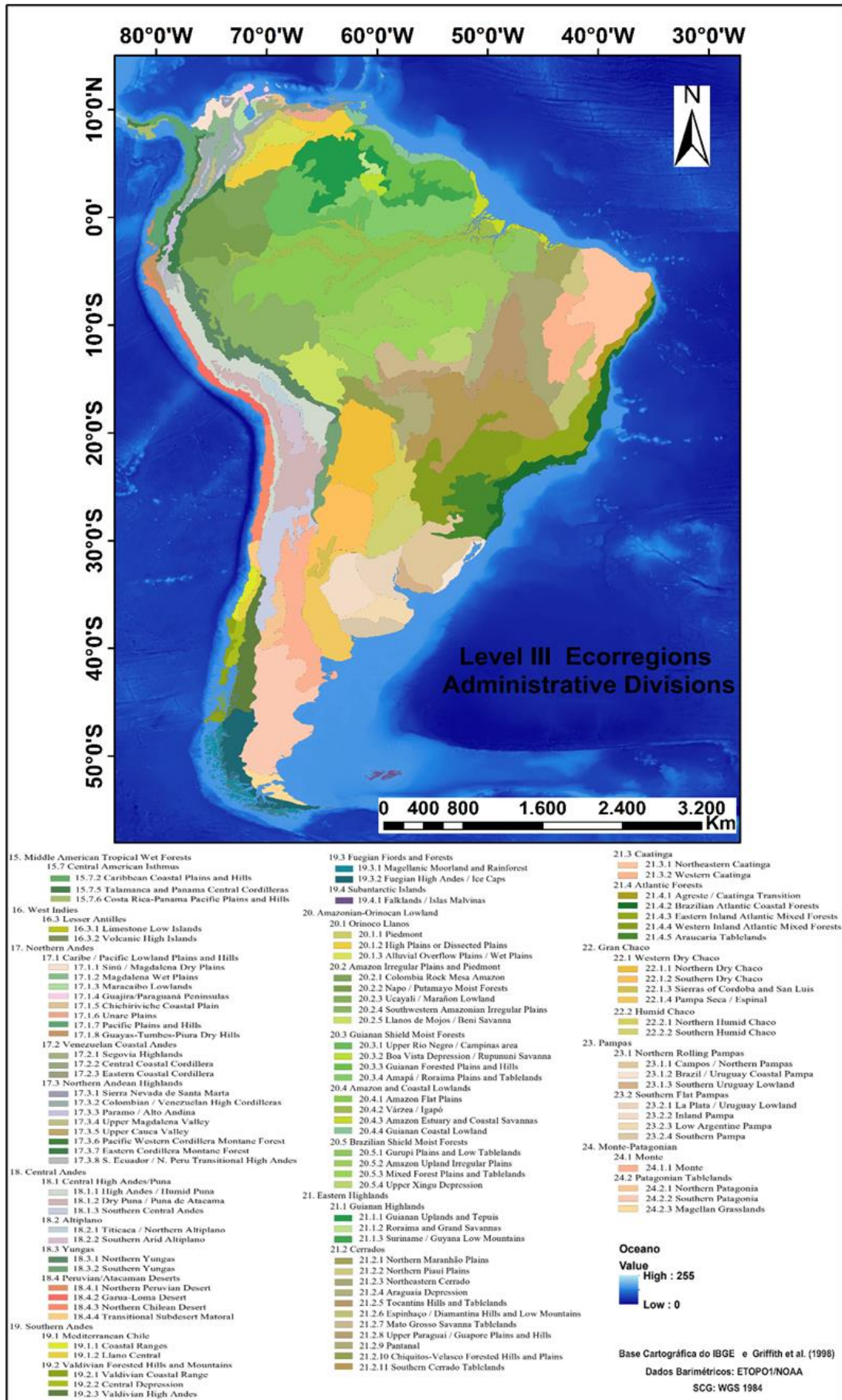


Figura 1 - Ecorregiões de Nível III na América do Sul.
Fonte: Adaptado de Griffith, Omernik e Azevedo (1998).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Base de dados do Fire Weather Index — FWI

A avaliação das condições meteorológicas favoráveis a incêndios na América do Sul foi realizada com base no Canadian Forest Fire Weather Index System — FWI, índice desenvolvido para estimar o comportamento potencial do fogo a partir de variáveis atmosféricas e da umidade dos combustíveis vegetais. O sistema FWI integra informações diárias de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação acumulada, permitindo representar as condições meteorológicas associadas à ignição, propagação e intensidade potencial do fogo.

O sistema é composto por seis componentes principais: Fine Fuel Moisture Code — FFMC, relacionado à umidade dos combustíveis finos superficiais; Duff Moisture Code — DMC, associado à umidade de camadas orgânicas intermediárias; Drought Code — DC, que representa condições de seca profunda e persistente; Initial Spread Index — ISI, que combina o FFMC e a velocidade do vento para estimar o potencial de propagação inicial; Buildup Index — BUI, que integra DMC e DC para representar o acúmulo de combustível disponível; e o Fire Weather Index — FWI, índice final obtido a partir da combinação entre ISI e BUI. Dessa forma, o FWI expressa a componente meteorológica do perigo de incêndio, sendo utilizado neste estudo como indicador das condições atmosféricas favoráveis ao fogo.

Os dados históricos do FWI foram obtidos a partir da base global disponibilizada pelo Global Wildfires Information System — GWIS, calculada operacionalmente com base nas forçantes meteorológicas da reanálise ERA5, desenvolvida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF. O produto utilizado corresponde ao arquivo fwi.nc, em formato NetCDF4, com resolução espacial aproximada de 0,28°, equivalente a cerca de 31 km, e resolução temporal diária, calculada ao meio-dia local. O período analisado compreendeu os anos de 1981 a 2024, permitindo avaliar a variabilidade interanual e as tendências de longo prazo das condições meteorológicas favoráveis a incêndios na América do Sul.

3.2. Processamento dos dados e cálculo das anomalias

O processamento inicial dos dados foi realizado a partir do arquivo NetCDF contendo a série temporal diária do FWI. As informações foram extraídas e organizadas em ambiente computacional, utilizando rotinas em Python, com suporte de bibliotecas voltadas à leitura, manipulação e análise de dados matriciais e multidimensionais. A partir da série diária, foram gerados produtos anuais e mensais do FWI, posteriormente convertidos para formatos espaciais compatíveis com sistemas de informação geográfica.

Em seguida, foram calculadas as anomalias do FWI com o objetivo de identificar desvios em relação ao comportamento médio da série histórica. As anomalias anuais foram utilizadas como principal variável de análise, pois permitem evidenciar anos com condições meteorológicas acima ou abaixo da média para ocorrência e propagação do fogo. Essa abordagem possibilita distinguir períodos de maior estresse atmosférico e hídrico, bem como anos com menor severidade meteorológica associada ao fogo.

Os produtos espaciais derivados do FWI foram convertidos para o formato GeoTIFF, permitindo sua manipulação em ambiente SIG. Posteriormente, as camadas anuais e mensais foram utilizadas para a extração de estatísticas zonais por ecorregião, possibilitando a obtenção da média anual de anomalia do FWI em cada unidade espacial analisada. Esse procedimento permitiu transformar a informação matricial contínua do índice em uma base tabular e espacial organizada por ecorregiões, adequada às análises estatísticas posteriores.

3.3. Delimitação ecorregional

A compartimentação espacial da área de estudo foi baseada nas ecorregiões de Nível III da América do Sul, conforme a classificação de Griffith, Omernik e Azevedo (1998). A adoção dessa base territorial permitiu substituir recortes político-administrativos por unidades ambientais com maior coerência ecológica e biofísica, considerando atributos como clima, relevo, solos, geologia, vegetação natural e biodiversidade.

Essa abordagem é particularmente relevante para a análise das condições meteorológicas favoráveis a incêndios, uma vez que os padrões de fogo não seguem necessariamente limites nacionais, estaduais ou municipais. Ao contrário, a inflamabilidade da paisagem, a disponibilidade de combustível vegetal, a sazonalidade climática e a resposta às anomalias de temperatura e precipitação tendem a se organizar segundo gradientes ambientais mais amplos. Assim, cada ecorregião foi utilizada como unidade de agregação espacial dos valores médios de anomalia do FWI.

Para cada ecorregião, foram extraídos os valores médios anuais do FWI e de suas anomalias, formando uma série temporal entre 1981 e 2024. Essa estrutura permitiu comparar o comportamento das diferentes unidades ecológicas ao longo do tempo, identificar ecorregiões com maior recorrência de anomalias positivas e avaliar a existência de padrões regionais de intensificação ou redução das condições meteorológicas favoráveis ao fogo.

3.4. Análise temporal e estatística

A análise estatística foi conduzida com o objetivo de avaliar a variabilidade interanual, as tendências temporais e os agrupamentos de ecorregiões com comportamento semelhante em relação às anomalias do FWI. Inicialmente, foram elaboradas séries temporais e histogramas das anomalias anuais para ecorregiões selecionadas, a fim de identificar a distribuição dos valores, os anos extremos e a predominância de anomalias positivas ou negativas ao longo da série.

Para avaliar a tendência temporal das condições meteorológicas favoráveis a incêndios, foi aplicada regressão linear simples às séries anuais de anomalia média do FWI em cada ecorregião. O coeficiente angular da reta foi utilizado como medida da direção e intensidade da tendência. Valores positivos indicam aumento progressivo das condições meteorológicas favoráveis ao fogo, enquanto valores negativos indicam redução ou arrefecimento dessas condições ao longo do período analisado. Essa etapa permitiu identificar ecorregiões com maior incremento temporal do FWI e, conseqüentemente, áreas com sinais mais evidentes de intensificação do perigo meteorológico de incêndios.

Além da análise de tendência, foram elaborados diagramas de caixa para comparar a distribuição das anomalias entre ecorregiões de maior destaque. Essa técnica permitiu avaliar a mediana, a amplitude, a dispersão e a presença de valores extremos, contribuindo para distinguir ecorregiões com comportamento mais estável daquelas com maior variabilidade interanual.

3.5. Agrupamento das ecorregiões por k-means

Com o objetivo de identificar grupos de ecorregiões com padrões semelhantes de variação temporal do FWI, foi aplicado o algoritmo de agrupamento k-means. Essa técnica permitiu segmentar as ecorregiões em conjuntos relativamente homogêneos, com base na similaridade matemática de suas séries de anomalias. A aplicação do k-means possibilitou reduzir a complexidade espacial do continente e reconhecer assinaturas ecorregionais de perigo meteorológico de incêndio.

Os agrupamentos resultantes foram interpretados considerando tanto a magnitude das anomalias quanto a sazonalidade e a variabilidade temporal do FWI. Dessa forma, foi possível distinguir ecorregiões com comportamento mais persistente, ecorregiões com maior instabilidade interanual e grupos com concentração do perigo meteorológico em determinados períodos do ano. Essa etapa complementou a análise de tendência ao revelar não apenas onde o FWI apresentou aumento ou redução, mas também quais ecorregiões compartilham padrões semelhantes de resposta às condições climáticas e ambientais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variabilidade espaço-temporal das anomalias anuais do FWI

A análise das anomalias anuais do Fire Weather Index (FWI) entre 1981 e 2024 evidencia forte variabilidade espacial e temporal das condições meteorológicas favoráveis a incêndios na América do Sul. Em termos gerais, os mapas anuais indicam que o continente não respondeu de maneira homogênea ao longo da série histórica. As anomalias positivas e negativas alternam-se entre setores setentrionais, centrais, orientais e meridionais, revelando que o perigo meteorológico de incêndio depende da combinação entre sazonalidade climática, disponibilidade de combustível vegetal, regimes de umidade e ocorrência de eventos climáticos extremos.

No primeiro decênio analisado, entre 1981 e 1990 (Figura 2), observa-se a presença recorrente de anomalias positivas em diferentes porções do continente, com destaque para áreas andinas, setores do centro-sul e porções orientais. Embora alguns anos apresentem manchas localizadas de anomalias negativas, predomina um padrão espacial marcado por valores próximos à neutralidade ou levemente positivos, indicando oscilações interanuais importantes, mas ainda sem a continuidade espacial observada em anos mais recentes.

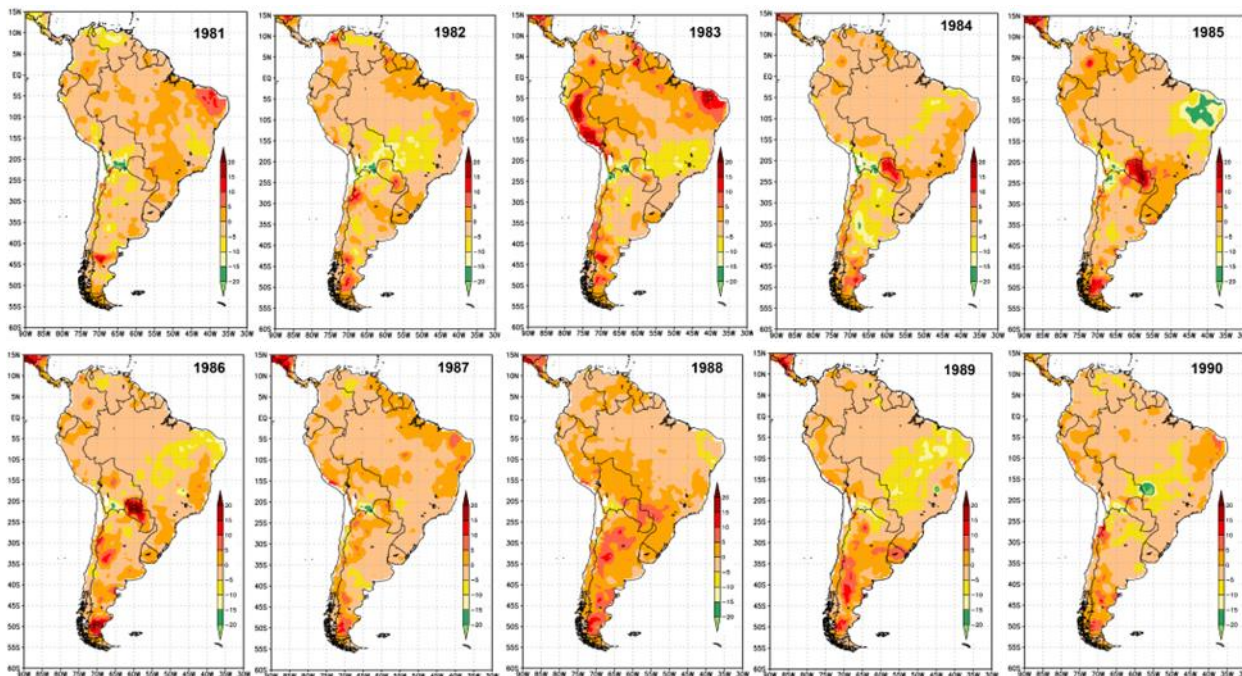


Figura 2 - Anomalias anuais do FWI na América do Sul entre 1981 e 1990.

Fonte: Elaborado a partir dos dados processados no artigo.

Entre 1991 e 2000 (Figura 3), a distribuição espacial das anomalias revela maior heterogeneidade regional. Alguns anos, como 1995, exibem intensificação das anomalias positivas no centro-sul do continente, enquanto outros anos apresentam maior presença de desvios negativos

ou próximos da neutralidade em setores da Amazônia e do Brasil central. Esse comportamento reforça a importância de interpretar o FWI como uma variável sensível à variabilidade meteorológica anual, e não como uma medida direta de ocorrência de incêndios.

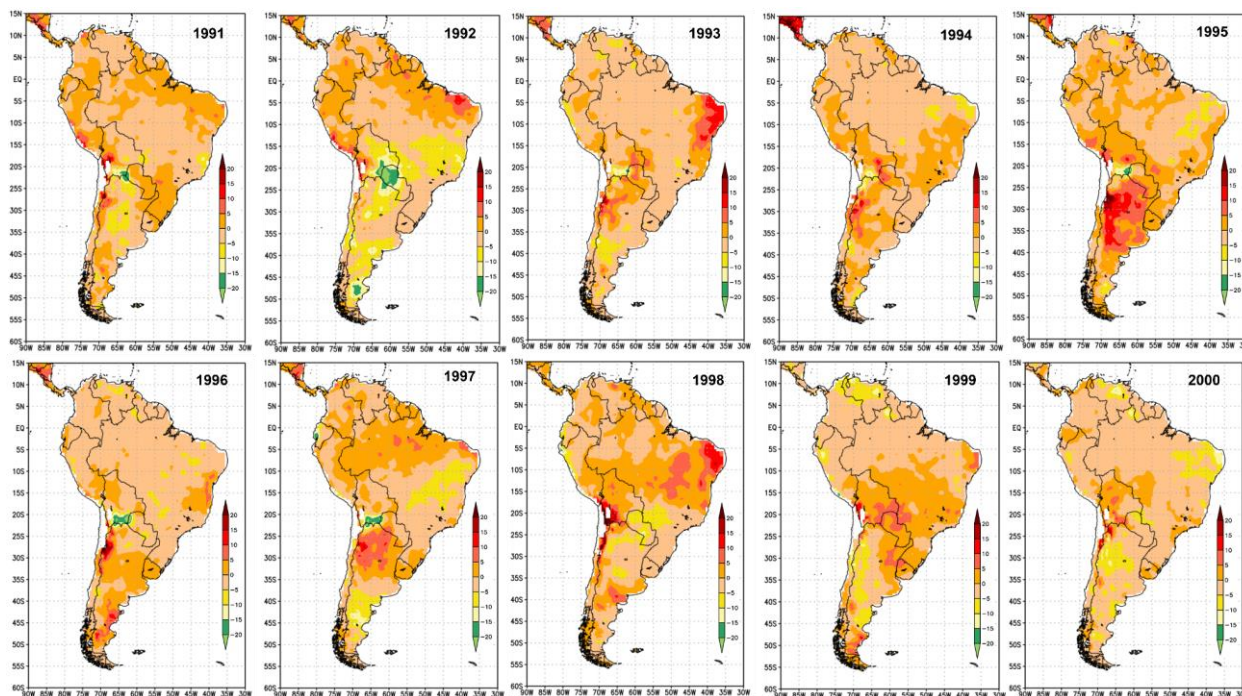


Figura 3 - Anomalias anuais do FWI na América do Sul entre 1991 e 2000.
Fonte: Elaborado a partir dos dados processados no artigo.

No período de 2001 a 2010 (Figura 4), os mapas indicam anos com intensificação expressiva das condições favoráveis ao fogo, especialmente em 2005, 2007, 2008, 2009 e 2010. O ano de 2005 se destaca pela presença de anomalias positivas em setores amazônicos e adjacentes, compatíveis com episódios de seca e estresse hídrico regional. Essa configuração é relevante porque a literatura mobilizada no próprio artigo associa secas amazônicas e redução da umidade à maior inflamabilidade da vegetação e ao aumento da suscetibilidade ao fogo em florestas tropicais.

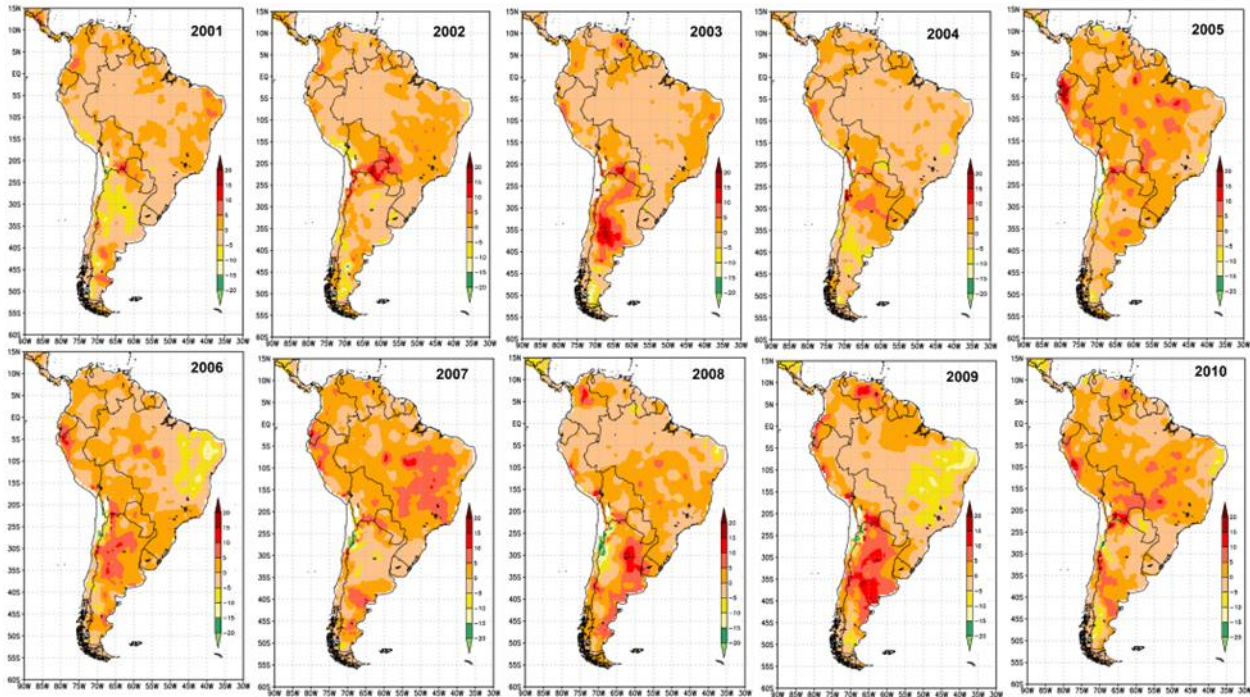


Figura 4 - Anomalias anuais do FWI na América do Sul entre 2001 e 2010.

Fonte: Elaborado a partir dos dados processados no artigo.

A década posterior apresenta sinais ainda mais claros de intensificação e expansão espacial das anomalias positivas. Entre 2011 e 2020, destacam-se os anos de 2015 e 2016, associados no texto-base aos efeitos de um El Niño de forte intensidade, e os anos de 2019 e 2020, quando as manchas de anomalia positiva se ampliam em setores do centro-sul, da Amazônia meridional, do Cerrado e de porções subtropicais. Essa sucessão de anos com desvios positivos sugere que o FWI capturou condições atmosféricas mais favoráveis à perda de umidade dos combustíveis e à propagação potencial do fogo.

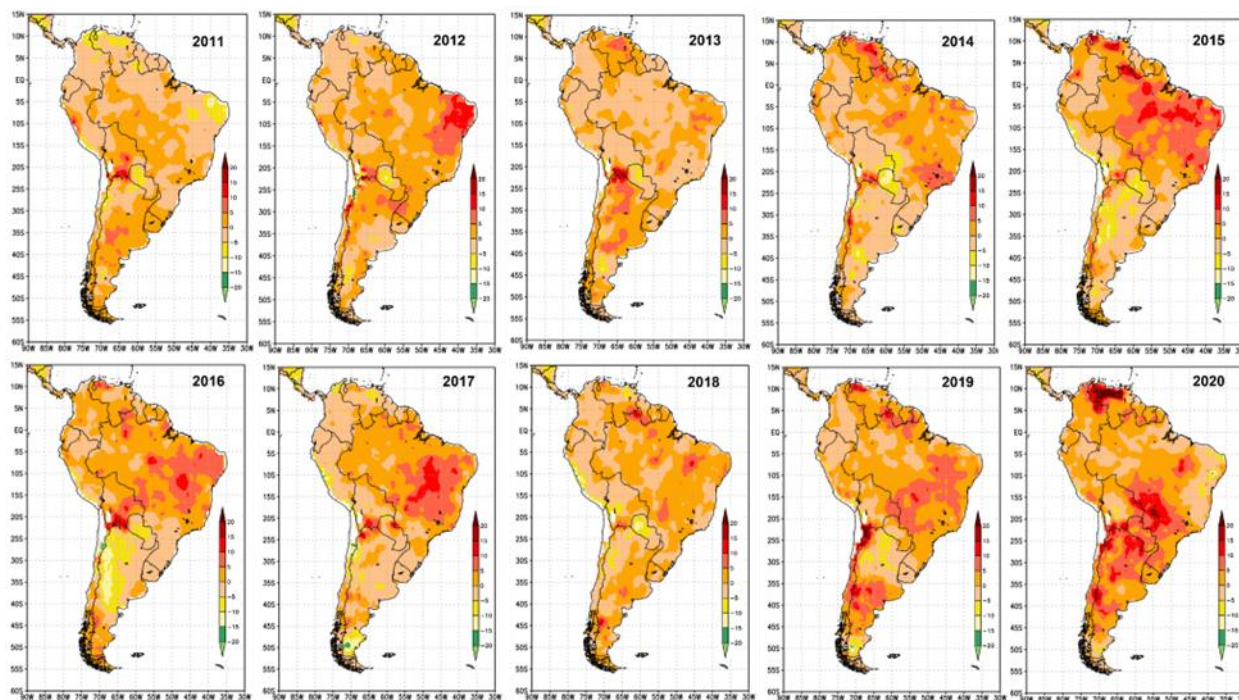


Figura 5 - Anomalias anuais do FWI na América do Sul entre 2011 e 2020.

Fonte: Elaborado a partir dos dados processados no artigo.

Entre 2021 e 2024 (Figura 5), os resultados mostram a permanência de condições críticas em áreas específicas, com destaque para 2021, identificado no artigo como o ano de maior anomalia máxima absoluta da série. O padrão espacial de 2021 revela forte sinal positivo no norte da América do Sul e em setores do centro-sul, enquanto 2022 mantém anomalias positivas relevantes em parte da faixa andina e subtropical.

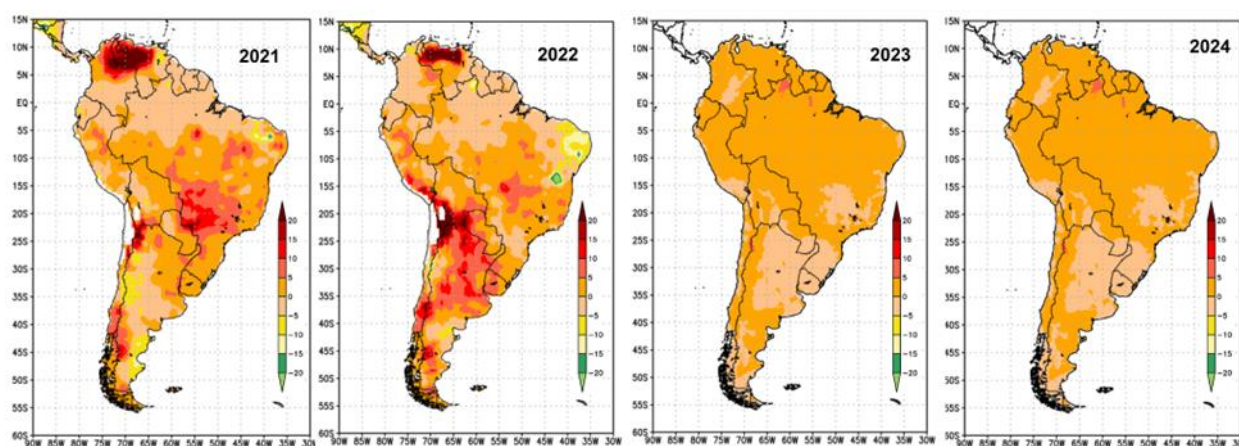


Figura 6 - Anomalias anuais do FWI na América do Sul entre 2021 e 2024.

Fonte: Elaborado a partir dos dados processados no artigo.

Nota: os anos de 2023 e 2024 exigem verificação, pois o arquivo-base indicou comportamento praticamente idêntico entre ambos.

4.2. Respostas ecorregionais e heterogeneidade do perigo meteorológico

A análise ecorregional permite refinar a leitura espacial dos mapas anuais, pois evidencia que ecorregiões próximas podem apresentar respostas contrastantes às mesmas condições atmosféricas de grande escala. Essa heterogeneidade confirma a pertinência da adoção das ecorregiões de Nível III como unidade de análise, uma vez que os processos associados ao fogo não seguem necessariamente fronteiras político-administrativas, mas sim gradientes ambientais, climáticos e biofísicos.

Na porção setentrional do domínio analisado, as ecorregiões 17.1.1 e 17.1.2 apresentaram oscilações marcantes. A ecorregião 17.1.1 alternou fases de anomalias positivas e negativas, com desvios positivos mais severos em 2020 e 2021 e anomalia negativa expressiva em 2011. Já a ecorregião 17.1.2 apresentou maior prevalência de anomalias positivas, especialmente em 2008, 2020 e 2021. Essa diferença evidencia que unidades geograficamente próximas podem responder de forma desigual às variações de precipitação, temperatura, vento e umidade relativa.

As ecorregiões de altitude e de transição temperada também revelaram padrões relevantes. Os Altos Andes Centrais/Puna Úmida (18.1.1) mantiveram anomalias positivas na maior parte dos anos avaliados, sugerindo permanência de condições meteorológicas favoráveis ao fogo em vários momentos da série. Os Andes do Sul/Altos Andes Valdivianos (19.2.3), por sua vez, indicaram uma transição temporal importante, passando de valores predominantemente negativos em parte da série para desvios positivos nos anos recentes, sobretudo em 2021 e 2022. Tal mudança sugere agravamento das condições de aridez e temperatura que controlam a umidade dos combustíveis nesses ambientes.

Nas ecorregiões amazônicas e de transição, os resultados reforçam a sensibilidade do FWI às secas e às anomalias macroclimáticas. A ecorregião 20.3.4, associada ao escudo das Guianas, sustentou valores positivos frequentes e apresentou forte desvio em 2015. A ecorregião 20.4.1, correspondente à planície amazônica central, apresentou menor amplitude, mas registrou picos positivos em 2005 e 2015, anos reconhecidos no texto-base como períodos de seca de grande relevância para a Amazônia. Já a ecorregião 20.5.2, ligada às florestas úmidas do escudo brasileiro, apresentou dominância de anomalias positivas, com 2015 e 2016 como extremos superiores.

Nas formações savânicas, semiáridas e de transição, a resposta do FWI foi igualmente expressiva. A ecorregião 21.1.1, referente ao Planalto Guianense e Tepuis, manteve tendência geral positiva, com destaque para 2014. Os Tabuleiros do Cerrado do Sul (21.2.11) apresentaram prevalência contínua de anomalias positivas, com picos em 2017, 2020 e 2021, indicando maior suscetibilidade meteorológica ao fogo em ambiente marcado por forte sazonalidade e acúmulo de combustível fino seco. A Caatinga Nordestina (21.3.1) destacou-se pela elevada amplitude interanual,

alternando anos de severidade meteorológica extrema e anos de arrefecimento, o que reforça sua forte dependência da variabilidade pluviométrica regional.

4.3. Tendências lineares e ecorregiões de maior impacto

A aplicação da regressão linear às séries anuais de anomalia média do FWI permitiu identificar ecorregiões com sinais mais intensos de aumento das condições meteorológicas favoráveis ao fogo. Entre as unidades analisadas, três ecorregiões foram destacadas como hotspots de maior impacto: 17.1.6, 20.1.3 e 17.1.4. A ecorregião 17.1.6 apresentou a maior amplitude total da série, com 31,11 unidades de FWI, e o maior coeficiente angular positivo, igual a +0,89. Esse resultado indica trajetória de intensificação acentuada das condições meteorológicas associadas à dessecação atmosférica local e à maior inflamabilidade potencial da paisagem.

A ecorregião 20.1.3 apresentou variação total de 28,15 unidades e inclinação positiva de +0,48, enquanto a ecorregião 17.1.4 registrou variação total de 26,45 unidades e coeficiente angular de +0,78. Em conjunto, esses resultados indicam que o aumento do FWI não se distribui de maneira uniforme pelo continente, mas se concentra em unidades específicas, nas quais a combinação entre sazonalidade, clima regional, cobertura vegetal e pressões antrópicas pode favorecer a persistência de condições meteorológicas críticas.

Tabela 1: Ecorregiões com maior destaque nas tendências lineares das anomalias do FWI.

Ecorregião	Amplitude total do FWI	Coefficiente angular	Interpretação principal
17.1.6	31,11	+0,89	Maior tendência positiva; sinal de intensificação acentuada do perigo meteorológico.
20.1.3	28,15	+0,48	Aumento moderado a forte; ecorregião de alta variação interanual.
17.1.4	26,45	+0,78	Tendência positiva expressiva; comportamento crítico no conjunto continental.

A interpretação desses hotspots deve considerar que o FWI expressa a componente meteorológica do perigo de incêndio, e não a ocorrência efetiva do fogo. Assim, os coeficientes positivos não indicam, por si só, aumento de incêndios observados, mas sim aumento das condições atmosféricas e de umidade dos combustíveis que favorecem ignição, propagação e intensidade potencial. Essa distinção é essencial para evitar a interpretação do índice como sinônimo de área queimada ou foco de calor.

4.4. Agrupamento ecorregional e assinaturas sazonais do FWI

O agrupamento por k-means foi utilizado para reduzir a complexidade espacial do continente e identificar conjuntos de ecorregiões com trajetórias semelhantes de anomalia do FWI. No texto-base do artigo, a segmentação resultou em doze agrupamentos, organizados de acordo com a similaridade matemática das séries temporais. Essa etapa é relevante porque desloca a análise de uma leitura individualizada das ecorregiões para uma interpretação por assinaturas climáticas e sazonais compartilhadas.

O Cluster 0 reuniu ecorregiões de alta suscetibilidade, incluindo unidades como 17.1.4, 20.1.3 e 21.2.11, o que sugere a associação entre áreas de forte estresse climático estacional, ambientes savânicos e zonas de expansão agrícola. Esse agrupamento expressa um padrão de perigo meteorológico concentrado em períodos específicos do ano, reforçando a importância da sazonalidade para a dinâmica do FWI. O Cluster 1, por outro lado, foi descrito como um conjunto de variabilidade interanual moderada e comportamento mais oscilatório, indicando ecorregiões de transição ou áreas sujeitas a alterações abruptas na janela temporal de maior perigo.

Os clusters associados às maiores concentrações de perigo no inverno austral, especialmente aqueles dominados por agosto e setembro, apontam para regimes nos quais a estação seca exerce controle direto sobre o comportamento do FWI. Já os agrupamentos com maior participação de meses do final do ano sugerem possível prolongamento das condições críticas, o que pode estar relacionado ao atraso do início da estação chuvosa em determinadas ecorregiões. Essa interpretação é particularmente importante para o manejo preventivo, pois indica que a janela de maior atenção ao fogo pode variar de forma significativa entre regiões.

4.5. Anos extremos e influência da variabilidade climática

A síntese temporal dos extremos absolutos permitiu identificar anos-chave para a interpretação da série histórica. O ano de 2021 foi reconhecido no texto-base como o ápice do perigo meteorológico de incêndio na América do Sul, atingindo anomalia máxima aproximada de +21,27 unidades do FWI médio. Esse padrão foi associado a secas severas e simultâneas que afetaram o Cerrado, a bacia do Paraná e o Pantanal, além de condições de bloqueio atmosférico e déficit hídrico prolongado.

No extremo oposto, 2011 apresentou a menor anomalia mínima da série, com aproximadamente -13,94 unidades, indicando um período de arrefecimento das condições meteorológicas favoráveis ao fogo. O texto-base associa esse comportamento à influência de La Niña, cujas teleconexões podem favorecer maior precipitação em partes setentrionais e centrais do continente, reduzindo temporariamente a inflamabilidade da biomassa vegetal.

O biênio 2015–2016 também se destaca pela elevação das anomalias do FWI. Esse período foi relacionado à atuação de um El Niño de forte intensidade, capaz de modificar as teleconexões atmosféricas, reduzir a precipitação e elevar a temperatura do ar em setores da Amazônia e das savanas centrais. A consequência física desse processo é a perda de umidade nas camadas orgânicas do solo e nos combustíveis finos superficiais, elevando a inflamabilidade do sub-bosque e favorecendo a persistência de condições críticas mesmo após o evento climático principal.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou as tendências e os padrões ecorregionais das condições meteorológicas favoráveis a incêndios na América do Sul entre 1981 e 2024, com base no Fire Weather Index — FWI. A abordagem adotada permitiu avaliar, em escala continental, a variabilidade espacial e temporal das anomalias do FWI, considerando as ecorregiões de Nível III como unidades de análise. Essa escolha metodológica mostrou-se adequada, pois permitiu ultrapassar os limites político-administrativos tradicionais e interpretar o comportamento do perigo meteorológico de incêndio a partir de unidades ambientalmente mais coerentes, associadas a diferenças de clima, relevo, vegetação, solos e dinâmica ecológica.

Os resultados evidenciaram que as condições meteorológicas favoráveis ao fogo não se distribuem de maneira homogênea no continente sul-americano. Ao contrário, há forte diferenciação espacial entre ecorregiões, refletindo a diversidade ambiental da América do Sul e a sensibilidade distinta de seus ecossistemas às variações de temperatura, umidade, precipitação e vento. Ecorregiões associadas a formações florestais, savânicas, semiáridas e de transição responderam de modo diferenciado às anomalias do FWI, reforçando a importância de análises regionalizadas para compreender a dinâmica do fogo em escala continental.

A análise temporal indicou elevada variabilidade interanual das anomalias do FWI, com anos de maior intensificação das condições meteorológicas favoráveis a incêndios associados a períodos de seca, aquecimento e redução da umidade atmosférica. Nesse contexto, eventos climáticos de grande escala, como o El Niño, aparecem como importantes moduladores das anomalias positivas do FWI, especialmente em anos marcados por estresse hídrico acentuado. Por outro lado, anos sob maior influência de condições úmidas apresentaram redução das anomalias, indicando arrefecimento temporário do perigo meteorológico de incêndio.

As análises de tendência permitiram identificar ecorregiões com sinais mais acentuados de intensificação das condições meteorológicas favoráveis ao fogo ao longo da série histórica. Entre elas, destacaram-se as ecorregiões 17.1.6, 20.1.3 e 17.1.4, que apresentaram os padrões mais expressivos de aumento das anomalias do FWI. Esses resultados indicam áreas prioritárias para o

aprofundamento das análises, sobretudo por representarem unidades com maior instabilidade temporal e maior sensibilidade às condições atmosféricas associadas à inflamabilidade da paisagem.

A aplicação do agrupamento por k-means também contribuiu para sintetizar a complexidade espacial do continente, permitindo reconhecer conjuntos de ecorregiões com comportamentos semelhantes em relação às anomalias do FWI. Essa etapa demonstrou que, além da magnitude das anomalias, a sazonalidade e a variabilidade temporal são elementos fundamentais para compreender os diferentes regimes de perigo meteorológico de incêndio na América do Sul. Assim, a combinação entre análise de anomalias, tendências lineares e agrupamento estatístico oferece uma base metodológica consistente para identificar padrões regionais e ecorregionais de maior vulnerabilidade meteorológica ao fogo.

De modo geral, os achados reforçam que o FWI constitui uma ferramenta útil para monitorar e espacializar as condições atmosféricas favoráveis à ocorrência e propagação do fogo. Contudo, é importante ressaltar que o índice representa principalmente a componente meteorológica do perigo de incêndio, não abrangendo integralmente todos os fatores que compõem o risco, como ignições antrópicas, uso e cobertura da terra, disponibilidade real de combustível, exposição da população, capacidade de resposta institucional e vulnerabilidade socioambiental. Portanto, sua interpretação deve ser feita de forma integrada a outras bases ambientais e territoriais.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se o cruzamento das anomalias do FWI com registros históricos de focos de calor, áreas queimadas, desmatamento e mudanças no uso e cobertura da terra. Essa integração permitirá avaliar a correspondência entre as condições meteorológicas favoráveis ao fogo e a ocorrência efetiva de queimadas e incêndios. Além disso, a ampliação da análise para componentes específicos do sistema FWI, como FFMC, DMC, DC, ISI e BUI, pode contribuir para compreender melhor quais dimensões da umidade do combustível e do comportamento potencial do fogo explicam as diferenças observadas entre as ecorregiões.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, A. A.; BRANDO, P. M.; ASNER, G. P.; PUTZ, F. E. Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. **Ecological Applications**, v. 25, n. 6, p. 1493-1505, 2015.

ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 536, 2018.

BAILEY, R. G. Identifying ecoregion boundaries. **Environmental Management**, v. 34, supl. 1, p. S14-S26, 2004.

- BARLOW, J.; LENNOX, G. D.; FERREIRA, J.; BERENGUER, E.; LEES, A. C.; MAC NALLY, R. et al. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, v. 535, n. 7610, p. 144-147, 2016.
- CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAUD, R. D. et al. Climate impacts of the El Niño-Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215-231, 2020.
- CHEN, Y.; RANDERSON, J. T.; MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S. et al. Forecasting fire season severity in South America using sea surface temperature anomalies. **Science**, v. 334, n. 6057, p. 787-791, 2011.
- COCHRANE, M. A.; SCHULZE, M. D. Forest fires in the Brazilian Amazon. **Conservation Biology**, v. 12, n. 5, p. 948-950, 1998.
- DINERSTEIN, E.; OLSON, D.; JOSHI, A.; VYNNE, C.; BURGESS, N. D.; WIKRAMANAYAKE, E. et al. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. **BioScience**, v. 67, n. 6, p. 534-545, 2017.
- FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R. I. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian 'arc of deforestation': the states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 9, p. 1968-1978, 2009.
- FONSECA, M. G.; ALVES, L. M.; AGUIAR, A. P. D.; ARAI, E.; ANDERSON, L. O.; ROSAN, T. M. 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.
- FRIEDLINGSTEIN, P.; JONES, M. W.; O'SULLIVAN, M.; ANDREW, R. M.; BAKKER, D. C.; HAUCK, J. et al. Global Carbon Budget 2021. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 4, p. 1917-2005, 2022. DOI: 10.5194/essd-14-1917-2022.
- FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; BAKKER, D. C. E.; HAUCK, J. et al. Global Carbon Budget 2023. **Earth System Science Data**, v. 15, p. 5301-5369, 2023. DOI: 10.5194/essd-15-5301-2023.
- GRIFFITH, G. E.; OMERNIK, J. M.; AZEVEDO, S. H. **Ecological classification of the Western Hemisphere**. Corvallis: U.S. Environmental Protection Agency, 1998. 49p.
- JAIN, P.; CASTELLANOS-ACUNA, D.; COOGAN, S. C.; ABATZOGLOU, J. T.; FLANNIGAN, M. D. Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 1, p. 63-70, 2022.
- LAWSON, B. D.; ARMITAGE, O. B. **Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System**. Edmonton: Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2008. 87p.
- MCKENZIE, D.; GEDALOF, Z. E.; PETERSON, D. L.; MOTE, P. Climatic change, wildfire, and conservation. **Conservation Biology**, v. 18, n. 4, p. 890-902, 2004.
- MORITZ, M. A.; PARI SIEN, M. A.; BATLLORI, E.; KRAWCHUK, M. A.; VAN DORN, J.; GANZ, D. J.; HAYHOE, K. Climate change and disruptions to global fire activity. **Ecosphere**, v. 3,

n. 6, p. 1-22, 2012.

MORTON, D. C.; LE PAGE, Y.; DEFRIES, R.; COLLATZ, G. J.; HURTT, G. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, p. 20120163, 2013.

MOUTINHO, P.; STELLA, O.; LIMA, A.; CHRISTOVAM, M.; ALENCAR, A.; CASTRO, I.; NEPSTAD, D. **REDD no Brasil: um enfoque amazônico: fundamentos, critérios e estruturas institucionais para um regime nacional de redução de emissões por desmatamento e degradação florestal**. Brasília: CGEE; IPAM; SAE, 2011. 152p.

OLSON, D. M.; DINERSTEIN, E. The Global 200: priority ecoregions for global conservation. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 89, p. 199-224, 2002.

OLSON, D. M.; DINERSTEIN, E.; WIKRAMANAYAKE, E. D.; BURGESS, N. D.; POWELL, G. V.; UNDERWOOD, E. C.; D'AMICO, J. A.; ITOUA, I.; STRAND, H. E.; MORRISON, J. C.; LOUCKS, C. J.; ALLNUTT, T. F.; RICHELTS, T. H.; KURA, Y.; LAMOREUX, J. F.; WETTENGEL, W. W.; HEDAO, P.; KASSEM, K. R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. **BioScience**, v. 51, n. 11, p. 933-938, 2001.

PAGE, S. E.; SIEGERT, F.; RIELEY, J. O.; BOEHM, H. D. V.; JAYA, A.; LIMIN, S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. **Nature**, v. 420, n. 6911, p. 61-65, 2002.

PEREIRA, G.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; MATAVELI, G.; OLIVEIRA, V. J.; SANTOS, P. R.; RODRIGUES, L. F.; CARDOZO, F. S. Improving the South America wildfires smoke estimates: integration of polar-orbiting and geostationary satellite fire products in the Brazilian biomass burning emission model (3BEM). **Atmospheric Environment**, v. 273, p. 118954, 2022.

SMITH, J. R.; LETTEN, A. D.; KE, P. J.; ANDERSON, C. B.; HENDERSHOT, J. N.; DHAMI, M. K.; DLOTT, G. A.; GRAINGER, T. N.; HOWARD, M. E.; MORRISON, B. M.; ROUTH, D.; SAN JUAN, P. A.; MOONEY, H. A.; MPRDECAI, E. A.; CROWTHER, T. W.; DAILY, G. C. A global test of ecoregions. **Nature Ecology & Evolution**, v. 2, n. 12, p. 1889-1896, 2018.

VAN WAGNER, C. E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa: Canadian Forest Service, 1987. **Forestry Technical Report**, n. 35. 37 p.