



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas - Departamento de Engenharia Ambiental
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



Izabela de Assis Guido

Variabilidade Climática e Ocorrência de Queimadas no Quadrilátero Ferrífero: Efeitos de El Niño e La Niña

Ouro Preto

2025

Izabela de Assis Guido

Variabilidade Climática e Ocorrência de Queimadas no Quadrilátero Ferrífero:
Efeitos de El Niño e La Niña

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Climatologia/Geoprocessamento

Orientador: Prof^ª. D.Sc. Livia Cristina Pinto Dias - UFOP

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G948v Guido, Izabela de Assis.

Variabilidade climática e ocorrência de queimadas no Quadrilátero Ferrífero [manuscrito]: efeitos de El Niño e La Niña. / Izabela de Assis Guido. - 2025.

83 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Lívia Cristina Pinto Dias.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Engenharia geotécnica. 2. Mapeamento Ambiental. 3. Quadrilátero Ferrífero- MG. 4. Queimada. 5. Incêndios. I. Dias, Lívia Cristina Pinto. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 504

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Izabela de Assis Guido

Variabilidade climática e ocorrência de queimadas no Quadrilátero Ferrífero: efeitos de El Niño e La Niña

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental

Aprovada em 27 de agosto de 2025.

Membros da banca

Profa. Dra. Lívia Cristina Pinto Dias - Orientadora (Departamento de Engenharia Ambiental - Universidade Federal de Ouro Preto)

Profa. Dra. Aline Araújo Nunes - (Departamento de Engenharia Urbana - Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Fernanda de Oliveira Costa

Lívia Cristina Pinto Dias, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/10/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Livia Cristina Pinto Dias, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/10/2025, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0989944** e o código CRC **4665FDFC**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço especialmente aos meus pais, pelo esforço incansável e dedicação em me proporcionar uma formação de qualidade ao longo de toda a minha trajetória. Minha gratidão também à minha irmã, pelo apoio constante e por ser, acima de tudo, uma amiga e companheira inseparável.

Agradeço também às minhas amigas de faculdade, por compartilharmos juntas esta jornada acadêmica e pelo apoio mútuo ao longo dos estudos. Às minhas amigas de infância e de vida, um agradecimento especial pelos momentos de apoio, risadas e também reclamações, seguiremos juntas por todos os momentos marcantes de nossas trajetórias. Ao meu amor, Samuel, agradeço por todos os momentos de apoio, pelo convívio e por estar ao meu lado ao longo dessa jornada, sendo meu porto seguro em todas as minhas decisões.

Por fim, agradeço a todos os professores que tive ao longo da minha trajetória, desde a escola até a universidade, que contribuíram de alguma maneira para a minha formação até aqui.

RESUMO

As queimadas representam uma das principais formas de degradação ambiental no Brasil, sendo intensificadas por fatores climáticos e antrópicos. No estado de Minas Gerais, a região do Quadrilátero Ferrífero se destaca como área de elevada suscetibilidade devido à combinação de vegetação fragmentada, uso intensivo do solo e pressão urbana e minerária. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a influência das fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) – El Niño e La Niña - sobre a ocorrência e distribuição espacial de queimadas em vegetação natural no Quadrilátero Ferrífero (QFe), entre os anos de 1999 e 2024. A metodologia adotada baseou-se em uma abordagem quantitativa e exploratória, envolvendo a classificação dos anos segundo as fases do ENOS com base no índice ONI (índice Oceânico de El Niño), a análise de dados climáticos anuais e sazonais (temperatura, precipitação e umidade relativa) obtidos por sensoriamento remoto, a identificação e caracterização dos focos de calor registrados pelo (Instituto de Pesquisas Espaciais) INPE e a aplicação de análise espacial multicritério para avaliar a vulnerabilidade do território às queimadas. Os resultados revelaram que, em escala anual e sazonal, os anos de El Niño concentraram maior número e intensidade média de focos de calor. A análise espacial indicou que os focos coincidiram com áreas de maior vulnerabilidade — associadas a relevo suavemente ondulado, proximidade a rodovias e uso antrópico do solo —, mas também se concentraram em zonas de vulnerabilidade média, como a porção sul do território do QFe, onde há intensa atividade minerária. Portanto, conclui-se que o ENOS atua como importante modulador climático das queimadas na região, mas sua influência é amplificada ou atenuada por fatores físicos e antrópicos locais, os quais moldam os padrões de risco e ocorrência do fogo. A análise integrada permitiu compreender a complexidade da dinâmica das queimadas no QFe e destacar a necessidade de estratégias de gestão territorial mais eficazes e sensíveis à variabilidade climática.

Palavras-chaves: Focos de Calor; Geotecnologias; Mapeamento Ambiental; Análise Multicritério; Quadrilátero Ferrífero.

ABSTRACT

Wildfires represent one of the main forms of environmental degradation in Brazil, intensified by both climatic and anthropogenic factors. In the state of Minas Gerais, the region of the *Quadrilátero Ferrífero* (Iron Quadrangle) stands out as a highly susceptible area due to the combination of fragmented vegetation, intensive land use, and urban and mining pressures. In this context, the present study aimed to analyze the influence of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phases — El Niño and La Niña — on the occurrence and spatial distribution of wildfires in natural vegetation within the *Quadrilátero Ferrífero*, between 2000 and 2024. The methodology adopted a quantitative and exploratory approach, involving the classification of years according to ENSO phases based on the ONI index, the analysis of annual and seasonal climate data (temperature, precipitation, and relative humidity) obtained through remote sensing, the identification and characterization of fire hotspots recorded by INPE, and the application of multicriteria spatial analysis to assess the territory's vulnerability to wildfires. The results revealed that, on both annual and seasonal scales, El Niño years concentrated a higher number and average intensity of fire hotspots. Spatial analysis indicated that the most intense hotspots coincided with areas of greater vulnerability — associated with gently undulating relief, proximity to roads, and anthropogenic land use — but also concentrated in areas of moderate vulnerability, such as the southern portion of the territory, where intense mining activity occurs. Therefore, it is concluded that ENSO acts as an important climatic modulator of wildfires in the region, but its influence is amplified or mitigated by local physical and human factors, which shape the patterns of fire risk and occurrence. The integrated analysis enabled a better understanding of the complexity of wildfire dynamics in the *Quadrilátero Ferrífero* and highlighted the need for more effective land management strategies that are responsive to climatic variability.

Keywords: Wildfires; Climate Extremes; Landscape Fragmentation; Environmental Vulnerability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circulação atmosférica em condições de El Niño sobre o Oceano Pacífico Equatorial	18
Figura 2 - Circulação atmosférica em condições de La Niña sobre o Oceano Pacífico Equatorial.....	19
Figura 3 - Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais	40
Figura 4 – Interface inicial do <i>Google Earth Engine</i> carregada com o <i>shapefile</i> do Quadrilátero Ferrífero	43
Figura 5 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de El Niño - recorte anual de 1999 a 2024	58
Figura 6 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de El Niño - recorte anual de 1999 a 2024	59
Figura 7 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de El Niño - recorte de abril a outubro (1999 a 2024)	68
Figura 8 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de La Niña - recorte de abril a outubro (1999 a 2024)	69
Figura 9 – Mapa de Vulnerabilidade a Ocorrência de Queimadas na região do Quadrilátero Ferrífero, 2025.....	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura média anual entre os anos de 1999 - 2024 e média por fases de ENOS.....	53
Gráfico 2 - Precipitação média anual entre os anos de 1999 - 2024 e médias por fase de ENOS	55
Gráfico 3 - Umidade relativa média anual entre os anos de 1999 - 2024 e médias por fases de ENOS.....	57
Gráfico 4 - Temperatura média no período seco (abr - out) por ano e médias por fase de ENOS.....	59
Gráfico 5 - Precipitação média no período seco (abr - out) por ano e médias por fase de ENOS	60
Gráfico 6 - Umidade relativa média no período seco (abr - set) por ano e médias por fase de ENOS.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo do arquivo gerado pela Matriz de Distância no formato xlsx, através do QGIS.....	47
Tabela 2 - Notas e pesos atribuídos as variáveis analisadas no estudo da região do Quadrilátero Ferrífero	51
Tabela 3 - Classificação do índice de Vulnerabilidade às Queimadas no Quadrilátero Ferrífero, 2025.....	52

LISTA DE SIGLAS

AHP	Processo de Hierarquia Analítica
AM	Análise Multicritério
CHIRPS	<i>Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data</i>
ENOS	El Niño Oscilação Sul
GEE	Google Earth Engine
ICOADS	Conjunto Internacional Abrangente de Dados Oceânicos e Atmosféricos
INPE	Instituto de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
NOAA	Administração Oceânica e Atmosférica Nacional
ONI	Índice Oceânico de El Niño
QFe	Quadrilátero Ferrífero
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
	1.1 Justificativa	15
2	Objetivo Geral	16
	2.1 Objetivos Específicos	16
3	Revisão Bibliográfica.....	16
	3.1 FENÔMENO ENOS: EL NIÑO E LA NIÑA.....	16
	3.1.1 Definição e mecanismo	16
	3.1.2 Diferenças e critérios de identificação das fases El Niño e La Niña	19
	3.1.3 Impactos regionais associados ao El Niño	22
	3.1.4 Impactos regionais associados à La Niña	24
	3.2 O CLIMA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	26
	3.3 CARACTERIZAÇÃO GEOMOFOLÓGICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	27
	3.4 QUEIMADAS E SEUS FATORES DETERMINANTES	29
	3.4.1 Conceito e classificação das queimadas	29
	3.4.2 Fatores meteorológicos que favorecem as queimadas	30
	3.4.3 Impactos ambientais e socioeconômicos das queimadas	31
	3.5 RELAÇÃO ENTRE O ENOS E A OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS NO BRASIL 33	
	3.6 ANÁLISE MULTICRITÉRIO: MÉTODO AHP - <i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS</i>	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38

4.1	Local de Estudo	38
4.2	Influência dos ENOS nos Padrões de Temperatura, Precipitação e Umidade Relativa do ar no Quadrilátero Ferrífero.....	40
4.3	Análise da Frequência e Intensidade das Queimadas em anos de El Niño	45
4.4	Análise da Vulnerabilidade às Queimadas no Quadrilátero Ferrífero durante o El Niño e La Niña	48
5	Resultados	53
5.1	Comparação dos Padrões Climáticos nas Fases de El Niño e La Niña	53
5.2	Variação da Ocorrência de Queimadas em Diferentes Fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no Quadrilátero Ferrífero.	64
5.3	Fatores Condicionantes da Vulnerabilidade às Queimadas durante El Niño e La Niña	70
6	Conclusão	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Durante a Primeira Revolução Industrial, ocorrida entre o final do século XVIII e o início do século XIX, a intensificação da exploração de recursos naturais como carvão mineral e ferro impulsionou o crescimento industrial e o desmatamento em larga escala (McNEILL, 2010). A substituição de áreas de vegetação natural por espaços industriais, aliada ao uso contínuo de combustíveis fósseis, elevou significativamente as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento da atmosfera terrestre (McNEILL, 2010). De acordo com o mesmo autor, como consequência, eventos extremos como secas prolongadas tornaram-se mais frequentes e intensos, criando condições propícias para a ocorrência de queimadas.

À medida que as queimadas se consolidam como um dos maiores desafios ambientais da atualidade, torna-se fundamental compreender os fenômenos climáticos que contribuem para a intensificação dessas condições. Nesse contexto, a interação entre o oceano e a atmosfera exerce papel central na variabilidade climática, afetando diretamente parâmetros como temperatura e precipitação. De acordo com Ynoue *et al.*, (2017), essa interação é responsável por fenômenos como o El Niño e a La Niña, que alteram significativamente os padrões climáticos em escala global. Tais eventos influenciam diretamente a ocorrência de secas prolongadas ou chuvas intensas, criando cenários mais propícios para a deflagração e propagação de queimadas, especialmente em regiões tropicais e subtropicais.

O El Niño e a La Niña, ambos parte do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), são desvios episódicos das temperaturas esperadas da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial, como definido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), uma importante agência que monitora as condições climáticas globais. Esses eventos podem ocorrer com uma frequência de três a sete anos, intercalados por períodos de condições normais, afetando diretamente o clima global e as condições regionais (YNOUE *et al.*, 2017).

Esses fenômenos climáticos têm consequências diretas nas atividades econômicas e ambientais de diferentes regiões. No caso do Quadrilátero Ferrífero (QFe), localizado na porção sudeste do estado de Minas Gerais, as prováveis

mudanças no regime de chuvas e as variações de temperatura podem afetar tanto a produção mineral quanto o equilíbrio ecológico da região. Além disso, as queimadas, frequentemente agravadas por condições climáticas como as de seca e baixa umidade, representam um risco crescente no Quadrilátero Ferrífero, onde a mineração de ferro e outras atividades industriais intensificam a degradação ambiental.

Com base nesse contexto, o presente estudo se propõe, a analisar a influência dos diferentes períodos do fenômeno ENOS — El Niño e La Niña — sobre a ocorrência e intensidade de queimadas no QFe. Ao correlacionar esses ciclos climáticos com dados históricos, pretende-se identificar padrões relevantes que contribuam para a compreensão da dinâmica regional das queimadas. Além disso, a relevância deste estudo é destacada pela ausência de pesquisas que abordem comparativamente esses dois estados do ENOS no contexto da área de estudo.

1.1 Justificativa

O aumento da frequência e da intensidade dos eventos climáticos extremos, como tempestades, enchentes, secas prolongadas e incêndios florestais, geralmente decorrentes de períodos mais secos, tem gerado crescente preocupação quanto aos seus impactos sociais e ambientais. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) (2021), essas ocorrências estão diretamente associadas ao avanço do aquecimento global e à intensificação da variabilidade climática.

Entre os fenômenos que mais influenciam o clima na América do Sul está o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), cujas fases — El Niño e La Niña— afetam significativamente o regime de chuvas, a temperatura e a umidade do ar em diversas regiões do Brasil. Eventos recentes, como o El Niño de 2024, reforçam a importância de compreender seus efeitos locais, dada a associação com desequilíbrios climáticos intensos.

No Quadrilátero Ferrífero, essa influência climática se soma a fatores antrópicos, como a intensa exploração minerária, que contribui para a degradação da vegetação nativa e o aumento da vulnerabilidade ao fogo. O desmatamento e a exposição do solo agravam os impactos de períodos mais secos, favorecendo o desequilíbrio ambiental.

Diante desse cenário, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de analisar comparativamente os efeitos das fases do ENOS sobre a ocorrência de queimadas na região. O foco é compreender como a variabilidade climática influencia a dinâmica do fogo no território e contribuir para a gestão de riscos relacionados às queimadas no QFe.

2 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência das diferentes fases do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (El Niño e La Niña) sobre a ocorrência e intensidade de queimadas no QFe, entre a série histórica de 1999 a 2024, considerando as condições climáticas associadas.

2.1 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- i. Classificar os anos entre 1999 a 2024 conforme as fases do ENOS (El Niño, La Niña e Neutralidade), e caracterizar os padrões climáticos médios associados durante o período analisado no Quadrilátero Ferrífero;
- ii. Analisar e comparar a frequência e intensidade das queimadas no Quadrilátero Ferrífero entre as diferentes fases do ENOS, para o período anual e período crítico para ocorrência de queimadas (entre os meses de abril a outubro);
- iii. Identificar áreas mais vulneráveis às queimadas com base na análise multicritério.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FENÔMENO ENOS: EL NIÑO E LA NIÑA

3.1.1 Definição e mecanismo

O fenômeno climático conhecido como El Niño-Oscilação Sul (ENOS) constitui um dos padrões climáticos mais significativos e influentes do planeta (NOAA, 2024). Caracteriza-se pela interação complexa e periódica entre o oceano e a atmosfera na região tropical do Oceano Pacífico, alternando entre três fases principais: El Niño (fase quente), La Niña (fase fria) e uma condição neutra. Essas fases ocorrem geralmente em ciclos irregulares de 2 a 7 anos e afetam profundamente os padrões globais de temperatura e precipitação, influenciando diretamente regimes climáticos regionais, ecossistemas e atividades humanas em diversas partes do mundo (NOAA, 2024).

O El Niño é caracterizado pelo aquecimento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial, principalmente em suas porções central e leste (YNOUE *et al.*, 2017). De acordo com o mesmo autor, esse aquecimento altera a circulação

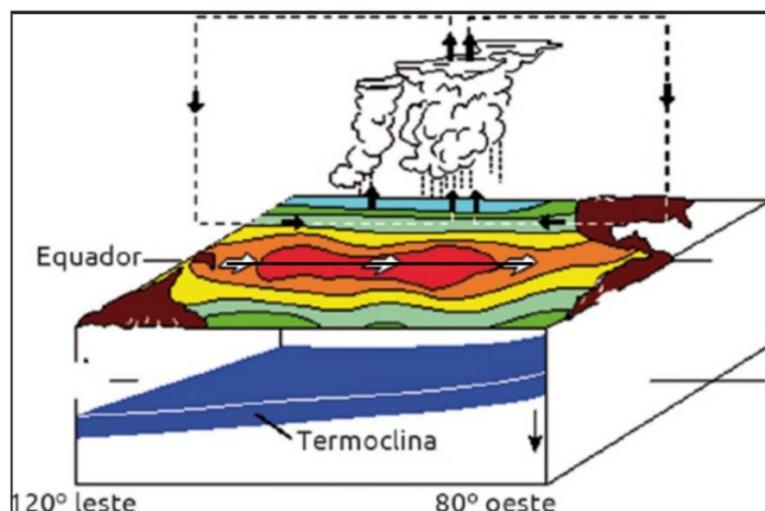
atmosférica e afeta diretamente os padrões globais de temperatura e precipitação, podendo intensificar chuvas em algumas regiões e provocar secas severas em outras.

O nome "El Niño" ("o Menino", em espanhol) foi atribuído ao fenômeno por pescadores da costa oeste da América do Sul no século XIX, devido à sua ocorrência recorrente nos meses próximos ao Natal, especialmente em dezembro (NOAA, 2024). Como muitos habitantes da região eram católicos, passaram a associá-lo simbolicamente ao nascimento de Jesus Cristo, chamando-o de "El Niño de Navidad" (NOAA, 2024). A expressão foi posteriormente incorporada ao vocabulário científico para designar o aquecimento anômalo do Pacífico Equatorial central e oriental (NOAA, 2024).

Durante episódios de El Niño, ocorre um enfraquecimento dos ventos alísios, permitindo que águas quentes se desloquem do oeste para o leste do Pacífico, gerando áreas de baixa pressão e modificando significativamente a distribuição da precipitação tropical (NOAA, 2024). Um elemento fundamental na regulação da temperatura do Pacífico Equatorial é a Corrente de Humboldt, uma das correntes oceânicas mais frias do planeta. Originária das proximidades da Antártica, essa corrente segue a costa da América do Sul em direção ao norte, influenciando a temperatura e circulação das águas oceânicas. Em condições normais, a água fria da Corrente de Humboldt permanece abaixo das águas superficiais mais aquecidas, sendo movimentada pelos ventos alísios que sopram de leste para oeste, impulsionando as águas quentes para a costa da Austrália (MONTECINO *et al.*, 2009).

Durante o El Niño, o enfraquecimento dos ventos alísios reduz a eficiência da Corrente de Humboldt em resfriar as águas do Pacífico. Como ilustrado na Figura 1, esse enfraquecimento provoca o acúmulo de águas quentes na porção leste do Pacífico, afundando a termoclina e impedindo a ressurgência de águas frias profundas. Essa elevação anômala da temperatura superficial do mar intensifica a evaporação, diminui a pressão atmosférica e favorece a formação de nuvens convectivas e chuvas excessivas em áreas normalmente áridas (YNOUE *et al.*, 2017).

Figura 1 - Circulação atmosférica em condições de El Niño sobre o Oceano Pacífico Equatorial

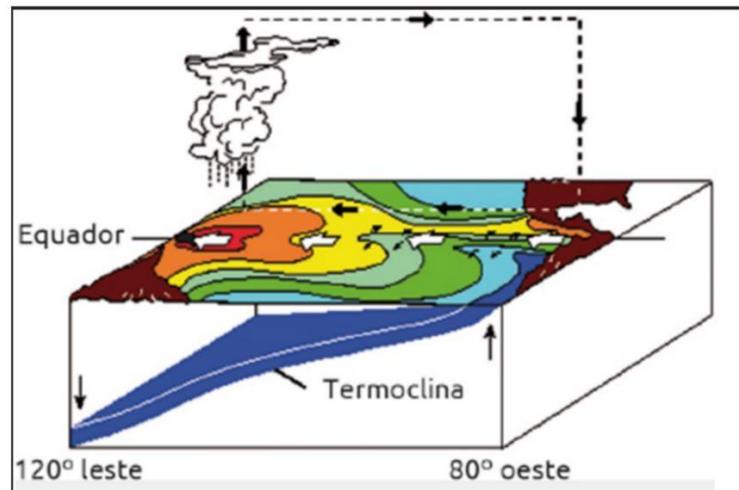


Fonte: YNOUE *et al.*, 2017.

Em anos marcados pela La Niña, ocorre o fenômeno inverso, com o aumento na intensidade dos ventos alísios. A intensificação desses ventos reforça a ação resfriadora da Corrente de Humboldt, promovendo um resfriamento anômalo das águas superficiais e subsuperficiais na porção leste do Pacífico e elevando a termoclina nessa região. Ao mesmo tempo, as águas mais quentes se concentram na região oeste do Pacífico, onde ocorre maior convecção e precipitação (conforme Figura 2). Esses processos são semelhantes às condições normais, porém com maior intensidade (YNOUE *et al.*, 2017).

O nome "La Niña" ("a Menina", em espanhol) foi adotado posteriormente, representando o fenômeno oposto ao El Niño. Inicialmente, La Niña era denominada informalmente como "anti-El Niño" ou "El Viejo", até sua terminologia atual se consolidar entre a comunidade científica (NOAA, 2024).

Figura 2 – Circulação atmosférica em condições de La Niña sobre o Oceano Pacífico Equatorial



Fonte: YNOUE *et al.*, 2017.

Em resumo, o ENOS representa um fenômeno climático complexo e de importância global, cuja dinâmica é fundamentada pela interação entre processos oceânicos e atmosféricos no Pacífico Equatorial. As fases extremas desse fenômeno, El Niño e La Niña, embora opostas, são governadas por mecanismos semelhantes que envolvem alterações na intensidade dos ventos alísios, mudanças na circulação oceânica e variações na temperatura superficial das águas (NOAA, 2024).

3.1.2 Diferenças e critérios de identificação das fases El Niño e La Niña

O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é o principal modo de variabilidade climática interanual dos trópicos e exerce influência global ao integrar padrões de temperatura da superfície do mar (TSM), circulação atmosférica e regimes de precipitação em diversas partes do planeta (YNOUE *et al.*, 2017).

A relevância operacional do ENOS decorre, entre outros fatores, de sua previsibilidade sazonal: sinais oceânico-atmosféricos detectados no Pacífico tropical podem antecipar mudanças de padrão climático meses antes de seus impactos máximos, oferecendo uma janela de oportunidade para planejamento e gestão de riscos em setores sensíveis ao clima (BERLATO; CUNHA; FONTANA, 2024).

A literatura aplicada enfatiza que informações sobre o ENOS devem ser incorporadas de forma proativa em processos decisórios ligados a agricultura, defesa civil e outras atividades vulneráveis, ainda que persistam incertezas quanto à magnitude dos efeitos regionais em cada evento (BERLATO; CUNHA; FONTANA, 2024).

Embora o ENOS represente um único fenômeno integrando oceano-atmosfera, ele alterna entre três estados: El Niño (fase quente), La Niña (fase fria) e condição neutra. Essas fases são identificadas principalmente por anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico Equatorial Central-leste e por respostas consistentes da atmosfera tropical. Episódios de El Niño correspondem a TSM acima da média nessa faixa; já episódios de La Niña refletem TSM abaixo da média. A caracterização operacional dessas fases é importante para o monitoramento climático e emissão de alertas, pois cada uma tende a associar-se a padrões distintos de circulação e precipitação em escala global (NWS/NOAA, 2016; UCAR, 2019).

Para comparar eventos ao longo do tempo, o *Climate Prediction Center* (CPC/NOAA) adota o *Oceanic Niño Index* (ONI) como critério padrão. O ONI corresponde à média móvel de 3 meses (trimestre móvel) das anomalias de TSM calculadas para a região Niño 3.4 (5°N-5°S; 120°-170°W), derivadas do conjunto de dados ERSST (atualmente v5 no histórico operacional). Pela convenção do CPC, um episódio quente (El Niño) é identificado quando a anomalia atinge $\geq +0,5$ °C e um episódio frio (La Niña) quando $\leq -0,5$ °C, mantidos por pelo menos cinco trimestres móveis sobrepostos consecutivos (por exemplo: DJF, JFM, FMA, MAM, AMJ). Vale lembrar que o ONI representa o componente oceânico do ENOS; a confirmação de um evento plenamente acoplado também considera sinal atmosférico. (UCAR, 2022; NOAA, 2025).

O cálculo das anomalias de TSM usadas no ONI depende da climatologia de referência. Para minimizar distorções associadas ao aquecimento de longo prazo, a NOAA emprega múltiplos períodos-base de 30 anos “centrados”, atualizados a cada 5 anos, na reanálise histórica; em tempo real utiliza-se o período-base operacional vigente (ex.: 1991-2020), o que torna os valores do índice mais comparáveis entre diferentes épocas (NOAA, 2025).

Como o ONI se baseia em dados de TSM globalmente analisados, é importante compreender a fonte desses dados: o *Extended Reconstructed Sea Surface*

Temperature (ERSST), mantido pela NOAA/NCEI. O ERSST fornece uma análise global mensal de TSM em grade de $\sim 2^\circ \times 2^\circ$ desde meados do século XIX (início histórico em 1854 nas versões clássicas), reconstruída estatisticamente para preencher lacunas espaciais e temporais a partir de observações *in situ*. As versões mais recentes incorporam dados atualizados do conjunto internacional de observações (ICOADS - *International Comprehensive Ocean–Atmosphere Data Set*), perfis de flutuadores Argo, informações de gelo marinho e rotinas aprimoradas de controle de qualidade e interpolação; também aplicam ajustes de viés entre medidas de navios e boias. Dessa forma, é possível coletar dados e utilizar amplamente em estudos climáticos de longo prazo, além de servir como base para o cálculo das anomalias de TSM empregadas no ONI. (NOAA/NCEI, 2025; UCAR, 2019; CPC/NOAA, 2025).

Grande parte das observações primárias que alimentam o *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature* (ERSST) provém do ICOADS, o mais amplo acervo global de dados marinhos de superfície disponível. O ICOADS reúne registros de navios, boias fixas e derivantes, plataformas costeiras e outros sistemas de observação, com documentação contínua e qualidade variável ao longo de séculos de medições. O banco oferece dados desde 1662, com produtos mensais resumidos em grades de $2^\circ \times 2^\circ$ a partir de 1800 e resolução $1^\circ \times 1^\circ$ desde 1960, fornecendo a base histórica para reconstruções de TSM como o ERSST e, por consequência, para índices associados ao monitoramento do ENOS. (NOAA/ICOADS, 2024; NOAA/NCEI, 2025).

O monitoramento do ENOS utiliza várias regiões Niño ao longo do Pacífico equatorial para captar diferenças espaciais na evolução térmica dos eventos. A região Niño 1+2 ($0-10^\circ\text{S}$; $90^\circ\text{W}-80^\circ\text{W}$) cobre a faixa costeira próxima à América do Sul onde o fenômeno foi inicialmente observado; Niño 3 ($5^\circ\text{N}-5^\circ\text{S}$; $150^\circ\text{W}-90^\circ\text{W}$) historicamente foi a principal área de monitoramento; Niño 4 ($5^\circ\text{N}-5^\circ\text{S}$; $160^\circ\text{E}-150^\circ\text{W}$) representa o Pacífico central; e Niño 3.4 ($5^\circ\text{N}-5^\circ\text{S}$; $170^\circ\text{W}-120^\circ\text{W}$) sobrepõe parte das regiões 3 e 4, captando a variabilidade de grande escala e servindo de base tanto para o índice Niño 3.4 quanto para o ONI. A literatura técnica também menciona o *Trans-Niño Index* (TNI), que relaciona os sinais entre as porções leste (Niño 1+2) e

central (Niño 4), útil para caracterizar a diversidade de eventos, como os chamados *El Niño Modoki*. (UCAR, 2022; NOAA, 2025).

Em suma, El Niño e La Niña são definidos pela persistência e direção das anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico equatorial. O índice ONI (Oceanic Niño Index) utiliza a média móvel de três meses das anomalias de TSM na região Niño 3.4: valores iguais ou superiores a $+0,5$ °C caracterizam El Niño, enquanto valores iguais ou inferiores a $-0,5$ °C indicam La Niña, desde que mantidos por cinco trimestres móveis consecutivos. A região Niño 3.4 é amplamente adotada como referência internacional por representar a variabilidade climática de grande escala.

3.1.3 Impactos regionais associados ao El Niño

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), El Niño provoca um aumento da probabilidade de déficit de precipitação na faixa norte das regiões Norte e Nordeste do Brasil, enquanto intensifica os volumes de chuva no Sul, devido a mudanças na circulação atmosférica que redistribuem calor e umidade pela América do Sul. O Sudeste é considerada uma região de transição e os efeitos podem ser mais ou menos significativos.

Berlato, Cunha e Fontana (2024) confirmam esse padrão: mesmo que intensidade e alcance variem entre eventos, é recorrente o aumento de chuva no Sul e Sudeste, e maior irregularidade pluviométrica no Centro-Oeste, Norte e Nordeste, especialmente quando o Pacífico e Atlântico Tropical apresentam anomalias simultâneas. Os autores, destacam também o caráter aperiódico do ENOS (ciclos de aproximadamente 2 a 7 anos) e a importância da vigilância climática para setores vulneráveis como a agricultura e a defesa civil.

A literatura de teleconexões atmosféricas ajuda a entender como esses contrastes se estabelecem. Estudos de síntese sobre o Sistema de Monção da América do Sul mostram que o transporte de umidade pelos fluxos de baixos níveis canalizados ao longo dos Andes (*South American Low-Level Jet* – SALLJ) e a organização da convecção sazonal na Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS/SACZ) são componentes-chave da variabilidade de precipitação sobre o centro-sul da América do Sul. Alterações forçadas por anomalias de Temperatura da Superfície do Mar

(TSM) associadas ao ENOS podem modificar a posição e a persistência desses sistemas, deslocando faixas de chuva para norte ou sul e alterando a intensidade dos episódios convectivos de verão (NOGUÉS-PAEGLE *et al.*, 2002).

Nesse contexto, Marengo *et al.*, (2004) mostraram que a intensificação do SALLJ transporta umidade da Amazônia para o Sul/ Sudeste, reforçando a ZCAS e provocando eventos de chuva persistente.

O episódio de El Niño de 1997/98 ilustra bem esses mecanismos. Oliveira e Satyamurty (1998) relataram anomalias de TSM > 3 °C na região Niño 3 e constataram impactos marcantes no Brasil: excesso de chuva no Sul, seca no semiárido nordestino e temperaturas de inverno mais elevadas no Sudeste.

Quando olhamos especificamente para Minas Gerais, evidências observacionais de séries históricas ajudam a mostrar por que o estado responde de forma heterogênea a eventos de El Niño (MINUZZI *et al.*, 2005).

Um estudo abrangente, conduzido por MINUZZI *et al.*, 2005 com dados de precipitação diária de 123 estações mineiras identificou que anos de El Niño estiveram associados a chuvas abaixo da média histórica no nordeste do estado e a chuvas acima da média no sudoeste mineiro. As estiagens no norte/nordeste frequentemente ultrapassaram 15 dias contínuos, enquanto no sudoeste os excedentes pluviométricos se correlacionaram melhor com veranicos curtos (período breve de tempo seco e quente que ocorre durante a estação chuvosa) (MINUZZI *et al.*, 2005).

Ainda segundo Minuzzi *et al.*, (2005), a resposta do Sudeste brasileiro ao ENOS é menos linear que a observada no Cone Sul porque a região encontra-se em faixa de transição, influenciada tanto pelo Pacífico quanto pelas condições do Atlântico adjacente; assim, o sinal de anomalia pode alternar entre eventos, deslocando-se latitudinalmente e dificultando a previsibilidade espacial. Essa característica de transição foi destacada pelos autores com base em trabalhos anteriores (Grimm & Ferraz, 1998) e reforça a necessidade de análises regionais detalhadas quando se tenta aplicar cenários de El Niño a sub-regiões mineiras.

Informações operacionais mais recentes do Governo de Minas (Agência Minas) apontam que, durante a instalação do El Niño de 2023, o principal efeito esperado para o estado no trimestre seco (inverno/começo da primavera) foi o aquecimento acima da média histórica, enquanto a previsibilidade para a chuva era baixa. O boletim destacou a necessidade de vigilância integrada entre órgãos ambientais e defesa civil justamente pelo risco combinado de altas temperaturas, baixa umidade e incêndios florestais no período seco (AGÊNCIA MINAS, 2023).

Além disso, o prolongamento do tempo seco e o aquecimento associado ao El Niño elevam riscos ambientais no inverno mineiro. Reportagens com dados da Defesa Civil e do Corpo de Bombeiros indicam que, em anos de forte estiagem e calor (como 2024, em transição pós-El Niño), o número de incêndios em vegetação aumenta substancialmente; especialistas destacam que temperaturas altas e baixa umidade aceleram a propagação do fogo, mesmo quando a ignição é predominantemente antrópica. (ESTADO DE MINAS, 2024).

Portanto, os eventos de El Niño tendem a provocar diferentes cenários climáticos no Brasil, com chuvas acima da média no Sul e maior irregularidade ou seca no Norte, Nordeste e parte do Sudeste. Em Minas Gerais, esses efeitos se manifestam de forma heterogênea, com déficits no nordeste e veranicos no sudoeste do estado. Quando somados ao calor e à antecipação do período seco, esses fatores elevam o risco de queimadas, especialmente no inverno e início da primavera.

3.1.4 Impactos regionais associados à La Niña

A fase fria do ENOS, La Niña, corresponde ao resfriamento anômalo das águas superficiais no Pacífico Equatorial central. As temperaturas superficiais podem cair de valores habituais próximos de 25 °C para cerca de 22-23 °C durante episódios bem definidos, embora a intensidade varie bastante de evento para evento. De acordo com análises históricas, o grau de resfriamento no Pacífico não é uniforme entre episódios — por exemplo, o evento de 1988/89 foi consideravelmente mais intenso que o de 1995/96 — e isso ajuda a explicar por que os impactos atmosféricos associados à La Niña são, em geral, menos consistentes espacialmente do que aqueles observados em grandes El Niños. (MARENGO; OLIVEIRA, 1998).

Em termos de teleconexões sobre a América do Sul, estudos compostos de vários eventos mostram que, após o estabelecimento da La Niña, a estação chuvosa amazônica tende a apresentar excedentes pluviométricos, enquanto anomalias negativas de precipitação costumam emergir numa faixa que se estende de noroeste para sudeste, abrangendo partes das Regiões Sudeste, Centro-Oeste e setores do sul/oeste do Nordeste nos meses de janeiro e fevereiro. (MARENGO; OLIVEIRA, 1998).

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia, anos de La Niña frequentemente registram redução na quantidade e na frequência das chuvas na Região Sul, com possibilidade de períodos prolongados sem precipitação; ao mesmo tempo, as frentes frias tendem a deslocar-se mais rapidamente pelo leste do Sul em direção ao Sudeste, podendo levar umidade adicional até o litoral nordestino, dependendo também do estado térmico do Atlântico Tropical (INMET, 2025).

A variabilidade intra-evento também é marcante. Em um exemplo citado por Marengo e Oliveira (1998), durante a forte La Niña de 1988/89 houve um mês de seca acentuada na primavera (setembro-dezembro) no Sul do Brasil, mas os demais meses ficaram próximos ou ligeiramente acima da média; já na La Niña mais fraca de 1995/96, o período chuvoso de setembro a dezembro ficou abaixo da climatologia em todos os meses (MARENGO; OLIVEIRA, 1998).

Ainda conforme Marengo e Oliveira (1998), esses contrastes mostram por que a simples identificação da fase fria no Pacífico não basta: a resposta regional depende da intensidade do acoplamento oceano-atmosfera e da interação com outros padrões, especialmente as anomalias de temperatura de superfície do mar no Atlântico Tropical, que podem atenuar ou reforçar os sinais pluviométricos associados ao ENOS.

Conforme destacado pelo INMET, durante episódios de La Niña a circulação favorece, em alguns anos, a passagem mais frequente de frentes frias pelo Sudeste, o que pode resultar em períodos com chuvas mais distribuídas, ainda que nem sempre volumosas. Em Minas Gerais, o meteorologista do INMET, Lizandro Gemiacki, destacou três aspectos recorrentes quando a La Niña atua: (i) possibilidade de

antecipação do início da estação chuvosa; (ii) ocorrência de episódios de chuva fraca e mais persistente em setores a leste e nordeste do estado (Vales do Jequitinhonha, Mucuri e Rio Doce), que ajudam a reduzir focos de incêndio; e (iii) temperaturas um pouco menores durante períodos de atuação frontal, embora o sinal possa ser parcialmente mascarado pelo forte aquecimento típico do verão. (ESTADO DE MINAS, 2024).

Localizado no centro-sul de Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero apresenta um relevo montanhoso marcado por picos elevados, cadeias em *hogback* (abaulamento), platôs e vales encaixados, além de cânions profundamente entalhados, resultantes da forte interação entre estrutura geológica e erosão diferencial (DORR, 1969; KING, 1956). A região também se encontra em uma zona de transição climática entre o domínio tropical úmido, caracterizado por verões chuvosos, e o tropical de altitude, sujeito a invernos secos e temperaturas amenas (NIMER, 1989; ALVARES *et al.*, 2013).

Portanto, essa configuração torna o território suscetível a respostas variadas durante episódios de La Niña. Dependendo da estação e da intensidade do fenômeno, podem ocorrer tanto o adiantamento e a melhor distribuição das chuvas de primavera — com alívio do estresse hídrico e redução do risco de queimadas — quanto a manutenção de períodos secos, sobretudo quando outros sistemas atmosféricos não favorecem a entrada de umidade (INMET, 2025).

3.2 O CLIMA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Segundo Silva (2007), o clima predominante no Quadrilátero Ferrífero é do tipo Cwa (clima temperado úmido) conforme a classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos secos. Esse tipo climático é comum em áreas de altitude, como ocorre em grande parte do centro-sul de Minas Gerais.

De acordo com a Embrapa (2025), o clima tipo Cwa apresenta temperaturas médias inferiores a 18 °C nos meses frios e superiores a 22 °C durante o verão. A média anual de temperatura na região varia entre 19 °C e 22 °C, dependendo da altitude e da localização (EMBRAPA, 2025). As chuvas concentram-se entre os meses de novembro a março, enquanto o período entre junho e agosto registra baixos índices pluviométricos, o que contribui para a elevação do risco de queimadas (EMBRAPA,

2025). Conforme a mesma instituição, esse clima predomina nas regiões serranas do centro e sul de Minas Gerais.

No âmbito regional, as expressivas variações de altitude do Quadrilátero Ferrífero favorecem a formação de microclimas locais, nos quais ocorrem diferenças significativas de temperatura e umidade em curtas distâncias. Em áreas mais elevadas, é comum a presença de forte radiação solar, ventos constantes, ampla amplitude térmica diária e alta incidência de tempestades elétricas, conforme descrito por Dutra *et al.*, (2002).

Essas características tornam o clima da região altamente sensível à variabilidade interanual, especialmente em anos marcados por fenômenos como o El Niño e La Niña, que podem acentuar o período seco ou alterar o regime de chuvas, impactando diretamente a vegetação nativa e a frequência das queimadas.

3.3 CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero (QFe) é marcada por um relevo acidentado que exerceu papel fundamental na ocupação e fixação social na porção central de Minas Gerais (LANA, 2020). Desde os séculos XVIII e XIX, mapas já destacavam o conjunto de serras, vales e picos que norteariam as rotas comerciais que formariam os ramais da Estrada Real e o percurso de naturalistas (LANA, 2020). A topografia imponente da região condicionou o processo de ocupação e influenciou traços culturais da população local (LANA, 2020).

O modelado do relevo é uma expressão direta e fiel de sua complexa estrutura geológica, onde a resistência diferencial das rochas à erosão é o principal agente escultor da paisagem (LANA, 2020). As grandes cristas e os maciços serranos, que atingem altitudes expressivas, são invariavelmente sustentados pelas rochas mais competentes do Supergrupo Minas, como os quartzitos e as formações ferríferas bandadas (itabiritos) (DORR, 1969). Essas unidades litológicas formam as linhas de cumeada e os paredões que definem a compartimentação do relevo, como a Serra do Curral, a Serra da Moeda e a Serra do Caraça, feições orográficas proeminentes que

circundam a região. Picos notáveis, como o Pico do Itabirito, são feições marcantes sustentadas por essas rochas resistentes (LANA, 2020).

Em contraste, as rochas menos resistentes, como os filitos e xistos do Supergrupo Rio das Velhas, foram intensamente erodidas, dando origem às depressões, aos vales amplos e aos corredores topográficos que se encaixam entre as serras (DORR, 1969). O Vale do Rio das Velhas, por exemplo, representa uma extensa depressão esculpida sobre essas rochas mais friáveis. Essa forte correlação entre geologia e forma do terreno faz com que a estrutura geológica, com suas dobras e falhas, seja claramente visível na própria configuração da paisagem (LANA, 2020).

A evolução do relevo está inserida em um contexto mais amplo de superfícies de aplainamento, como proposto por Lester Charles King (1956). Essas paleossuperfícies, hoje suspensas em diferentes níveis altimétricos na forma de platôs ou topos de serras, são remanescentes de extensas planícies erodidas em fases de estabilidade tectônica e posteriormente soergidas e dissecadas pela erosão fluvial (LANA, 2020). A presença desses patamares em altitudes elevadas, como observado em porções da Serra da Moeda, atesta a longa história de soergimento e rejuvenescimento do relevo que moldou a fisiografia atual (LANA, 2020).

A interação entre relevo e clima reforça ainda mais a singularidade fisiográfica do Quadrilátero Ferrífero, uma vez que as altitudes elevadas e as cristas serranas atuam como barreiras orográficas que influenciam diretamente a dinâmica atmosférica regional (WANDERLEY *et al.*, 2019). Ainda de acordo com os autores, áreas situadas a barlavento tendem a apresentar maior pluviosidade em razão da ascensão forçada de massas de ar úmidas, enquanto vertentes a sotavento estão sujeitas a processos de subsidência, maior aridez relativa e temperaturas mais elevadas. Do mesmo modo, a orientação das vertentes, a declividade e a altitude definem padrões diferenciados de disponibilidade hídrica, o que condiciona diretamente a distribuição das paisagens naturais (WANDERLEY *et al.*, 2019).

Assim, no contexto do Quadrilátero Ferrífero, a combinação entre litologia resistente, compartimentação do relevo e condicionantes climáticos contribui para a manutenção de ecossistemas contrastantes em curtas distâncias, evidenciando a íntima relação entre geologia, relevo e dinâmica atmosférica.

3.4 QUEIMADAS E SEUS FATORES DETERMINANTES

3.4.1 Conceito e classificação das queimadas

As queimadas consistem no uso do fogo em áreas de vegetação natural ou agrícola, podendo ocorrer de forma controlada ou descontrolada. Frequentemente, são realizadas de modo intencional, especialmente para fins como preparo do solo, renovação de pastagens ou manejo de áreas agrícolas (INPE, 2024). Contudo, também podem acontecer acidentalmente, quando o fogo se espalha além dos limites planejados, tornando-se um sério risco ambiental (INPE, 2024). Embora o uso do fogo na agricultura seja uma prática ancestral no Brasil, seu manejo inadequado pode desencadear incêndios florestais que provocam impactos ambientais graves, como perda da biodiversidade, degradação do solo e emissão significativa de gases de efeito estufa (IBAMA, 2016; INPE, 2024).

Segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), é essencial diferenciar os conceitos de queima controlada e incêndio florestal. O incêndio florestal caracteriza-se pelo fogo fora de controle, que se propaga por diversos tipos de vegetação, podendo ser causado por ações humanas — intencionais ou acidentais — ou por fenômenos naturais, como descargas atmosféricas (raios) (IBAMA, 2025).

Além dessa distinção, as queimadas podem ser classificadas conforme seus objetivos, técnicas utilizadas e contexto de aplicação. De acordo com a análise apresentada pela Fundação Centro Estadual de Estatística, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro (CEPERJ, 2016), quatro categorias principais se destacam:

- **Queima controlada:** uso planejado e monitorado do fogo em atividades agropecuárias, florestais ou científicas, realizado em áreas delimitadas. Conforme o IBAMA (2016), trata-se do emprego do fogo como ferramenta de manejo, desde que autorizado pelos órgãos ambientais e executado sob condições específicas;
- **Queima prescrita:** aplicação técnica e controlada do fogo para finalidades ambientais, de pesquisa ou conservação, baseada em planos de manejo

previamente estabelecidos. Essa modalidade está descrita no Projeto de Lei nº 11.276/2018, que institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo, regulando seu uso em áreas definidas e sob critérios técnicos;

- **Queima de amontoados:** queima de resíduos vegetais previamente reunidos, oriundos de atividades agrícolas ou florestais, como podas de vinhas ou oliveiras. Essa prática é conceituada pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF);
- **Queimada extensiva:** emprego do fogo em áreas maiores para eliminar materiais vegetais cortados e dispersos, sem organização prévia. Segundo o ICNF, essa técnica é comum em regiões de pastagem ou agrícolas para a remoção de sobras vegetais espalhadas no solo.

Diante disso, observa-se que as queimadas, embora façam parte de práticas tradicionais de manejo agrícola e ambiental, apresentam riscos significativos quando realizadas de forma inadequada ou sem controle. A distinção entre diferentes modalidades de uso do fogo — desde a queima controlada até a queimada extensiva — evidencia que seu impacto pode variar de acordo com os objetivos, as técnicas aplicadas e o nível de planejamento envolvido.

3.4.2 Fatores meteorológicos que favorecem as queimadas

As condições meteorológicas exercem influência direta sobre a ocorrência e propagação das queimadas, especialmente em regiões com forte sazonalidade climática, como o Quadrilátero Ferrífero. Entre os principais fatores que contribuem para a intensificação desses eventos estão a baixa umidade relativa do ar, as altas temperaturas e a presença de ventos (SAMPAIO, 1991).

Durante o período seco, especialmente nos meses de inverno e início da primavera, a umidade do ar frequentemente atinge níveis críticos, inferiores a 30%, o que torna a vegetação mais seca e altamente inflamável (INMET, 2025). Simultaneamente, as temperaturas elevadas favorecem a evaporação da água presente no solo e na vegetação, reduzindo ainda mais a umidade disponível no ambiente (INMET, 2025).

Outro fator relevante é a ausência prolongada de chuvas, que contribui para o acúmulo de matéria orgânica seca sobre o solo, criando um ambiente altamente propício à ignição (EMBRAPA, 2020). Segundo a Embrapa (2021), a seca severa

combinada com altas temperaturas e cobertura vegetal desidratada amplia significativamente o risco de fogo em ambientes naturais e agrícolas.

Além disso, a ação dos ventos favorece a propagação do fogo, transportando brasas e partículas incandescentes a novas áreas, mesmo distantes da origem. Quanto maior a velocidade dos ventos, maior o risco de que pequenas queimadas se transformem em incêndios florestais de grandes proporções (IBAMA, 2016).

A ocorrência de fenômenos climáticos como o El Niño também intensifica esses fatores. De acordo com Ynoue *et al.*, (2017), os anos de El Niño costumam apresentar temperaturas acima da média e redução nos volumes de precipitação em várias regiões do Brasil, incluindo o Sudeste. Isso estende o período seco e agrava as condições ambientais para a deflagração de queimadas.

Portanto, compreender os fatores meteorológicos que influenciam a ocorrência e propagação das queimadas é essencial para a formulação de estratégias eficazes de prevenção e controle do fogo. Em regiões sensíveis como o Quadrilátero Ferrífero, onde o relevo acidentado, o clima sazonal e a diversidade da cobertura vegetal interagem de forma contínua, o monitoramento contínuo das condições ambientais torna-se indispensável.

3.4.3 Impactos ambientais e socioeconômicos das queimadas

As queimadas representam um dos fenômenos ambientais mais preocupantes da atualidade, não apenas pelos danos imediatos causados à vegetação e à fauna, mas também pelos efeitos duradouros sobre o equilíbrio ecológico, o clima e as condições de vida da população (DIAS, 2008). Conforme evidenciou o autor, as queimadas comprometem diretamente a integridade dos ecossistemas ao destruir a cobertura vegetal, interromper ciclos ecológicos e reduzir drasticamente a biodiversidade local. Essa degradação atinge tanto espécies vegetais quanto animais, muitas vezes ameaçadas, além de afetar negativamente processos como a regeneração natural e o controle biológico (DIAS, 2008).

Segundo o IBAMA (2016), outro impacto significativo das queimadas é a degradação do solo. A queima da matéria orgânica superficial empobrece os nutrientes disponíveis, favorece a compactação e a erosão, e reduz a capacidade de retenção hídrica, comprometendo a fertilidade do solo e sua função ecológica. Em áreas inclinadas ou de relevo acidentado, como o Quadrilátero Ferrífero, esse processo é ainda mais acentuado, levando ao assoreamento de cursos d'água e à perda da qualidade dos recursos hídricos.

Do ponto de vista climático, as queimadas também desempenham papel crucial. Conforme o IPCC (2021), os incêndios florestais são grandes emissores de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), contribuindo para o aquecimento global e agravando os eventos climáticos extremos. Esse ciclo se repete: o aumento das temperaturas e a redução da umidade, especialmente em anos de El Niño, elevam o risco de incêndios, que por sua vez intensificam as mudanças climáticas.

Além dos efeitos ambientais, os impactos socioeconômicos das queimadas são expressivos. Conforme alerta o Ministério da Saúde (2024), a exposição à fumaça proveniente das queimadas está associada a um aumento de doenças respiratórias, como bronquite, asma e rinite, especialmente entre crianças, idosos e pessoas com doenças pré-existentes. Em regiões urbanas ou periurbanas, como algumas áreas do Quadrilátero Ferrífero, a má qualidade do ar pode gerar aumento de atendimentos hospitalares, afastamentos do trabalho e sobrecarga no sistema de saúde pública.

No âmbito econômico, as queimadas podem comprometer diretamente atividades produtivas como a agricultura, a pecuária e o turismo. Em propriedades rurais, os prejuízos incluem perda de lavouras, degradação de pastagens e danos à infraestrutura. No setor turístico, especialmente em regiões com potencial ecológico e paisagístico, o fogo pode destruir trilhas, atrativos naturais e comprometer a segurança de visitantes (DIAS, 2008).

Portanto, os impactos das queimadas não se restringem ao ambiente natural, mas atinge as dimensões sociais e econômicas, exigindo políticas públicas integradas, estratégias de prevenção, planos de manejo adaptativo e ações de educação ambiental. Como destaca Dias (2008), compreender a multiplicidade desses efeitos é essencial para enfrentar os desafios atuais e construir alternativas sustentáveis frente

à intensificação dos eventos climáticos e das pressões antrópicas sobre os ecossistemas.

3.5 RELAÇÃO ENTRE O ENOS E A OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS NO BRASIL

A variabilidade interanual associada ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS) confere fatores meteorológicos importantes para a deflagração e propagação de queimadas como o regime de chuvas, temperatura do ar, umidade relativa e duração do período seco. Em fases quentes (El Niño), extensas áreas do Brasil tendem a experimentar estiagens mais longas ou início tardio da estação chuvosa; em fases frias (La Niña), alguns setores ficam mais úmidos na transição sazonal, mas essa umidade adicional pode acumular biomassa fina que, se seguida de um período seco subsequente, aumenta a carga de combustível disponível. A resposta efetiva em fogo depende ainda do uso da terra e das ignições antrópicas — principal gatilho na maior parte do país — de modo que o sinal climático atua sobretudo como condicionante da inflamabilidade (SODRÉ *et al.*, 2018).

A escala nacional oferece exemplos claros da influência do El Niño sobre o aumento de focos. Analisando o episódio 2015-2016, Diniz *et al.*, (2019) mostraram que, na primavera de 2015, considerada a mais seca e quente do período avaliado, o número de focos de incêndio no Brasil saltou de uma média histórica (1998-2014) de 34.376 para 49.849 registros — incremento de cerca de 45% — em paralelo a baixos índices de umidade e precipitação em amplas áreas do Norte, Nordeste, Centro-Oeste e parte do Sudeste.

Condições semelhantes voltaram a chamar atenção no evento 2023-2024. Dados do Monitor do Fogo do MapBiomas indicam que mais de 30,8 milhões de hectares queimaram no Brasil em 2024, aumento de 79% sobre 2023, com forte contribuição de seca prolongada associada ao El Niño e baixa umidade que deixou a vegetação altamente suscetível; o relatório também alerta que o acúmulo de biomassa gerado por chuvas volumosas sob efeito de El Niño pode elevar o risco de fogo quando a transição para La Niña trouxer períodos mais secos em 2025. (MAPBIOMAS, 2025).

Segundo reportagem da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sobre estudo publicado na *Science of the Total Environment*, o risco de incêndios na Amazônia aumenta quando secas meteorológicas e hidrológicas — intensificadas por eventos de El Niño — reduzem drasticamente a umidade do solo, da zona radicular e das águas subterrâneas; análise de 2004-2016 evidenciou que grandes áreas queimadas coincidiram com déficits hídricos durante El Niño fortes (por exemplo, 2015-2016) e que, entre março de 2023 e fevereiro de 2024, secas prolongadas ligadas ao El Niño explicaram 68% dos incêndios registrados na Amazônia Ocidental, com o restante associado a pressões antrópicas como desmatamento e fragmentação.

Evidências regionais reforçam como o sinal climático do ENOS interage com a sazonalidade local. No Pará, Nascimento e Senna (2020) compararam períodos de El Niño 2015-2016, La Niña 2011-2012 e condição neutra (2013-2014) usando a Fórmula de Monte Alegre (IFMA) e registros de focos de calor do INPE; o risco meteorológico de fogo e o número de focos aumentaram com a redução de chuva e umidade durante o El Niño, enquanto um episódio de La Niña elevou o índice de risco sem corresponder a igual aumento de focos, indicando controle humano variável sobre ignições.

A análise semestral de Sodr e *et al.*, (2018) para a Amazônia Oriental mostrou que anos de El Niño, ao reduzir a umidade, favorecem maior distribuição de queimadas ao longo do ano e acréscimos em áreas agrícolas e florestais, ao passo que anos de La Niña exibem limitação natural no primeiro semestre (mais úmido) seguida por acúmulo de material combustível e concentração elevada de focos no segundo semestre, especialmente em áreas agricultáveis que funcionam como fonte de ignição para fragmentos florestais adjacentes.

Estudos de longa duração reforçam o papel determinante de fatores climáticos e do uso da terra na ocorrência de queimadas. Ao analisar 38 anos de dados (1985-2022) no Cerrado, Arruda *et al.*, (2024) identificaram não apenas a recorrência de grandes áreas queimadas, mas também o deslocamento da estação do fogo para meses mais tardios e o aumento do tamanho médio dos eventos. Os resultados indicaram a interação entre secas na estação seca, a expansão agropecuária e a maior vulnerabilidade de ecossistemas úmidos, ressaltando que anos com anomalias

climáticas (incluindo aqueles associados ao ENOS) concentram algumas das maiores extensões de área queimada.

No estado de Minas Gerais — onde se localiza o Quadrilátero Ferrífero — órgãos estaduais vêm associando o risco de incêndios sazonais às condições de temperatura elevada, umidade relativa baixa e atraso no início das chuvas quando El Niño está presente. Reportagem do jornal O Tempo (agosto/2023), citando especialistas do INMET e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), registrou média diária de 42 incêndios florestais até agosto e alertou que o El Niño em desenvolvimento poderia prolongar a estiagem, reduzir a atuação da ZCAS e atrasar o início das chuvas de primavera, ampliando a janela de inflamabilidade; a matéria também reiterou o papel predominante das ignições humanas.

Em complemento, boletim da Agência Minas (junho/2024) com participação do Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais (Simge/Igam) indicou expectativa de chuvas abaixo da média em partes do estado no período seco e temperaturas até 2 °C acima do normal em trimestres críticos, indicando que sequências prolongadas de dias sem precipitação podem aumentar substancialmente os focos de queimadas e lembrando que eventos anteriores sob El Niño (como 2015-2016) trouxeram condições semelhantes. As séries compiladas para o estado apontam concentração de ocorrências entre julho e outubro e forte variabilidade espacial, com regiões Norte, Noroeste e Triângulo Mineiro frequentemente mais críticas; a gestão estadual tem respondido com programas de prevenção (por exemplo, Força-Tarefa Previncêndio e Minas Contra o Fogo) que combinam monitoramento meteorológico, treinamento de brigadas e queimas prescritas para reduzir carga de combustível acumulada antes do pico da estação seca. (AGÊNCIA MINAS, 2023).

Conforme descrito, a literatura evidencia que o ENOS atua como agente importante das condições de inflamabilidade em todo o Brasil: El Niño tende a ampliar o risco de queimadas via secas e calor em amplas regiões, enquanto La Niña redistribui a umidade e pode deslocar ou concentrar a sazonalidade do fogo — às vezes suprimindo-o temporariamente e depois potencializando surtos quando a

biomassa acumulada seca. A magnitude do impacto sobre queimadas depende fortemente do contexto regional (clima sazonal, tipo de vegetação) e, sobretudo, das ignições e práticas humanas, razão pela qual o monitoramento climático ligado ao ENOS deve ser integrado a estratégias de manejo do fogo, fiscalização e educação ambiental, inclusive em zonas de transição climática como o Quadrilátero Ferrífero.

3.6 ANÁLISE MULTICRITÉRIO: MÉTODO AHP – *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*

Conforme Borchers, Figueirôa-Ferreira e Fernandes (2021), a Análise Multicritério (AMC) é uma metodologia de apoio à tomada de decisão que utiliza diferentes critérios relacionados ao objeto de estudo para identificar as alternativas mais adequadas, seja para a resolução de problemas específicos ou para a definição de áreas prioritárias. No contexto das queimadas, esse método se mostra particularmente relevante, pois possibilita integrar variáveis ambientais, físicas e antrópicas na avaliação da suscetibilidade ao fogo, permitindo identificar territórios mais vulneráveis (LADISLAU *et al.*, 2021).

A AMC começou a se consolidar nas décadas de 1970 e 1980, sendo composta por um conjunto de técnicas voltadas a auxiliar indivíduos, grupos ou comitês na tomada de decisões complexas, envolvendo a análise e a seleção de alternativas com base em múltiplos critérios e diferentes perspectivas (CARVALHO, 2016). Seu objetivo principal é contribuir para que pessoas e organizações estabeleçam prioridades de forma integrada, considerando simultaneamente diversos aspectos que influenciam o risco e a ocorrência do fogo (JANNUZZI; MIRANDA; SILVA, 2009).

Dentro do vasto campo da Análise Multicritério, um dos modelos mais difundidos e aplicados globalmente é o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), ou Processo de Análise Hierárquica. Concebido por Thomas L. Saaty, o AHP é uma ferramenta projetada para estruturar problemas de decisão complexos de forma hierárquica, facilitando a análise e a escolha da melhor alternativa (SAATY, 1991). A principal contribuição do método reside na sua capacidade de decompor um problema intrincado em seus componentes mais elementares (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011). Essa decomposição permite que o tomador de decisão avalie a importância relativa de cada elemento por meio de uma série de comparações par a

par, minimizando a subjetividade e inconsistências que frequentemente permeiam decisões complexas (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011).

A estrutura metodológica do AHP é fundamentada em três princípios essenciais: a decomposição hierárquica do problema, a priorização dos elementos por meio de comparações e a verificação da consistência lógica dos julgamentos (SAATY, 1991).

O primeiro passo na aplicação do AHP consiste em modelar o problema de decisão em uma estrutura de hierarquia, onde no nível mais elevado se encontra o objetivo principal, nos níveis intermediários os critérios e, no nível mais baixo, as alternativas disponíveis (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011). Uma vez estabelecida a hierarquia, o núcleo do método AHP é a realização de julgamentos comparativos, nos quais os elementos são comparados dois a dois em relação ao seu elemento "pai" no nível superior (SAATY, 1991). Para quantificar esses julgamentos, Saaty (1991) propôs uma escala numérica fundamental que varia de 1 (igual importância) a 9 (extrema importância), cujos resultados são organizados em matrizes de comparação para derivar os pesos relativos de cada elemento.

Após o cálculo das prioridades locais, o método realiza a síntese dos resultados para obter a prioridade global de cada alternativa, sendo a de maior escore considerada a mais adequada (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011). Um diferencial crucial do AHP é sua capacidade de verificar a consistência dos julgamentos, calculando uma Razão de Consistência (CR) que deve ser inferior a 0,10 para que os resultados sejam considerados confiáveis (SAATY, 1991). Partindo do esquema geral da Análise Multicritério, o AHP se consolida como uma metodologia eficaz e flexível, capaz de incorporar dados objetivos e julgamentos subjetivos de forma estruturada, tornando o processo de tomada de decisão mais transparente, racional e defensável (MARCHEZETTI; KAVISKI; BRAGA, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa utilizou fontes secundárias para a coleta de dados, possibilitando a análise de informações previamente registradas sobre o Quadrilátero Ferrífero. A abordagem quantitativa permitiu a comparação entre dados históricos e as condições atuais da região, contribuindo para uma compreensão das transformações ocorridas ao longo do tempo. Para garantir um recorte temporal adequado, foi estabelecido um período de 26 anos (1999-2024). Esse período também se deu pela disponibilidade de dados encontrados.

Por se caracterizar como uma pesquisa aplicada, o estudo busca atender a uma demanda prática, transformando os padrões existentes em análises reais. Dessa forma, a análise dos dados coletados permitiu identificar padrões e tendências que podem contribuir para a resolução de problemas específicos.

4.1 Local de Estudo

A região do Quadrilátero Ferrífero, situada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais, destaca-se como a mais relevante área produtora de minério de ferro do Brasil, sendo a produção desse mineral uma das principais bases da economia local. Além disso, é uma das regiões mais densamente habitadas do estado, abrigando importantes cidades, como Belo Horizonte, Ouro Preto, Itabirito e Mariana, e desempenhando um papel fundamental na economia, na mineração e no patrimônio histórico e cultural de Minas Gerais (CEAQFe, 2025).

O QFe é uma região montanhosa situada ao sul da Cadeia do Espinhaço, que atravessa o estado no sentido Norte-Sul (BARBOSA; RODRIGUES, 1967). Esta localização geográfica favorece a coexistência de diversas fitofisionomias, como florestas estacionais semidecíduais, campos rupestres e cerrado *sensu stricto*, resultando em um mosaico ambiental complexo. Inserido em uma área de transição entre os biomas da Floresta Atlântica e do Cerrado, o QFe apresenta grande diversidade geológica, geomorfológica e pedológica, que favorece a formação de vegetações compostas por espécies arbóreas, savânicas e herbáceas (PEREIRA, 2010; SCHAEFER *et al.*, 2015). Em termos geológicos, a região é caracterizada por formações ferríferas, itabiritos e cangas lateríticas, que exercem influência direta sobre os solos locais (CEAQFe, 2025).

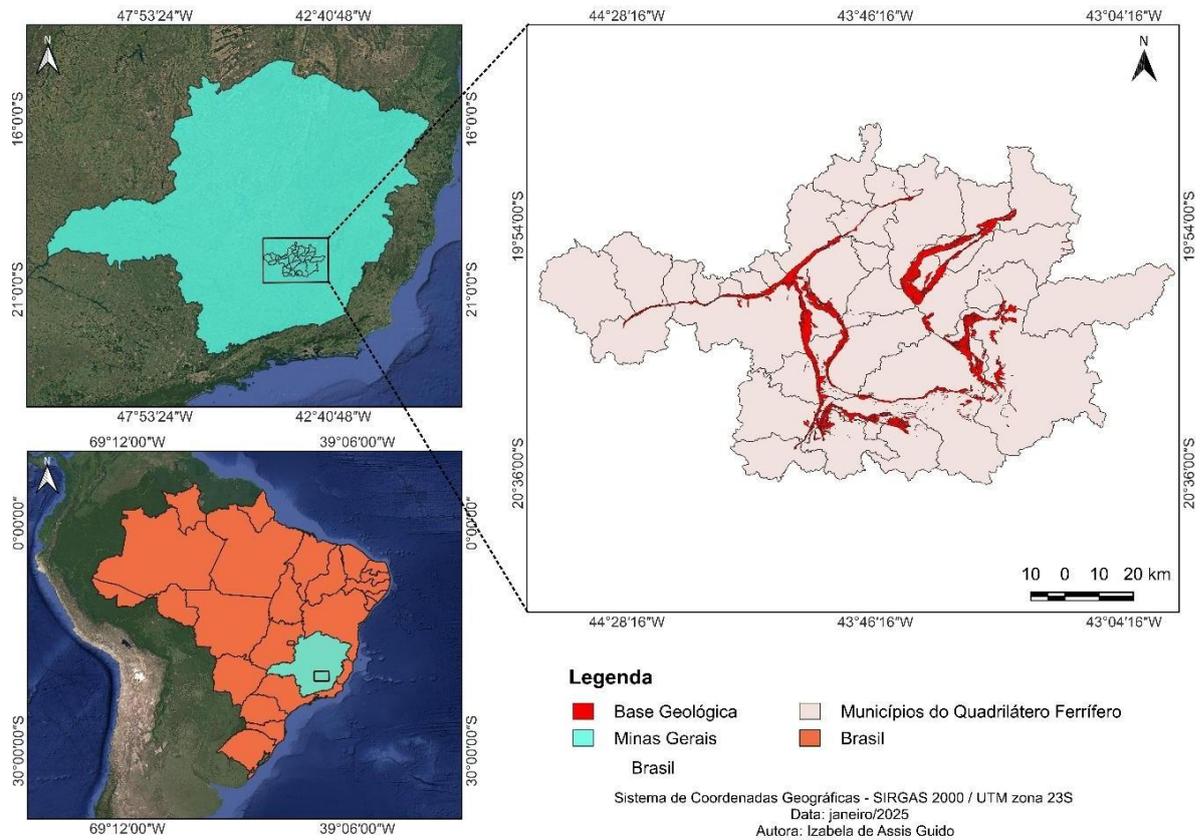
O clima é caracterizado como tropical semi úmido, apresentando duas estações climáticas distintas: um verão úmido e um inverno seco (VARAJÃO *et al.*, 2009). De acordo com a classificação de Köppen, as áreas analisadas enquadram-se na categoria Cwa (COELHO, *et al.*, 2017).

Essa região, conhecida por sua riqueza mineral, concentra não apenas o ferro, mas também reservas significativas de ouro, manganês e bauxita. A exploração de ferro, intensificada ao longo do século XX, impulsionou o desenvolvimento econômico, mas também trouxe à tona debates sobre os impactos ambientais e sociais da mineração. Nos últimos anos, movimentos ambientalistas têm destacado a importância dos recursos hídricos da área, chamando atenção para os aquíferos de alta qualidade associados às formações ferruginosas exploradas pelas mineradoras, conforme destaca o Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero (CEAQFe, 2025).

Geograficamente, a região abrange uma área de aproximadamente 7.000 km² incluindo diversos municípios, como Alvinópolis, Barão de Cocais, Belo Horizonte, Belo Vale, Bom Jesus do Amparo, Brumadinho, Caeté, Catas Altas, Congonhas, Ibirité, Igarapé, Itabirito, Itatiaiuçu, Itaúna, Jeceaba, Mariana, Mário Campos, Mateus Leme, Moeda, Nova Lima, Ouro Branco, Ouro Preto, Raposos, Rio Acima, Sabará, Santa Bárbara, Santa Luzia, Sarzedo, São Gonçalo do Rio Abaixo e São Joaquim de Bicas. Os vértices do polígono que define essa área estão localizados nas cidades de Ouro Preto/Mariana, Congonhas, Caeté e Brumadinho.

Nesse contexto, foi elaborado um mapa que ilustra a localização da região do Quadrilátero Ferrífero (conforme demonstrado na Figura 3). O objetivo é proporcionar uma visualização mais clara da área total de estudo e das unidades federativas circunvizinhas que serão importantes para a área de influência dos fenômenos climáticos.

Figura 3 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais



Fonte: Autora, 2025.

4.2 Influência dos ENOS nos Padrões de Temperatura, Precipitação e Umidade Relativa do ar no Quadrilátero Ferrífero

Para a pesquisa, foi importante classificar o período de análise em termos de ocorrências de El Niño e La Niña. A NOAA (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica), agência norte-americana responsável pelo monitoramento e estudo do clima, tempo e oceanos, disponibiliza dados e informações essenciais para o acompanhamento e categorização dos eventos do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS).

Embora os eventos do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) possam abranger períodos que se estendem por mais de um ano civil, iniciando-se em determinado ano e se prolongando até o seguinte, optou-se, nesta pesquisa, por classificar cada ano com base na fase predominante do fenômeno ao longo dos doze meses. Essa escolha permitiu maior abrangência e representatividade dos dados, possibilitando a inclusão

de um número maior de eventos. A classificação anual também facilitou a correspondência entre os dados climáticos agregados e os registros de queimadas, que foram organizados por ano civil.

Com base nos dados disponibilizados pela NOAA, os anos de 1999 a 2024 foram classificados de acordo com as fases do fenômeno ENOS. Essa categorização identifica tanto a fase do evento (El Niño ou La Niña) quanto sua intensidade (fraca, moderada, forte ou muito forte). Nos casos em que um mesmo ano apresentava mais de uma fase ao longo dos meses, foi realizada uma consulta complementar à tabela do índice ONI (Oceanic Niño Index), também disponibilizada pela NOAA (acessada através do link <https://shre.ink/SPbq>), a fim de verificar qual fase predominou na maior parte do ano. Essa definição permitiu garantir maior consistência e representatividade na análise.

No entanto, os anos de transição foram excluídos da análise, pois apresentaram mais de uma fase dominante ao longo do ano, o que poderia gerar interferências na associação entre variáveis climáticas e ocorrência de queimadas. Da mesma forma, os anos classificados como neutros também foram excluídos, devido ao número reduzido de registros, o que comprometeria a representatividade estatística da amostra para essa fase. Portanto, a análise foi concentrada nos anos com predominância de El Niño ou La Niña, a fim de garantir consistência nos resultados obtidos. Sendo assim, os anos de 1999 a 2024 foram classificados da seguinte forma:

- **Anos de El Niño predominante:** 2002, 2003, 2004, 2006, 2009, 2014, 2015, 2019, 2023, 2024.
- **Anos de La Niña predominante:** 1999, 2000, 2001, 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2017, 2021, 2022.
- **Anos de Neutralidade predominante:** 2005, 2013, 2020.
- **Anos de Transição:** 2016, 2018.

No que se refere aos fatores climáticos, idealmente, a obtenção dos dados para a pesquisa deveria ser realizada por meio de estações meteorológicas localizadas dentro ou próximas à área de estudo, uma vez que essas oferecem medidas diretas, captando as variabilidades locais de temperatura, umidade e precipitação com maior

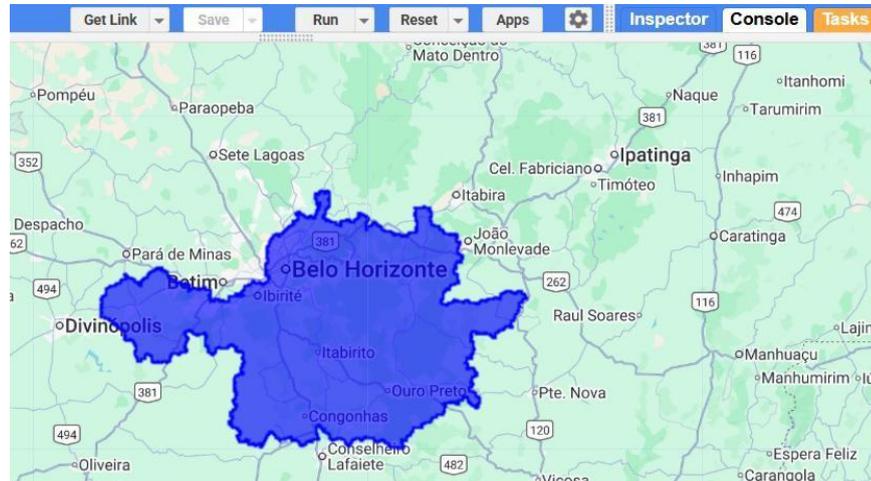
fidelidade. No entanto, no caso específico do Quadrilátero Ferrífero, a disponibilidade de estações meteorológicas é limitada, com poucas unidades que abrangem toda a extensão da área analisada.

Além disso, muitas dessas estações apresentam séries históricas curtas e lacunas nos registros, o que comprometeria a comparabilidade ao longo do período de 1999 a 2024. Diante dessas limitações, optou-se pela utilização do *Google Earth Engine* (GEE), que permite o acesso a produtos de reanálise climática confiáveis, como o ERA5-Land e o CHIRPS, os quais forneceram estimativas espaciais para toda a área de interesse.

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma de computação em nuvem desenvolvida pelo Google que permite a análise geoespacial em larga escala, utilizando *petabytes* de dados de observação da Terra. A GEE oferece um ambiente de desenvolvimento de códigos em *JavaScript* para processamento e análise de imagens de satélite e outros conjuntos de dados geoespaciais.

Para delimitar com precisão a área de interesse, o *shapefile* do Quadrilátero Ferrífero (obtido no site do Instituto Prístino) foi carregado na plataforma GEE – conforme Figura 4. Os scripts desenvolvidos para a extração dos dados climáticos foram adaptados para a região específica de análise, utilizando módulos e lógicas de programação disponíveis em outras metodologias de pesquisa.

Figura 4 - Interface inicial do GEE carregada com o *shapefile* do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Autora, 2025.

Os dados de precipitação foram obtidos utilizando produtos da coleção CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), acessados por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Essa base de dados integra estimativas de precipitação por satélite com observações *in situ* e possui abrangência quase global (entre 50°S e 50°N), oferecendo uma série histórica consistente desde 1981. A resolução espacial é de 0,05°, com frequência diária e unidades em milímetros por dia. O CHIRPS foi desenvolvido em colaboração com o *Earth Resources Observation and Science Center* (EROS/USGS), visando fornecer estimativas contínuas, atualizadas e confiáveis, especialmente em regiões com escassez de estações meteorológicas (MENDES et al., 2024).

Para a análise da temperatura média mensal na região do Quadrilátero Ferrífero, no período de 1999 a 2024, foram utilizados dados climáticos provenientes do conjunto ERA5-Land, disponibilizado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) por meio da plataforma GEE. O ERA5-Land é um produto de reanálise climática, que fornece estimativas horárias e mensais de diversas variáveis ambientais com alta resolução espacial (~9 km). As reanálises consistem na combinação de observações históricas (como satélites, radares,

estações meteorológicas e balões-sonda) com modelos numéricos de previsão do tempo, utilizando técnicas de assimilação de dados para produzir uma reconstrução contínua, coerente e de alta qualidade do estado da atmosfera e da superfície terrestre (GOOGLE EARTH, 2025).

A análise utilizou especificamente a coleção mensal agregada *ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR*, que inclui a variável *temperature_2m*, correspondente à temperatura do ar a 2 metros da superfície, expressa em Kelvin. Para cada combinação de ano e mês, no intervalo de 1999 a 2024, foi extraída a temperatura média mensal, posteriormente convertida de Kelvin para graus Celsius, por meio da conversão padrão indicada na Equação 1.

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273,15 \quad (1)$$

Onde $T(^{\circ}C)$ representa a temperatura em graus Celsius e $T(K)$ representa a temperatura em graus Kelvin.

No que se refere à avaliação das condições de umidade atmosférica, fator determinante para a propensão e propagação de queimadas, o ideal seria a utilização direta de dados de umidade relativa do ar. No entanto, devido à indisponibilidade dessa variável de forma direta na plataforma GEE e em estações meteorológicas da região, optou-se por utilizar os dados de temperatura do ar (T) e de temperatura do ponto de orvalho a 2 metros (*dewpoint_temperature_2m*), ambos derivados da reanálise *ERA5-Land: Monthly Aggregated (ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR)*. Esses dados foram extraídos mensalmente para o período e utilizados para o cálculo da umidade relativa (UR) com base na Equação 2, do tipo Magnus-Tetens.

$$UR = 100 * \left[\frac{e^{17,625 * T_p}}{e^{17,625 * T} + \frac{243,04 + T_p}{243,04 + T}} \right] \quad (2)$$

Onde UR é a umidade relativa (em porcentagem), T_p é a temperatura do ponto de orvalho e T é temperatura normal.

Essa relação empírica, adotada para estimativas de umidade em meteorologia, utiliza uma forma aprimorada da equação de Tetens (1930), com ajustes recomendados por Alduchov & Eskridge (1996) para ganho de precisão em uma ampla faixa de temperaturas. Os coeficientes 17,625 e 243,04 refletem a versão atualizada, combinados ao padrão de cálculos usados em estudos hidrometeorológicos. Dessa forma, a umidade relativa foi estimada para cada ano, com o auxílio do software Microsoft Excel.

Além da classificação anual, esta pesquisa também se concentrou na análise do período crítico para a ocorrência de queimadas na região de estudo, compreendido entre os meses de abril a outubro de 1999 a 2024. Esse intervalo foi selecionado por abranger a estação seca no Quadrilátero Ferrífero, período historicamente associado ao aumento na ocorrência de focos de queimadas devido à redução da umidade relativa do ar, baixa precipitação e elevação das temperaturas. A delimitação por recorte temporal permitiu uma pesquisa mais detalhada sobre a influência das fases do ENOS na sazonalidade das queimadas.

4.3 Análise da Frequência e Intensidade das Queimadas em anos de El Niño

A ocorrência de focos de calor, indicativos de prováveis queimadas na região do Quadrilátero Ferrífero, foi investigada com base em dados do período de 01 de janeiro a 31 de dezembro, para cada ano entre 1999 e 2024, obtidos no site BDQueimadas, mantido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados foram baixados no formato *shapefile* (.shp), o que possibilitou a realização de análises espaciais no ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Além da série anual completa, também foram extraídos os dados entre os meses de abril a outubro (01/04 a 31/10), a fim de viabilizar análises específicas sobre a sazonalidade das queimadas, permitindo avaliar os efeitos das fases do ENOS sobre os meses mais críticos em termos de vulnerabilidade à ocorrência de fogo.

Ao longo da série histórica analisada, os registros de focos de calor utilizados nessa pesquisa foram gerados por diferentes satélites operados e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cada um com características específicas de resolução espacial, frequência de passagem e sensibilidade de detecção. Os principais satélites utilizados nesse período foram:

- **NOAA-12, NOAA-15, NOAA-18 e NOAA-19**, equipados com o sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), com resolução espacial de aproximadamente 1,1 km.
- **AQUA e TERRA**, com o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), que possui resolução de até 1 km para detecção de focos de calor e maior capacidade espectral.
- **SUOMI-NPP e NOAA-20**, com o sensor mais recente VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), com resolução de 375 metros, o que aumenta significativamente a sensibilidade de detecção.

A diversidade tecnológica pode afetar a quantidade de focos identificados em determinados anos, influenciando diretamente as estatísticas anuais. Contudo, é importante destacar que, dentro de cada grupo analisado (anos de El Niño ou de La Niña predominante), os registros foram majoritariamente produzidos por satélites semelhantes entre si, o que contribuiu para uma maior homogeneidade técnica interna a cada conjunto. Por exemplo, os eventos mais antigos (como os de 1999, 2002, 2003) foram monitorados por sensores de mesma geração, com características próximas de detecção. O mesmo se aplica aos anos mais recentes (como 2019, 2023 e 2024), cujos dados foram gerados por sensores mais modernos, porém padronizados entre si.

Assim, a partir dos dados de focos de calor, foram gerados mapas de densidade utilizando o método de Kernel, uma técnica que transforma pontos de ocorrência em uma superfície contínua de intensidade, permitindo a identificação visual de áreas com maior concentração de eventos, conhecidas como *hotspots*. O estimador de densidade Kernel baseia-se em dois parâmetros principais: o raio de busca, que define a vizinhança de pontos considerados na estimativa da intensidade, e a função de estimação, que suaviza o fenômeno com base na distância euclidiana entre os pontos analisados (CÂMARA; CARVALHO, 2004; SILVA; QUEIROZ, 2006). Assim, é possível atribuir pesos maiores às áreas com maior densidade de eventos, permitindo

identificar padrões espaciais importantes e contribuir para a análise mais interpretável da distribuição e intensidade das queimadas na região estudada.

A definição do raio de busca para o estimador Kernel foi realizada com o apoio da ferramenta Matriz de Distância, acessada por meio do menu Vetor em ambiente SIG. Essa funcionalidade gera uma tabela contendo os valores de distância entre todos os pontos de uma mesma camada vetorial, permitindo a identificação de padrões espaciais com base em medidas como média, desvio padrão, distância mínima e máxima. Para cada ponto correspondente a um foco de calor, foram calculadas essas estatísticas individualmente. No entanto, para aplicar um único valor representativo ao conjunto de dados anual, o *shapefile* foi exportado para o formato *.xlsx* e processado no Microsoft Excel, onde foram calculadas a média das médias e a média dos desvios padrão entre os pontos. Essa metodologia segue os procedimentos descritos por Dias (2023) em seu estudo sobre risco de queimadas em Minas Gerais. A Tabela 1 exemplifica o processo para os focos de calor no evento El Niño para a anual (2002, 2003, 2004, 2006, 2009, 2014, 2015, 2019, 2023 e 2024).

Tabela 1 - Exemplo do arquivo gerado pela Matriz de Distância no formato *.xlsx*, através do QGIS

ID	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)
0	66799,05	30333,99	1780,31	147362,64
1	68229,90	30615,56	946,64	149081,79
2	67629,44	30365,99	1983,86	147599,02
...
	Média	Desvio Padrão	R+	R-
Resultado	53.866,75	25.317,79	79.184,53	28.548,96

Fonte: Autora, 2025.

Para os 34.681 focos de calor quantificados no período, correspondente aos anos de El Niño, obteve-se uma média das distâncias entre os pontos de 53.866,75 metros e uma média dos desvios padrão de 25.317,79 metros. Com base nesses valores, foram testados dois parâmetros para o raio de influência (R) da densidade Kernel: um valor ampliado (R^+), calculado pela soma da média das distâncias com a média dos desvios padrão ($R^+ = 53.866,75 + 25.317,79 = 79.184,53$ metros), e um valor reduzido (R^-), obtido pela diferença entre os mesmos parâmetros ($R^- = 53.866,75 - 25.317,79 = 28.548,96$ metros). Após testes visuais sobre a cobertura espacial gerada, o valor reduzido (R^-) demonstrou melhor desempenho, representando adequadamente a distribuição dos focos sem extrapolar os limites do Quadrilátero Ferrífero. Esse mesmo procedimento foi adotado para as demais amostragens e fases do ENOS.

Por fim, foi adotado um tamanho de pixel de 100 metros, por se tratar de uma resolução intermediária que permite representar os padrões espaciais dos focos de calor, mantendo o equilíbrio entre detalhamento cartográfico e desempenho computacional. A escala foi considerada suficiente para visualizar variações locais na distribuição das queimadas, sem gerar sobreposição excessiva ou perda de informação espacial em áreas menos densas.

4.4 Análise da Vulnerabilidade às Queimadas no Quadrilátero Ferrífero durante o El Niño e La Niña

A vulnerabilidade de uma área a determinados processos ou fenômenos está diretamente relacionada ao uso e ocupação do solo, bem como à presença ou ausência de cobertura vegetal, densidade populacional e demais variáveis físico-ambientais. Com o objetivo de identificar as regiões com maior suscetibilidade às queimadas no Quadrilátero Ferrífero, foi realizada uma análise multicritério com base no método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), originalmente desenvolvido por Saaty (1980) e amplamente adotado em estudos ambientais.

A estrutura metodológica foi adaptada da proposta de Ladislau *et al.*, (2021). A escolha deste estudo como referência se justifica pela sua aplicação na Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul-RMBH), uma área que se sobrepõe parcialmente ao Quadrilátero Ferrífero e compartilha características fisiográficas e de uso do solo semelhantes, como a presença de

formações de campos de altitude, cerrado e áreas de mineração, o que valida a replicação e adaptação do modelo para a presente pesquisa.

Foram considerados seis critérios, os quais são amplamente reconhecidos pela literatura como fatores determinantes para o risco de incêndios: declividade, altimetria, uso e ocupação do solo, temperatura, precipitação e distância de rodovias. Essa estrutura permite a integração de variáveis ambientais e antrópicas em uma estrutura decisória hierárquica, atribuindo pesos (importância relativa entre os critérios) e notas (vulnerabilidade das classes dentro de cada critério), conforme sua influência sobre a ocorrência e propagação do fogo.

O critério de declividade foi derivado de um Modelo Digital de Elevação (MDE) do portal IDE-Sisema, processado no software QGIS. A atribuição de notas mais altas a declividades intermediárias (plano a ondulado) se justifica, conforme Ladislau *et al.*, (2021), pois terrenos muito planos podem dificultar a propagação, enquanto áreas muito íngremes podem apresentar descontinuidade de combustível. Já as inclinações moderadas aceleram a velocidade de avanço das chamas e favorecem o acúmulo de material combustível seco.

Os dados de altimetria foram extraídos do mesmo MDE. As maiores notas foram atribuídas às altitudes mais baixas, pois estas zonas no QFe frequentemente correspondem a vales e áreas de transição vegetacional com maior atividade humana e temperaturas mais elevadas, fatores que aumentam o risco de ignição e propagação do fogo.

O uso e ocupação do solo foi obtido da Coleção 8 do MapBiomias e reclassificado. A lógica para a atribuição das notas baseia-se na carga de material combustível e na inflamabilidade de cada classe. Pastagens, silvicultura e mosaicos agropecuários receberam nota 7 por representarem vegetação de fácil queima e rápida propagação. Formações florestais e savânicas, com maior biomassa, mas também maior umidade, receberam nota 5. Classes como corpos hídricos e áreas urbanizadas funcionam como barreiras ao fogo, recebendo, portanto, nota 1.

A variável temperatura foi extraída da média anual de dados do reanálise ERA5-Land, processada no *Google Earth Engine*. Temperaturas mais elevadas (nota 7)

intensificam a evapotranspiração, reduzindo a umidade da vegetação e do material orgânico no solo, tornando-os mais propensos à ignição. Em contrapartida, a precipitação média anual, obtida do conjunto de dados CHIRPS, atua de forma inversa. Áreas mais secas (nota 7) apresentam maior estresse hídrico e maior disponibilidade de combustível seco, enquanto áreas mais úmidas receberam notas inferiores.

Por fim, a distância às rodovias, calculada a partir da rede viária do *OpenStreetMap*, representa a influência antrópica. A proximidade a rodovias (0 a 1 km, nota 7) está diretamente associada a um maior risco de ignição, seja por descarte de cigarros, faíscas de veículos ou atos intencionais, diminuindo progressivamente com o aumento da distância.

As notas atribuídas a cada classe dos critérios estão descritas na Tabela 2. Para definir os pesos relativos de cada um desses seis critérios, foi empregado o método AHP. Para garantir a consistência e a objetividade matemática na derivação dos pesos, foi utilizada uma calculadora AHP online (disponível em <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php?lang=pt>). Nela, os critérios são comparados par a par, e esse julgamento foi embasado na importância relativa já estabelecida e validada por Ladislau *et al.*, (2021) para uma região análoga. Uma etapa fundamental do método AHP é a verificação da coerência dos julgamentos por meio do cálculo do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC). Conforme preconiza Saaty (1991), um valor de RC inferior a 0,10 (ou 10%) indica que a matriz de julgamento é consistente e confiável. A combinação de pesos adotada neste estudo resultou em uma RC dentro do limite aceitável, validando a hierarquização dos critérios utilizados.

Tabela 2 - Notas e pesos atribuídos as variáveis analisadas no estudo da região do Quadrilátero Ferrífero

Variável	Categoria	Notas das Classes	Peso das Variáveis
Declividade (%)	Plano (0 a 3%)	5	17%
	Suave ondulado (3 a 8%)	7	
	Ondulado (8 a 20%)	7	
	Forte ondulado (20 a 45%)	5	
	Montanhoso (45 a 75%)	3	
	Escarpado (acima de 75%)	1	
Altimetria (metros)	entre 443 e 939	7	8,33 %
	entre 940 e 1.107	5	
	entre 1.107 e 1.286	5	
	entre 1.286 e 1.518	3	
	acima de 1.518	1	
Uso do solo	Formação Florestal	5	27,38 %
	Formação Savânica	5	
	Silvicultura	7	
	Campo Alagado e Área Pantanosa	1	
	Formação Campestre	5	
	Pastagem	7	
	Mosaico de Usos	7	
	Área Urbanizada	1	
	Outras Formações Naturais	3	
	Afloramento Rochoso	1	
Mineração	3		

	Corpos Hídricos	1	
	Lavouras Temporárias	7	
	Café	5	
Temperatura (°C)	até 20,88	3	
	entre 20,88 e 21,2	5	8,33 %
	acima de 21,2	7	
Precipitação (mm)	até 1488	7	
	entre 1488 e 1532	5	9,52 %
	acima de 1532	1	
Distância a Rodovias (km)	até 1	7	
	entre 1 e 2,5	5	26,19 %
	entre 2,5 e 5,0	3	
	acima de 5,0	1	

Fonte: Autora, 2025 (adaptado de Ladislau *et al.*, 2021)

Com os mapas de critérios devidamente reclassificados (com as notas) e os pesos definidos via AHP, foi realizada a sobreposição ponderada, gerando um raster contínuo que representa o índice de vulnerabilidade às queimadas na área de estudo. Em seguida, o índice foi classificado em cinco categorias: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto (Tabela 3), com base na distribuição dos valores e intervalos definidos por quantis. Essa abordagem permitiu a análise espacial dos padrões de risco durante os anos classificados como El Niño e La Niña, com foco na sobreposição entre vulnerabilidade e os focos de calor detectados por satélite.

Tabela 3 - Classificação do índice de Vulnerabilidade às Queimadas no Quadrilátero Ferrífero, 2025

Valor do Índice	Categoria de Vulnerabilidade
1	Muito Baixa
2	Baixa
3 e 4	Média
5	Alta
6 e 7	Muito Alta

Fonte: Autora, 2025.

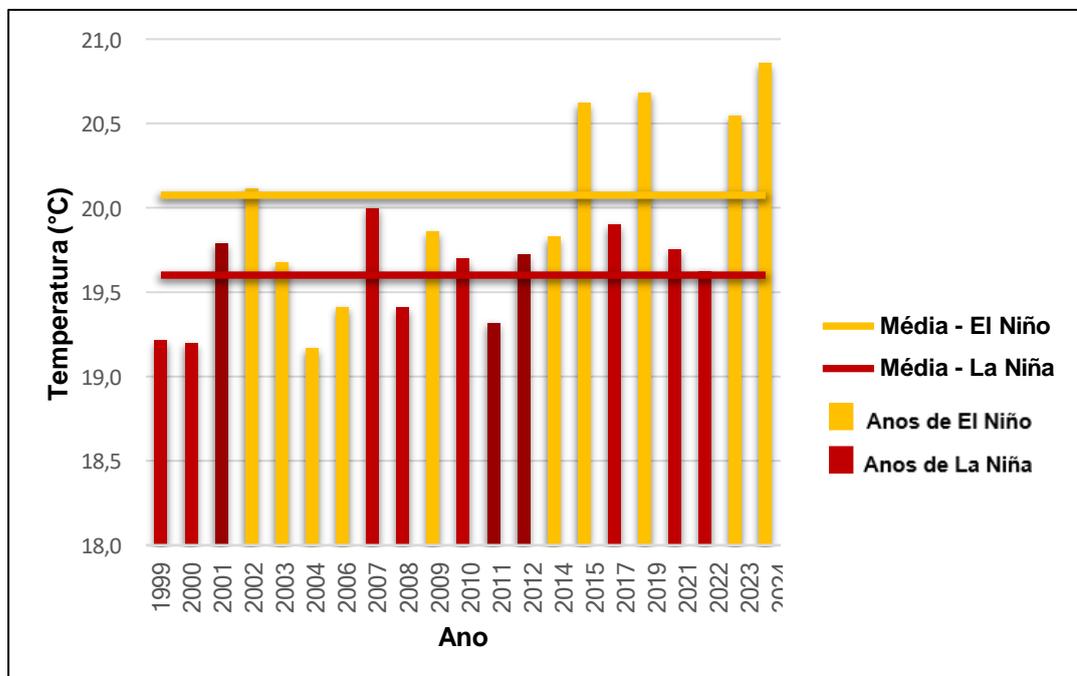
5 RESULTADOS

5.1 Comparação dos Padrões Climáticos nas Fases de El Niño e La Niña

A influência do fenômeno ENOS sobre os padrões climáticos do Quadrilátero Ferrífero foi analisada a partir da comparação entre os anos classificados como El Niño e La Niña, considerando três variáveis principais: temperatura média, precipitação acumulada e umidade relativa do ar. Essa análise foi realizada com base em médias anuais e também restrita ao período crítico (abril a outubro – 1999 a 2024), mais propenso para a ocorrência de queimadas.

O Gráfico 1 mostra a evolução da temperatura média anual ao longo dos anos, com destaque para as médias específicas das fases de El Niño e La Niña. Observa-se que anos como 2015, 2019, 2023 e 2024, todos associados ao El Niño, figuraram entre os mais quentes do período analisado, reforçando a associação entre o fenômeno e o aquecimento regional.

Gráfico 1 - Temperatura média anual entre os anos de 1999 - 2024 e média por fases de ENOS



Fonte: Autora, 2025.

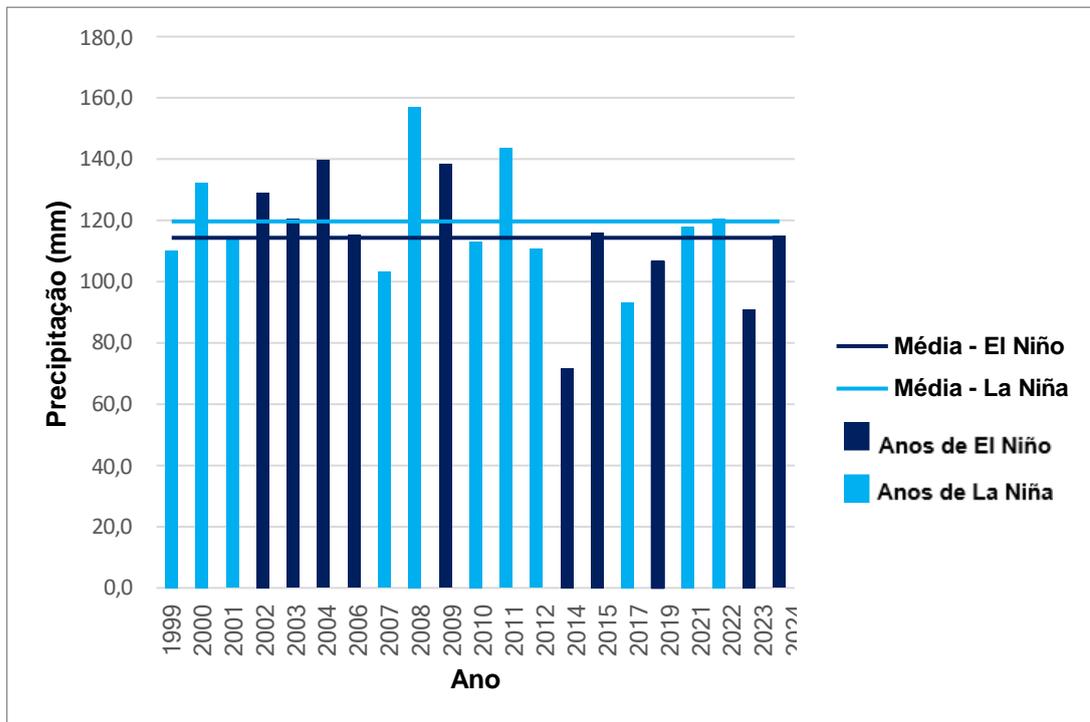
A análise do gráfico de temperatura, evidenciou uma clara e progressiva tendência de aquecimento. Embora a série histórica apresente oscilações anuais, a trajetória geral das temperaturas é ascendente. Os anos de El Niño corresponderam aos picos de temperatura, enquanto os anos de La Niña representaram períodos de resfriamento relativo. A temperatura média nos anos de El Niño situou-se em aproximadamente 20,1 °C, ao passo que nos anos de La Niña, a média é de cerca de 19,6 °C.

A tendência de longo prazo aponta para uma intensificação do aquecimento. Os picos de temperatura registrados nos anos mais recentes, como em 2015 e no período 2023-2024, superaram significativamente os patamares observados no início da série, ultrapassando a marca de 20,5 °C.

Outro aspecto notável é a elevação da própria linha de base térmica. Anos de La Niña recentes apresentaram temperaturas comparáveis ou até superiores às de anos de El Niño no início do período, indicando que mesmo os patamares considerados "frios" estão se tornando mais quentes. Dessa forma, os dados indicaram que o aquecimento não ocorre de maneira uniforme, mas através de uma sobreposição da variabilidade climática natural a uma tendência de aquecimento fundamental.

A análise da precipitação, Gráfico 2, revelou um padrão de variabilidade interanual ligado às fases do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Diferentemente do observado para a temperatura, não se identificou uma tendência linear clara de aumento ou diminuição da precipitação ao longo de toda a série histórica. A característica predominante foi a oscilação acentuada dos volumes pluviométricos.

Gráfico 2 – Precipitação média anual entre os anos de 1999 - 2024 e médias por fase de ENOS



Fonte: Autora, 2025.

Observou-se uma correlação direta e visível entre os anos de La Niña e os maiores volumes de chuva. Anos como 2000, 2008 e 2011, classificados como La Niña, destacaram-se como os mais chuvosos do período, com precipitações que ultrapassam 140 mm, chegando a picos próximos de 160 mm em 2008. A linha de "Média - La Niña" situou-se em um patamar superior, em aproximadamente 120 mm, confirmando quantitativamente que esta fase do fenômeno tende a resultar em condições de maior volume pluviométrico.

Em contrapartida, os anos de El Niño estiveram associados a uma redução da precipitação. Anos como 2006 e, de forma mais acentuada, 2014, 2019 e 2023, apresentaram os menores índices pluviométricos da série, com valores frequentemente abaixo de 120 mm. O ano de 2014, em particular, registrou um dos volumes mais baixos, próximo de 70 mm. A "Média - El Niño", posicionada em torno

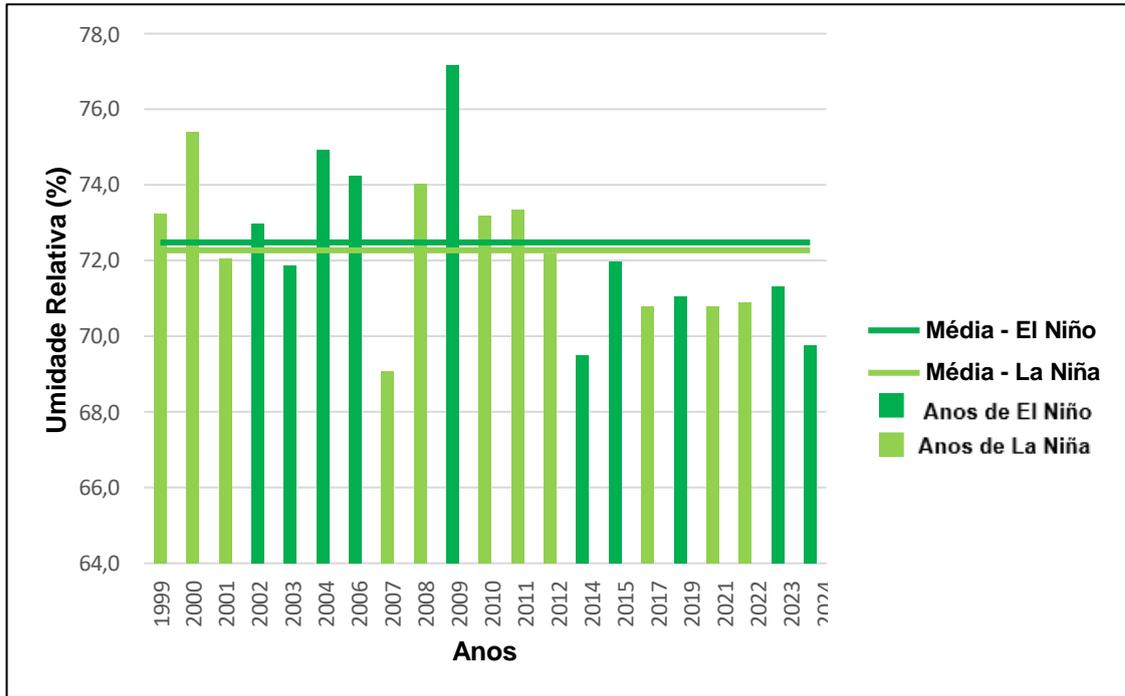
de 115 mm, é visivelmente inferior à média de La Niña, o que reforça o padrão de condições mais secas durante os eventos de El Niño.

Em suma, a análise do gráfico de precipitação demonstrou que a principal tendência não é de caráter progressivo (aumento ou diminuição contínua), mas sim cíclico e responsivo às fases do ENOS. Anos de La Niña estiveram associados a um aumento significativo da pluviosidade, enquanto anos de El Niño corresponderam a períodos de estiagem ou redução dos volumes de chuva. A ausência de uma tendência linear de longo prazo sugere que, para a variável precipitação neste horizonte temporal, a variabilidade climática natural de curto e médio prazo se sobrepõe a qualquer sinal de mudança climática de longo prazo.

Quanto à umidade relativa do ar, o Gráfico 3 indicou um comportamento de notável variabilidade ao longo dos anos, sem a manifestação de uma tendência linear de aumento ou declínio.

De modo geral, observou-se que os anos de La Niña, como 2000 e 2008, tenderam a apresentar índices de umidade relativa maiores, consistentemente acima ou próximos da média geral para o evento.

Gráfico 3 – Umidade relativa média anual entre os anos de 1999 - 2024 e médias por fases de ENOS



Fonte: Autora (2025).

Por outro lado, os anos de El Niño exibiram um padrão mais heterogêneo. Embora alguns desses anos, como 2012, 2019 e 2024, tenham registrado os valores mais baixos de umidade da série, confirmando a tendência de condições mais secas, houve exceções significativas. O ano de 2009, classificado como El Niño, destacou-se como uma notável anomalia nesse padrão, pois registrou o pico máximo de umidade relativa de todo o período, atingindo aproximadamente 77%. Este evento atípico sugeriu que, embora o ENOS fosse um fator influente, outros sistemas meteorológicos ou condições regionais podem ter atuado de forma a sobrepor seus efeitos naquele ano específico, resultando em umidade elevada apesar da ocorrência de um El Niño.

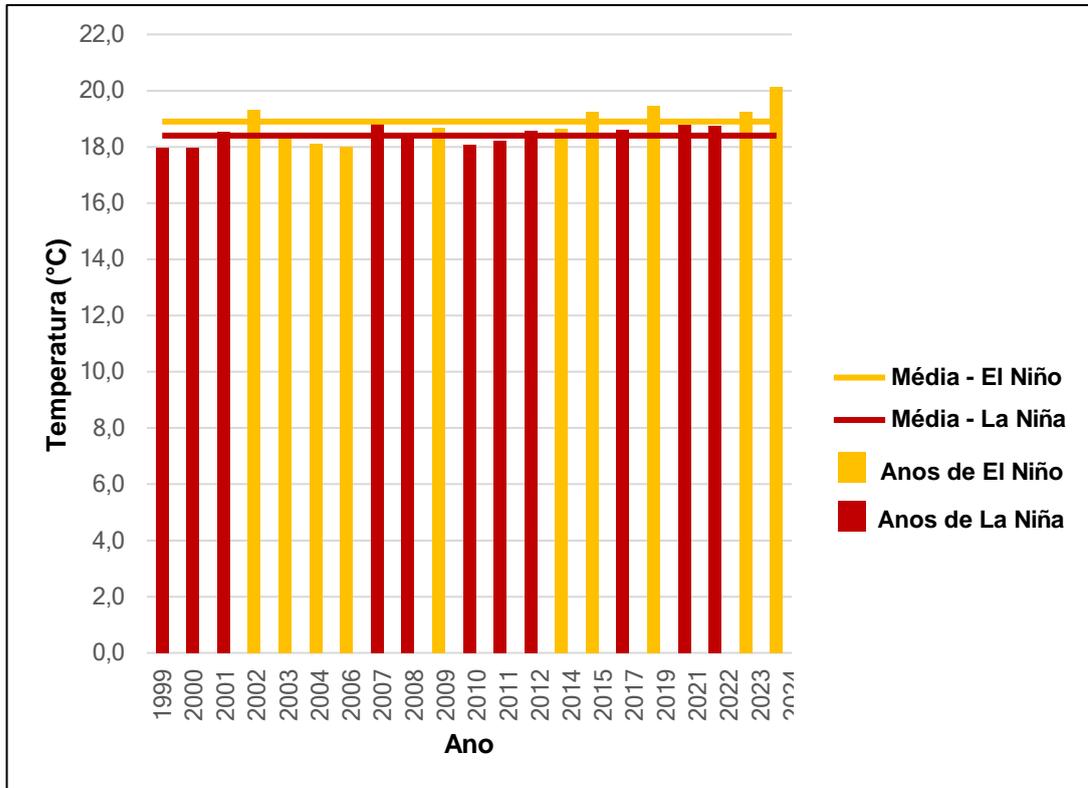
Em síntese, a análise da umidade relativa revelou um padrão oscilatório dominado pela variabilidade interanual. A tendência principal indicou que anos de La Niña foram mais úmidos, enquanto anos de El Niño tenderam a ser mais secos. Contudo, a ocorrência de um pico de umidade durante o El Niño de 2009 demonstrou que a relação entre o ENOS e a umidade relativa não foi homogênea, sendo suscetível a

outras influências climáticas que podem gerar desvios significativos do padrão esperado.

Assim, os resultados obtidos para o ano civil completo forneceram um panorama geral das diferenças climáticas médias entre os anos de El Niño e La Niña. No entanto, tendo em vista que os impactos das variações climáticas sobre a ocorrência de queimadas se manifestam de forma mais acentuada durante os meses mais secos do ano, foi realizada uma análise específica do período entre abril e outubro (1999 a 2024). Esse recorte buscou apresentar com maior clareza a influência das variáveis climáticas — temperatura, precipitação e umidade relativa — sobre a inflamabilidade da vegetação. Para isso, foram utilizados os mesmos dados e critérios de classificação por fase do ENOS já descritos anteriormente.

A análise do Gráfico 4, que apresenta a temperatura média especificamente para o período crítico, revelou tendências alinhadas com o aquecimento geral observado no Gráfico 1. Assim como na média anual, foi identificada uma tendência de aquecimento progressivo ao longo do período. Os anos mais recentes da série, especialmente a partir de 2015, registraram as temperaturas mais elevadas, com o ano de 2024 se destacando como o ponto máximo, atingindo um valor superior a 20,0 °C de média. Isso demonstrou que o sinal de aquecimento não se restringiu à média geral, mas foi também proeminente durante os meses críticos do período seco.

Gráfico 4 - Temperatura média no período seco (abr - out) por ano e médias por fase de ENOS

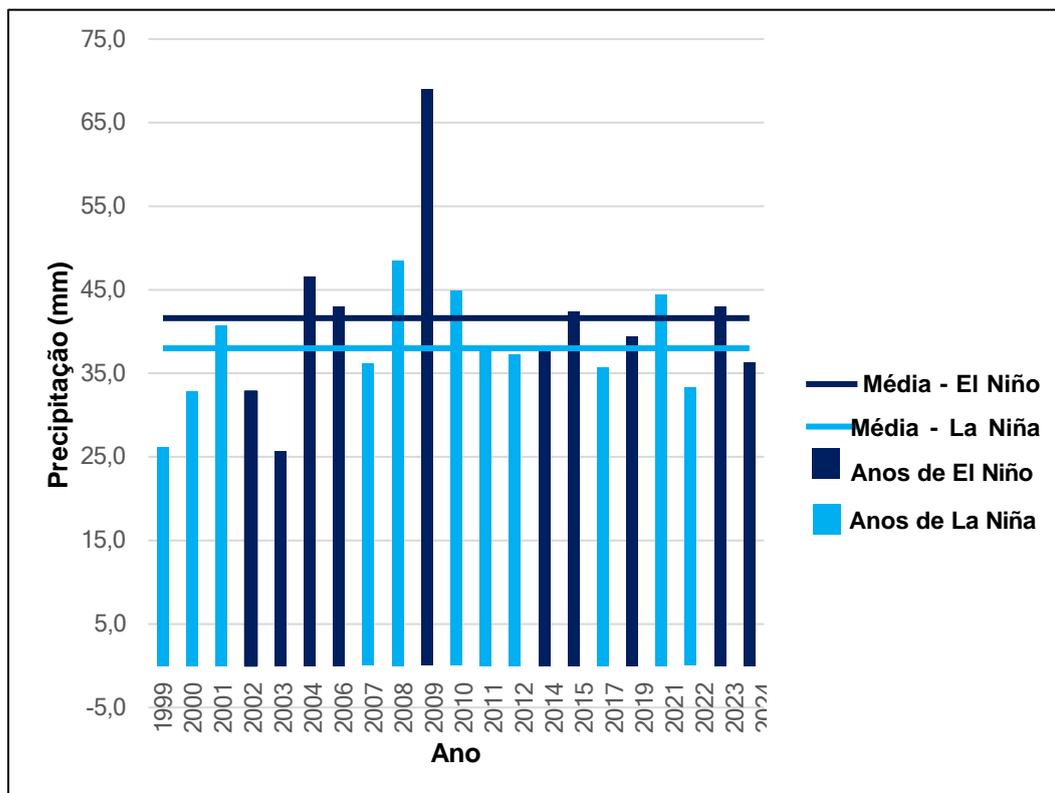


Fonte: Autora, 2025.

A análise do Gráfico 5, que retrata a precipitação média, não revelou uma tendência linear de aumento ou diminuição dos volumes pluviométricos ao longo do tempo. A principal característica observada foi uma forte variabilidade interanual, cujo comportamento esteve distintamente associado às fases do fenômeno ENOS.

Foi verificado que os anos de El Niño foram associados a volumes de precipitação mais elevados durante a estação seca. Eventos como os de 2004, 2009 e 2023 se destacaram com alguns dos maiores índices do período, superando 40 mm. A "Média - El Niño", posicionada em um patamar superior, em aproximadamente 42 mm, corroborou quantitativamente a observação de que esta fase do fenômeno tendeu a resultar em um período seco mais úmido que o normal.

Gráfico 5 - Precipitação média no período seco (abr - out) por ano e médias por fase de ENOS



Fonte: Autora, 2025.

Em contrapartida, os anos de La Niña tenderam a apresentar condições mais secas que a média histórica para este período. Anos como 2000, 2017 e 2021 registraram volumes de chuva significativamente mais baixos. A linha de "Média - La Niña", situada em torno de 38 mm, foi visivelmente inferior à média de El Niño, confirmando o padrão de uma estação seca com menor volume de chuvas durante a ocorrência deste fenômeno.

Esse comportamento representou uma notável inversão do padrão observado na precipitação média anual (Gráfico 2), na qual La Niña resultava em condições gerais mais chuvosas e El Niño em mais secas. Essa maior variabilidade intraestacional pode estar relacionada à atuação de sistemas de bloqueio ou eventos convectivos isolados.

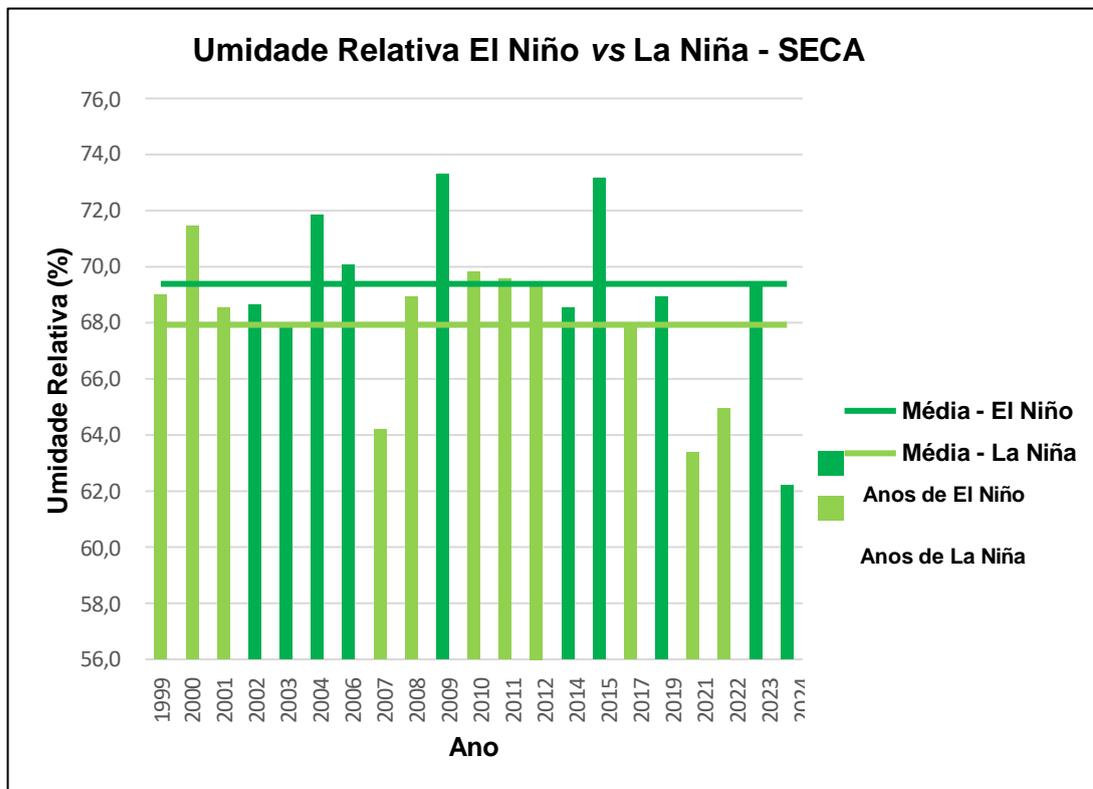
Por fim, a análise da umidade relativa (Gráfico 6) não identificou uma tendência linear de longo prazo, seja de aumento ou de redução. O comportamento da variável foi caracterizado por uma expressiva oscilação interanual, com uma clara distinção entre as fases do fenômeno ENOS.

Foi observado que os anos de El Niño foram consistentemente associados a uma maior umidade relativa durante a estação seca. Anos como 2004, 2009 e 2015 se destacaram com picos de umidade, superando os 72%. A "Média - El Niño", situada em um patamar superior de aproximadamente 69,5%, confirmou essa tendência, indicando que a ocorrência do fenômeno tendeu a resultar em um período seco mais úmido.

Em contraste, os anos de La Niña corresponderam, em sua maioria, a períodos com menor umidade relativa. Anos recentes, como 2021 e 2022, registraram alguns dos valores mais baixos da série. A linha de "Média - La Niña", posicionada em torno de 68,0%, foi nitidamente inferior à média de El Niño, o que reforçou o padrão de condições mais secas durante esta fase do ENOS na estação seca.

Este padrão observado no período seco foi mais claro e pronunciado do que o verificado na média anual (Gráfico 3), onde as médias de ambas as fases foram muito próximas.

Gráfico 6 - Umidade relativa média no período seco (abr - set) por ano e médias por fase de ENOS



Fonte: Autora, 2025.

A comparação entre o recorte anual e o sazonal (abril a outubro – 1999 a 2024) aponta para um padrão climático no QFe, especialmente em relação à temperatura. Em ambos os recortes, os anos classificados como El Niño apresentaram temperaturas médias mais elevadas do que os anos de La Niña. Por outro lado, as variáveis precipitação e umidade relativa do ar (UR) apresentaram diferenças mais discretas: no agregado anual, os anos de El Niño registraram uma leve redução nos totais de precipitação e UR ligeiramente superior; no período seco, o contraste térmico se manteve, acompanhado por chuvas residuais um pouco mais intensas e valores de UR também discretamente mais altos.

Esse comportamento é coerente com os padrões de variabilidade interanual associados ao ENOS. De acordo com o IPCC (2021), o El Niño provoca efeitos significativos no aumento da temperatura global e regional, mas as respostas da precipitação e da umidade relativa são mais heterogêneas, influenciadas por fatores como localização geográfica, estação do ano e intensidade do evento. No Sudeste do

Brasil, a circulação atmosférica durante episódios de El Niño pode favorecer o transporte de vapor d'água e a formação de sistemas meteorológicos que mantêm a umidade do ar ligeiramente mais elevada, mesmo em períodos mais secos.

Além disso, episódios de El Niño mais intensos, como os registrados em 2015 e 2023-2024, classificados com base no índice ONI (Oceanic Niño Index), têm maior potencial de reorganizar a convecção tropical e a circulação atmosférica sobre a América do Sul. Tais alterações favorecem a atuação de sistemas como frentes frias, cavados e o Jato de Baixos Níveis Sul-Americano (SALLJ), que intensifica o transporte de umidade da Amazônia em direção ao Sudeste (MONTINI *et al.*, 2018).

Conforme demonstrado por Montini *et al.*, (2018), a frequência e a intensidade do SALLJ aumentam significativamente durante anos de El Niño, sobretudo na primavera, promovendo pulsos de umidade e maior cobertura de nuvens, o que pode elevar a UR média mesmo no período seco. Em contrapartida, nos anos de La Niña, a circulação regional tende a ser menos favorável à advecção de umidade, contribuindo para estiagens mais persistentes e valores de UR mais baixos por períodos prolongados.

No contexto regional de Minas Gerais, a literatura também aponta que a resposta do regime climático ao ENOS é espacialmente variável. Ainda segundo Minuzzi *et al.* (2005), diferentes setores do estado podem apresentar comportamentos distintos, com áreas registrando chuvas acima ou abaixo da média dentro de um mesmo evento climático.

Durante o período seco, a estabilidade atmosférica é geralmente dominante, mas a dinâmica observada nos dados sugeriu que, em anos de El Niño, frentes frias vindas do sul conseguiram romper o bloqueio de massas de ar seco com maior frequência. Ao encontrarem as barreiras montanhosas do Quadrilátero Ferrífero, essas massas de ar foram forçadas a ascender, resfriando-se e gerando precipitação de natureza orográfica. Este mecanismo pode explicar por que, durante a estação seca, os anos de El Niño registraram um aumento no volume pluviométrico. Inversamente, em anos de La Niña, o fortalecimento do sistema de alta pressão pode ter dificultado o avanço

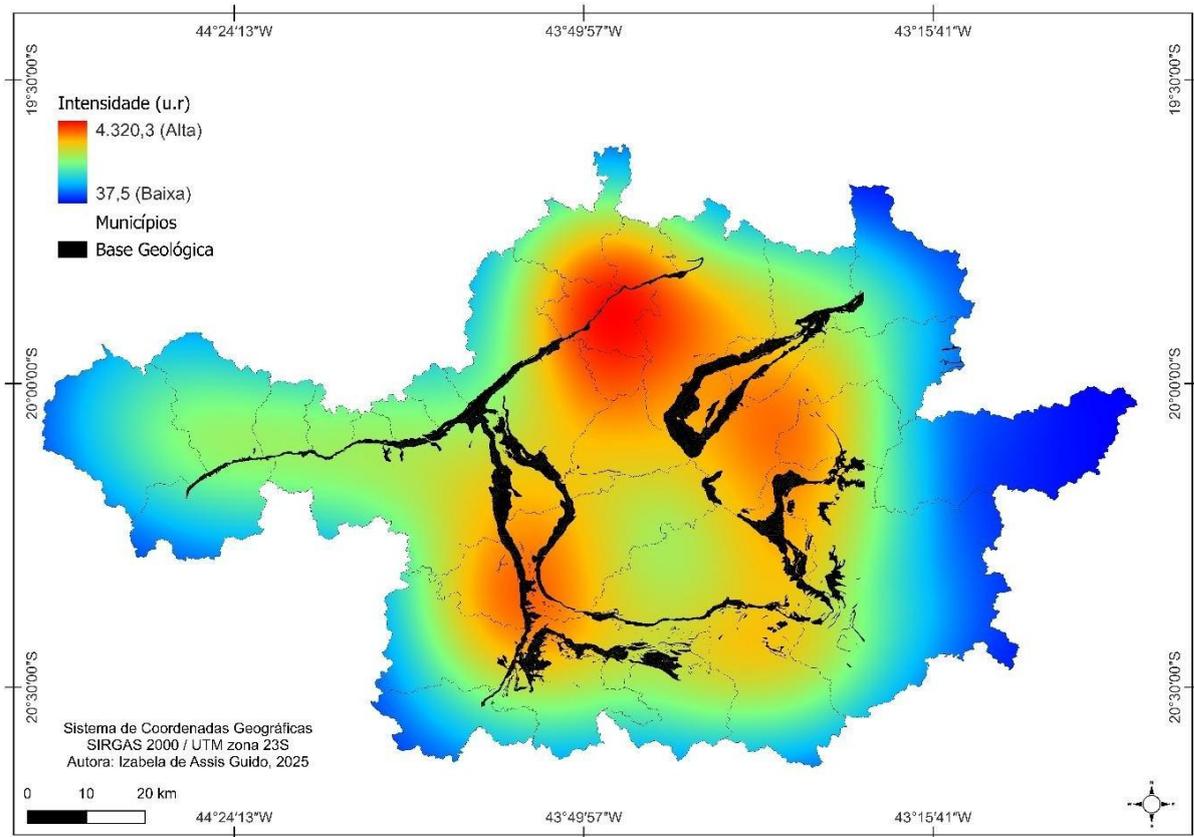
dessas frentes, resultando em um período seco ainda mais intenso e com menor precipitação.

5.2 Variação da Ocorrência de Queimadas em Diferentes Fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no Quadrilátero Ferrífero.

A análise da ocorrência anual de queimadas no QFe mostra uma diferenciação no comportamento espacial e quantitativo dos focos de calor entre os anos classificados como El Niño e La Niña. Durante o recorte anual de 1999 a 2024, a análise quantitativa dos focos de calor na região revelou que os anos de El Niño registraram, em média, 3.468 eventos anuais, total de 34.681 focos, enquanto nos anos de La Niña a média caiu para 1.896 focos por ano (20.858 no total), indicando um aumento de 83 % na frequência de eventos sob influência de El Niño. Paralelamente, o pico médio de intensidade, medido em unidades radiométricas (u.r.), apresentou valor de 4.320,3 u.r. em El Niño, contra 2.558,1 u.r. em La Niña – acréscimo de 69 % na energia calorífica detectada. Os resultados quantitativos indicam provável influência entre as anomalias dos fenômenos e a dinâmica de incêndios na região.

Nos anos de El Niño, observa-se uma concentração mais difusa e abrangente dos focos de calor, conforme Figura 5, com destaque para o setor norte-central da região, especialmente nos municípios de Sabará, Raposos, Caeté, Barão de Cocais e Santa Bárbara. Nessas localidades, os mapas indicam valores médios de intensidade entre 3.300 e 4.200 unidades radiométricas (u.r.), com núcleos pontuais em vermelho intenso indicando picos próximos a 4.320 u.r., os mais elevados de toda a série analisada. Essa distribuição sugere a atuação de múltiplos fatores combinados, como relevo suavemente ondulado, áreas de transição urbano-rural e presença de corredores de vegetação fragmentada, que favorecem tanto a ignição quanto a propagação do fogo durante os períodos mais secos.

Figura 5 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de El Niño – recorte anual de 1999 a 2024



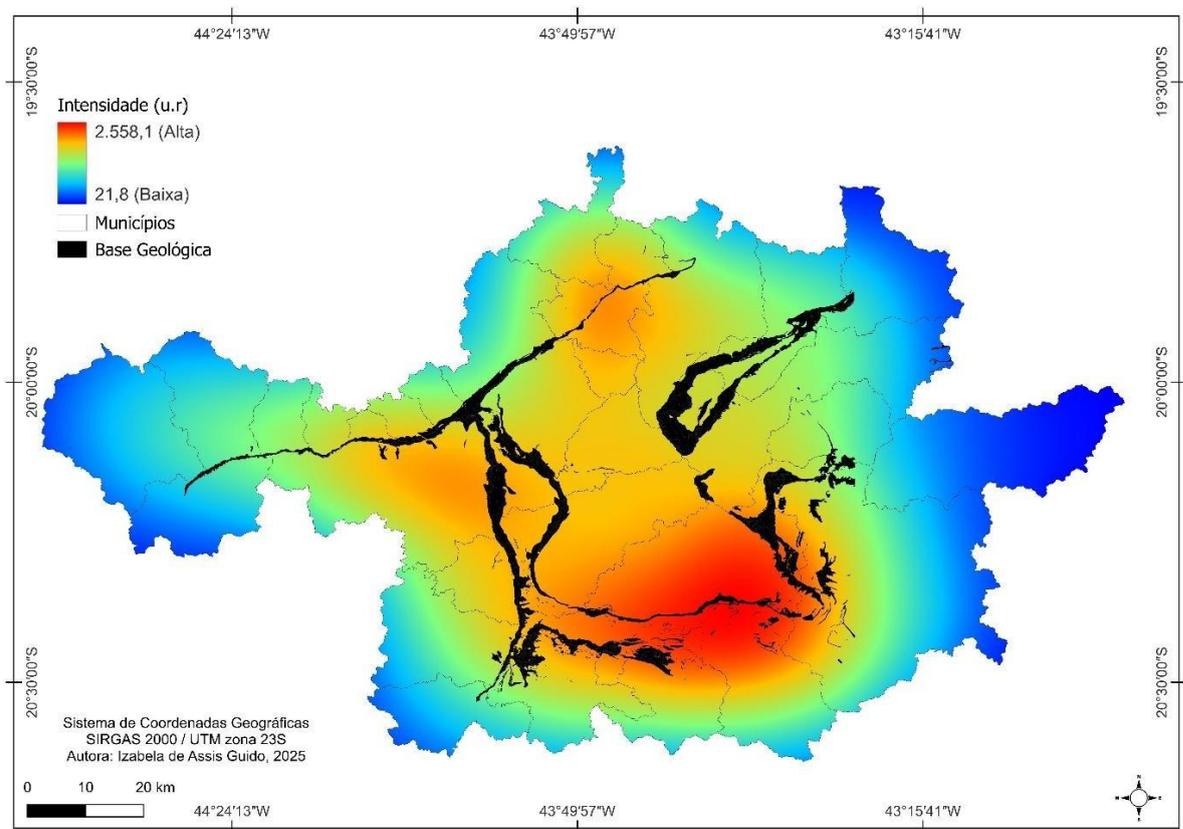
Fonte: Autora, 2025.

A porção sudoeste, envolvendo os municípios de Brumadinho, Moeda e Itabirito, também apresenta um corredor contínuo de alta densidade de focos durante El Niño, com intensidade variando entre 2.400 e 3.700 u.r. É possível inferir, de acordo com os dados, que a presença de grandes empreendimentos minerários e de uso agropecuário extensivo nessa faixa contribui para o aumento da suscetibilidade ao fogo. Ainda no setor Sul do QFe, cidades como Congonhas, Ouro Branco e Ouro Preto aparecem com níveis médios de intensidade (entre 2.100 e 3.200 u.r.), embora de forma menos concentrada que nas áreas centrais.

Durante os anos de La Niña (Figura 6), por outro lado, a distribuição dos focos de calor assume uma configuração mais concentrada. O núcleo principal de maior intensidade está visivelmente centrado nos municípios de Ouro Preto, Ouro Branco e

Mariana, com valores que atingem entre 1.900 e 2.558 u.r., conforme indicado pela mancha vermelha intensa na região sul do mapa. Esse núcleo é mais compacto em comparação ao padrão de El Niño, porém revela uma área de calor significativa, mesmo em um contexto de maior disponibilidade hídrica, sugerindo a atuação de fatores estruturais, como o uso intensivo do solo e a topografia favorável à concentração de biomassa.

Figura 6 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de El Niño – recorte anual de 1999 a 2024



Fonte: Autora, 2025.

Ao Norte, os municípios de Sabará, Santa Luzia e Caeté ainda apresentam focos de calor durante La Niña, mas com intensidade média entre 1.500 e 2.100 u.r., e distribuição mais dispersa. Já, na porção Oeste, localidades como Igarapé, Sarzedo e Mateus Leme permanecem com baixíssima atividade térmica em ambas as fases, com valores inferiores a 1.900 u.r., consistentes com a predominância de áreas urbanizadas e maior cobertura de vegetação em estágio médio de regeneração.

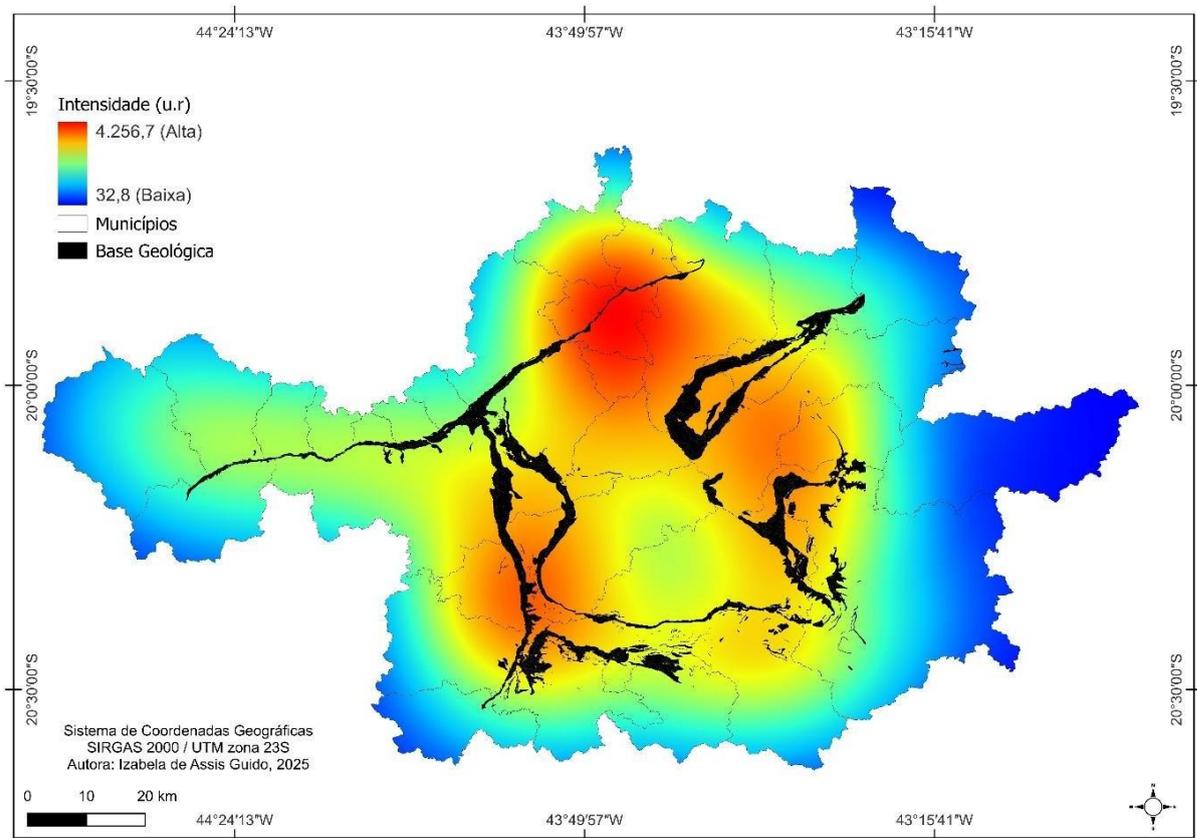
As bordas Leste e Nordeste, compreendendo municípios como Alvinópolis, São Gonçalo do Rio Abaixo e Catas Altas, mantêm padrões de intensidade geralmente baixos em ambas as fases, variando entre 100 e 1.000 u.r., com exceção de pontos isolados em Santa Bárbara, Catas Altas e Barão de Cocais que, em El Niño, atingem níveis médios de radiação.

A análise anual revela que os episódios de El Niño promovem uma maior dispersão espacial dos focos de calor, com múltiplos núcleos de intensidade moderada a alta ao longo de eixos centrais e norte da região, enquanto La Niña, embora menos severa em termos de frequência, concentra a atividade térmica em um núcleo de elevada intensidade no sul do QFe.

Durante o período crítico para a ocorrência de queimadas (abril a outubro – 1999 a 2024), a dinâmica dos focos de calor no QFe mostra uma organização espacial semelhante em relação à distribuição anual. Os dados qualitativos revelam um comportamento similar ao observado na escala anual. Os anos de La Niña concentraram 19.982 focos, com média de 1.817 focos por ano na estação crítica, enquanto os anos de El Niño somaram 33.634 focos, com média de 3.363 focos por ano. No que se refere à intensidade dos focos, observa-se que em La Niña, o pico de intensidade atinge valores próximos de 2.448,1 u.r.; já em El Niño, a intensidade máxima é mais alta, aproximadamente $\sim 4.256,7$ u.r..

Em eventos de El Niño, o núcleo de maior intensidade de focos no período seco está localizado na porção centro-norte do QFe, abrangendo principalmente os municípios de Sabará, Santa Luzia, Caeté e Raposos. Nessa região, observa-se um aglomerado denso de radiação moderada a alta, com valores entre 3.000 e 4.250 u.r., indicando um padrão de ignições favorecido por topografia suave, transição urbano-rural e fragmentação da cobertura vegetal. Um segundo eixo de concentração se estende pela faixa sudoeste, passando por Itabirito, Moeda, Belo Vale e Congonhas, com intensidade média entre 1.000 e 1.600 u.r., associada a áreas mineradas e pastagens expostas. O mapa de calor para análise espacial em anos de El Niño (abril a outubro – 1999 a 2024) é apresentada na Figura 7.

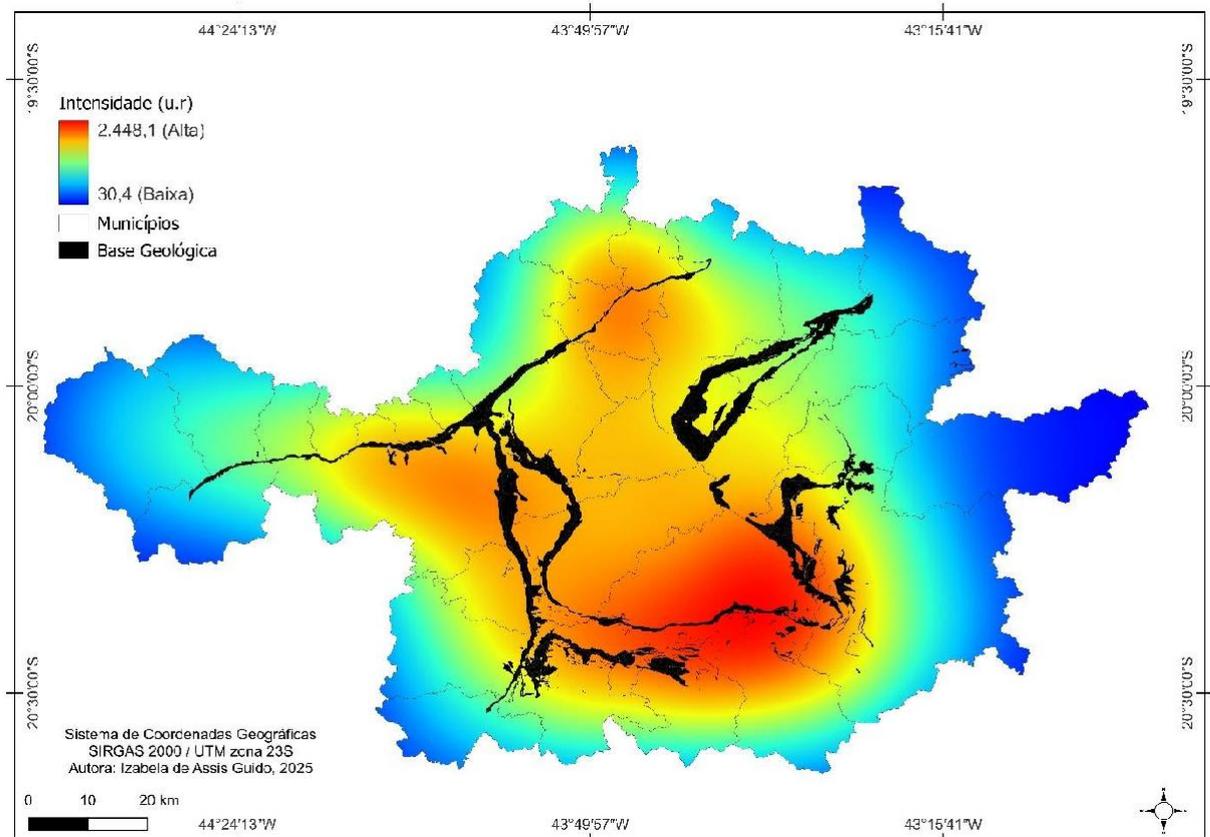
Figura 7 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de El Niño – recorte de abril a outubro (1999 a 2024)



Fonte: Autora, 2025.

Em contrapartida, nos anos de La Niña (Figura 8), a mancha principal de intensidade máxima desloca-se de forma evidente para o setor sul-sudeste, centrado nos municípios de Ouro Preto, Ouro Branco, Mariana, Itabirito e Catas Altas. Essa porção apresenta o maior valor de intensidade registrado (2.448,1 u.r.), forte concentração de focos. O padrão sugere que, mesmo com temperaturas médias mais baixas, a combinação entre com outros fatores é propícia para a ocorrência de queimadas. Essa faixa é também uma zona historicamente pressionada por atividades minerárias, estradas e expansão urbana, o que amplia as fontes potenciais de ignição.

Figura 8 - Focos de calor no Quadrilátero Ferrífero em períodos de ocorrência de La Niña – recorte de abril a outubro (1999 a 2024)



Fonte: Autora, 2025.

As bordas Oeste e Leste do QFe, novamente, mantêm-se como áreas de baixa intensidade térmica durante ambas as fases. Municípios como Itatiaiuçu, Igarapé, São Gonçalo do Rio Abaixo e Alvinópolis apresentaram radiância inferior a 1000 u.r.

Por fim, a faixa noroeste, envolvendo municípios como Belo Horizonte e Ibrité, apresentou comportamento intermediário. Em El Niño, os valores médios variaram entre 710 e 1.400 u.r., enquanto em La Niña possui intensidade um pouco menor (entre 600 e 1.030 u.r.).

A análise da ocorrência de focos de calor no QFe entre 1999 e 2024 identificou que os episódios de El Niño e La Niña influenciam de maneira distinta tanto a frequência quanto a intensidade das queimadas, com variações significativas no

espaço. No recorte anual, os anos de El Niño apresentaram maior número total de focos (34.681) e valores altos de intensidade radiométrica (4.320,3 u.r.), além de uma distribuição mais abrangente ao longo do território, com destaque para os setores central-norte e sudoeste. Já durante os anos de La Niña, a atividade térmica mostrou-se mais concentrada, com um núcleo bem definido no setor sul-sudeste, embora com menor número total de focos (20.858) e intensidade máxima inferior (2.558,1 u.r.).

No período crítico (abril a outubro), os padrões se mantiveram: El Niño apresentou maior influência, com 33.634 focos registrados, representando aproximadamente 96% das ocorrências registradas em relação ao total anual; enquanto La Niña somou 19.983 focos, sendo 95% de concentração total anual. No recorte sazonal, os focos de El Niño não só foram mais numerosos, mas também apresentaram pico de intensidade superior (4.256,6 u.r. contra 2.448,1 u.r. em La Niña), destacando-se como o período de maior atividade térmica.

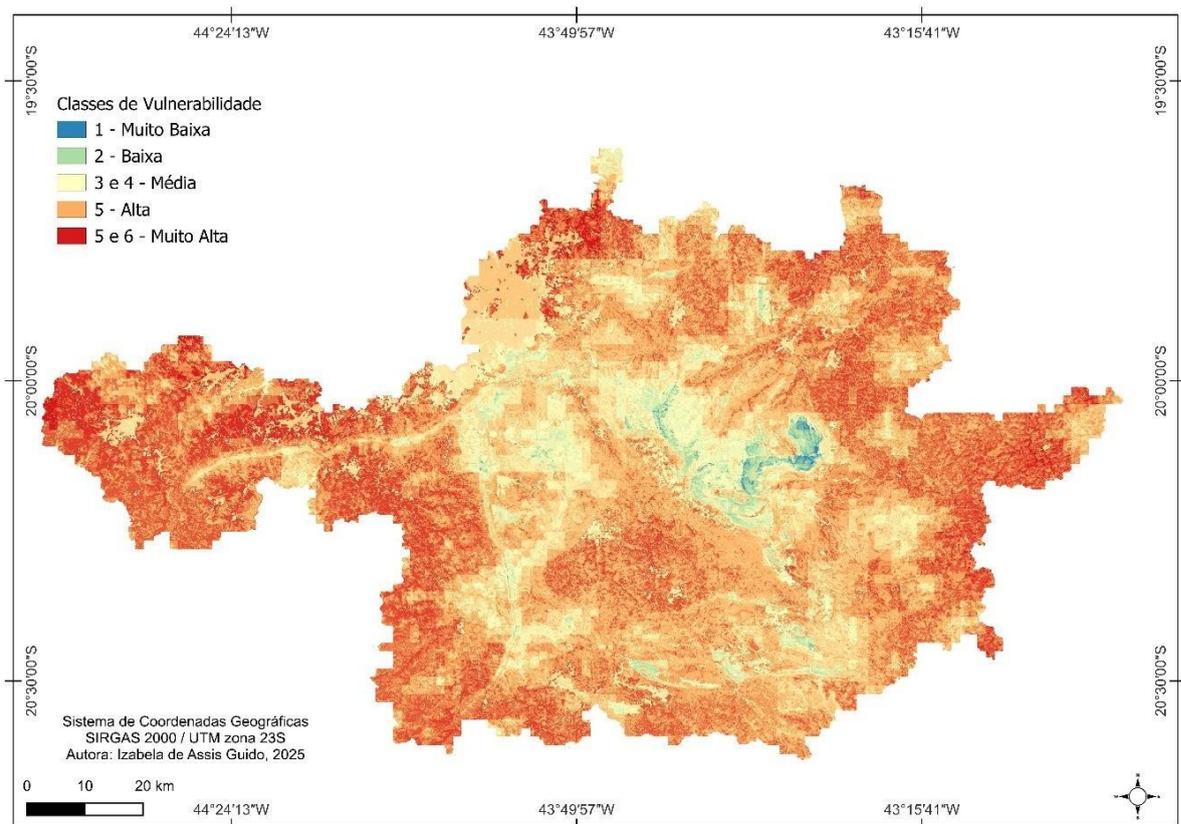
Vale ressaltar que, a atuação do ENOS não ocorre isoladamente, mas sim em conjunto com outros fatores, como a dinâmica de uso e ocupação do solo, que amplifica ou atenua seus efeitos climáticos. Mesmo em anos com condições meteorológicas menos extremas, a presença de pastagens degradadas, áreas mineradas, estradas e vegetação secundária facilita a propagação de queimadas — enquanto a ausência de políticas públicas eficazes de prevenção e fiscalização contribui para sua recorrência. Dessa forma, os resultados observados refletem tanto a influência parcial dos eventos do ENOS quanto a ação contínua de fatores estruturais e humanos, que afetam a intensidade e distribuição espacial dos focos de calor no Quadrilátero Ferrífero

5.3 Fatores Condicionantes da Vulnerabilidade às Queimadas durante El Niño e La Niña

A análise multicritério de vulnerabilidade às queimadas no Quadrilátero Ferrífero, apresentada na Figura 9, permitiu conhecer de forma espacializada os principais fatores físicos e antrópicos que condicionam o risco de incêndios em cenários modulados pelas fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Os critérios utilizados foram ponderados com base na matriz AHP, sendo atribuídos os seguintes pesos relativos: uso e ocupação do solo (27,38%), distância às rodovias (26,19%), declividade (17%),

precipitação (9,52%), temperatura (8,33%) e altimetria (8,33%). A análise espacial dos resultados mostrou que os dois primeiros critérios — de natureza diretamente antrópica — tiveram maior influência na configuração do índice final, refletindo a forte associação entre pressão humana, ocupação do território e ocorrência de queimada.

Figura 9 – Mapa de Vulnerabilidade a Ocorrência de Queimadas na região do Quadrilátero Ferrífero, 2025



Fonte: Autora, 2025.

O uso e ocupação do solo, variável de maior peso, se destacou como o principal condicionante da vulnerabilidade. Áreas classificadas como pastagens, mosaicos de uso agropecuário, lavouras temporárias e silvicultura foram atribuídas com nota máxima (7), devido à elevada carga de biomassa seca e à frequência de manejo humano. Tais usos predominam em porções dos municípios como de Mariana, Barão

de Cocais, Santa Bárbara, Itabirito e Brumadinho, onde a combinação de vegetação antropizada, fragmentação de habitats e proximidade com áreas urbanas contribui significativamente para o risco de ignição e propagação do fogo. Em contraste, áreas ocupadas por formações florestais, savânicas e campestres, bem como zonas alagadas, corpos hídricos e afloramentos rochosos, foram classificadas com notas entre 1 e 5, resultando em vulnerabilidade média a muito baixa, a depender da interação com outros fatores ambientais.

A distância às rodovias, segundo critério mais influente (26,19%), apresentou relação direta com o risco de queimadas. Áreas localizadas a até 1 km das vias foram atribuídas com nota 7, concentrando-se principalmente nos corredores viários da BR-040, BR-356, MG-129 e MG-030, que cortam regiões densamente ocupadas como Nova Lima, Congonhas, Itabirito Sabará e Ouro Branco. A proximidade a essas rodovias favorece a ocorrência de ignições por ação antrópica direta, como descarte de resíduos, uso de fogo para limpeza de terrenos, faíscas de veículos e “bitucas” de cigarro. Já as áreas mais afastadas das rodovias (> 5 km), localizadas em trechos de Catas Altas, Serra do Gandarela e Caraça, receberam nota mínima (1), correspondendo a zonas de menor vulnerabilidade.

A declividade do terreno, com peso de 17%, influencia tanto o comportamento do fogo quanto a acessibilidade e uso do solo. As classes suave ondulado (3-8%) e ondulado (8-20%), atribuídas com nota 7, predominam em áreas onde a ocupação agropecuária e urbana é facilitada. Esses padrões estão presentes nos municípios como Itabirito, Congonhas, Sabará e parte de Ouro Branco, os quais concentram extensas áreas de risco elevado. Em contraposição, os trechos escarpados (>75%) ou montanhosos (45-75%), como nas serras de Ouro Preto, Moeda, Gandarela e Caraça, apresentam menor vulnerabilidade, com notas de 1 a 3, refletindo menor propensão ao uso humano intensivo e maior barreira física à propagação do fogo.

A precipitação média anual, com peso de 9,52%, apresentou padrão inverso à vulnerabilidade: as áreas mais secas (até 1.488 mm), principalmente no setor oeste e sudoeste do QF — como em Itaúna, Sabará, Santa Luzia e Mateus Leme —, receberam nota 7, indicando alta suscetibilidade. Essas regiões tendem a sofrer com déficit hídrico mais acentuado durante eventos de El Niño, favorecendo o ressecamento da vegetação. Por outro lado, regiões com maior precipitação (> 1.532

mm), situadas nos municípios como de Mariana e Nova Lima, foram classificadas com nota 1, correspondendo a zonas úmidas menos propensas à combustão.

A temperatura média anual contribuiu com 8,33% na modelagem, sendo atribuídas notas mais altas (7) às áreas com temperaturas superiores a 21,2 °C, localizadas predominantemente em partes dos municípios de Belo Horizonte, Santa Luzia e Mateus Leme, onde o efeito do El Niño tende a agravar o estresse térmico sobre a vegetação. Temperaturas moderadas (entre 20,88 °C e 21,2 °C) foram atribuídas a setores intermediários, enquanto as áreas mais amenas ($\leq 20,88$ °C), associadas às altitudes elevadas da Serra do Ouro Branco, Itacolomi e Gandarela, foram classificadas com nota 3, resultando em menor vulnerabilidade.

Por fim, a altimetria, também com peso de 8,33%, revelou que áreas situadas entre 443 e 939 metros, com nota 7, concentram os maiores índices de vulnerabilidade. Esses trechos são predominantes nos setores leste do QF, como em Barão de Cocais, Alvinópolis, Mariana e São Gonçalo do Rio Abaixo, onde coincidem com usos intensivos do solo. Em contrapartida, áreas acima de 1.518 metros, como nas serras da Moeda, Caraça e Gandarela, receberam nota 1.

De forma geral, os resultados da análise multicritério demonstram que as regiões periféricas (leste e oeste) do Quadrilátero Ferrífero concentram os maiores níveis de vulnerabilidade às queimadas, classificados nas classes 5 e 6 (alta e muito alta). Essas áreas formam um contorno marcadamente contínuo ao redor do território, sugerindo que os fatores condicionantes do risco — como uso intensivo do solo, proximidade a rodovias e baixa precipitação — estão espacialmente distribuídos de maneira periférica, em oposição ao núcleo central. Essas porções apresentam coloração vermelha intensa no mapa, indicando forte sobreposição de atributos críticos, como predominância de uso agropecuário ou silvicultural, declividades suaves e médias altitudes, além de exposição a temperaturas elevadas. Por outro lado, as regiões centrais do território, que aparecem tons mais claros no mapa, apresentam os menores níveis de vulnerabilidade, estando classificadas nas de baixa a média vulnerabilidade. Essas áreas se destacam por elevações mais acentuadas e

melhores indicadores climáticos, como precipitação mais elevada e temperaturas amenas.

Embora o mapa de vulnerabilidade aponte para os setores leste e oeste do QF como os mais críticos, destaca-se que as porções Norte e Sul do QF concentram os maiores núcleos de queimadas, conforme evidenciado pelos mapas de intensidade radiométrica (Figuras 6, 7, 8 e 9). A região Norte, que compreende municípios como Sabará, Santa Luzia e áreas na proximidade de Belo Horizonte, caracteriza-se pela sobreposição de formações florestais e campestres com alta densidade demográfica e expansão urbana significativa, fatores que intensificam a pressão antrópica sobre os remanescentes vegetais e aumentam o risco de ignição. Já a região Sul, abrangendo municípios como Ouro Preto, Mariana e Itabirito, destaca-se pela presença de intensa atividade minerária, que modifica profundamente a paisagem, gera fragmentação da vegetação nativa e aumenta a vulnerabilidade ao fogo em função da degradação do solo e da expansão de áreas abertas. Tais fatores reforçam que, na prática, a ocorrência de queimadas no QF está diretamente relacionada à interação entre uso do solo, características da cobertura vegetal e pressão antrópica, sendo potencializada por condições climáticas adversas durante os eventos ENOS.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar a influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre os padrões climáticos e a ocorrência de queimadas na região do QFe entre 1999 e 2024. A investigação permitiu demonstrar que a variabilidade associada às fases do ENOS exerce papel determinante na intensificação de condições de risco, ao modificar regimes de temperatura, precipitação e umidade relativa.

A classificação dos anos de 1999 a 2024, de acordo com as fases de El Niño e La Niña, e a caracterização dos padrões climáticos associados, demonstrou que os anos de El Niño apresentaram temperaturas médias anuais e sazonais mais elevadas do que os anos de La Niña. Embora as diferenças na precipitação e na umidade relativa do ar (UR) tenham sido menos acentuadas em termos de médias anuais, a análise do período crítico (abril a outubro) demonstrou que os anos de El Niño apresentaram chuvas residuais e valores de UR ligeiramente mais altos, em contraste com o

comportamento mais seco observado em alguns anos de La Niña. Esse resultado sugere que, na região do QFe, a influência do El Niño se manifesta mais intensamente no aquecimento, enquanto a La Niña pode estar mais associada a estiagens prolongadas em períodos específicos, o que pode impactar as condições de inflamabilidade da vegetação.

A análise da frequência e intensidade das queimadas no QFe em diferentes fases do ENOS, tanto em escala anual quanto sazonal, revelou que os anos de El Niño concentraram um número significativamente maior de focos de calor e uma intensidade média superior em comparação aos anos de La Niña. No recorte anual, os anos de El Niño registraram 83% mais focos do que os anos de La Niña. O pico de intensidade, medido em unidades radiométricas (u.r.), também foi 69% maior durante o El Niño. A análise espacial confirmou que a distribuição dos focos de calor sob a influência do El Niño foi mais abrangente e difusa, com múltiplos núcleos de alta intensidade. Por outro lado, nos anos de La Niña, a atividade térmica se mostrou mais concentrada em um núcleo de alta intensidade no setor sul-sudeste, embora com menor número total de focos.

Já a identificação das áreas mais vulneráveis a queimadas por meio da análise multicritério demonstrou que os fatores antrópicos, como o uso e ocupação do solo e a proximidade a rodovias, são os principais condicionantes da vulnerabilidade, com pesos de 27,38% e 26,19%, respectivamente. As áreas com maior vulnerabilidade foram associadas a usos como pastagens e mosaicos agropecuários, e à proximidade com a malha viária, especialmente nas porções periféricas do território.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros ampliem a série histórica de análise para períodos anteriores a 1999, utilizando dados de satélite e reanálises climáticas disponíveis desde a década de 1980, a fim de identificar padrões de longo prazo na interação entre variabilidade climática e queimadas. Além disso, a incorporação de variáveis socioeconômicas, como densidade populacional e proximidade de áreas urbanas, pode enriquecer a análise espacial ao adicionar fatores antrópicos que condicionam a ignição do fogo. Tais recomendações visam proporcionar uma pesquisa mais detalhada, contendo uma base de dados mais abrangente para a

região do Quadrilátero Ferrífero e, assim, identificar padrões mais precisos das variáveis analisadas nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA MINAS. *Período seco terá temperaturas mais elevadas em Minas devido aos efeitos do El Niño*. Belo Horizonte: Governo de Minas Gerais, 22 jun. 2023. Disponível em: <https://www.mg.gov.br>. Acesso em: 16 jul. 2025.

ALDUCHOV, O. A.; ESKRIDGE, R. E. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology*, v. 35, p. 601-609, 1996.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARRUDA, L. et al. Trends in fire regime across the Brazilian Cerrado (1985-2022): seasonality shifts and burned area dynamics. *Fire Ecology*, 2024. [Dados a conferir]. Acesso em: 16 jul. 2025.

BARBOSA, G. V.; RODRIGUES, D. M. S. *Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte: Instituto de Geociências/Universidade Federal de Minas Gerais, 1967. 130 p.

BERLATO, M. A.; CUNHA, G. R.; FONTANA, D. C. *El Niño Oscilação Sul: clima, vegetação e agricultura*. Passo Fundo: Edição dos Autores, 2024.

BIÓICOS. *El Niño e La Niña: do Oceano Pacífico para o mundo*. São Paulo: Bióicos, 2024. Disponível em: <https://www.bioicos.org.br/post/el-nino-e-la-nina-do-oceano-pacifico-para-o-mundo>. Acesso em: 18 maio 2025.

BORCHERS, Tatiane; FIGUEIRÔA-FERREIRA, Victor Garcia; FERNANDES, Ricardo Augusto Souza. Análise Multicritério para definição de áreas prioritárias à implantação de ciclovias em Araraquara-SP. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE, 35., 2021, Online. Anais [...]. São Carlos: ANPET, 2021

BRASIL. Câmara dos Deputados. *Projeto de Lei nº 11.276/18: Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo*. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.camara.leg.br>. Acesso em: 18 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. *Queimadas – Efeitos à Saúde*. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/q/queimadas>. Acesso em: 18 maio 2025.

CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S. Análise de eventos pontuais. In: DRUCK, S. et al. *Análise espacial de dados geográficos*. Brasília: Embrapa, 2004.

CARVALHO, Justino Wanderley de. Proposta de implementação de novas ciclovias no Concelho de Loures em articulação com a rede de transporte público: contributo para a sustentabilidade ambiental e valorização do turismo (património) no

Município. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências e Sistema de Informação Geográfica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, v. 15, p. 2377-2394, 2002.

CEAQFE - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. *O que é o Quadrilátero Ferrífero*. Disponível em: <https://qfe2050.ufop.br/o-que-eh>. Acesso em: 18 maio 2025.

COELHO, M. R. et al. *Solos do Quadrilátero Ferrífero sob diferentes condições de uso e ocupação*. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017. 12 p.

DIAS, B. A. S. *Proposta para mapeamento dos riscos de queimadas e incêndios em Minas Gerais*. 2023. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

DIAS, G. F. *Queimadas e incêndios florestais: cenários e desafios – Subsídios para a educação ambiental*. Brasília: Ibama/MMA, 2009. p. 12-19.

DINIZ, F. R. et al. O impacto do El Niño nos focos de incêndio e desconforto térmico humano no Brasil no período entre o verão de 2014/2015 e o outono de 2016. *Boletim Geográfico*, 16 abr. 2019. 192 p.

DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper, 641-A, 1969.

DUTRA, G. M.; RUBBIOLI, E. L.; HORTA, L. S. Gruta do Centenário, Pico do Inficionado (Serra do Caraça), MG. In: SCHOBENHAUS, C. et al. *Sítios paleontológicos do Brasil*. Brasília: SIGEP-UNB, 2002. p. 41-59.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Mudanças climáticas e o uso do fogo no Brasil*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 18 maio 2025.

EMBRAPA. *Clima*. Disponível em: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso em: 18 maio 2025.

ENGINE, G. E. *ERA5-Land Hourly – ECMWF Climate Reanalysis*. Earth Engine Data Catalog. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_LAND_HOURLY?hl=pt-br. Acesso em: 08 jul. 2025.

FAPESP - AGÊNCIA. *El Niño agrava impacto da seca em águas subterrâneas na Amazônia e eleva risco de incêndio, constata estudo*. 2025. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br>. Acesso em: 18 maio 2025.

FELIPE FERNANDES LADISLAU, J. et al. Análise multicritério aplicada ao mapeamento de risco de incêndio na APA Sul RMBH. *Caderno de Geografia*, Belo Horizonte, 2021.

FREEMAN, E. et al. International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS) Release 3.0 - Monthly Summary Groups (MSG). NOAA National Centers for Environmental Information, 2016. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. *Journal of Climate*, v. 16, n. 2, p. 263-280, 2003.

HUANG, B. et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5: Upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, v. 30, p. 8179-8205, 2017.

IBAMA. *Incêndios florestais*. Brasília: IBAMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama>. Acesso em: 18 maio 2025.

IBAMA. *Manual de prevenção e combate a queimadas*. Brasília: IBAMA, 2016.

IBAMA. *Queima controlada*. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/incendios-florestais/queima-controlada>. Acesso em: 18 maio 2025.

ICNF. *Queimas e queimadas*. Disponível em: <https://fogos.icnf.pt/InfoQueimasQueimadas/QUEIMASQUEIMADAS.aspx>. Acesso em: 18 maio 2025.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *El Niño: entenda os impactos climáticos e veja previsões para os próximos meses*. Observatório Nacional, 27 set. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 16 jul. 2025.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Programa Queimadas do INPE*. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>. Acesso em: 18 maio 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Impactos do La Niña no clima brasileiro: o que esperar em 2025*. Brasília, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/impactos-do-la-ni%C3%B1a-no-clima-brasileiro-o-que-esperar-em-2025>. Acesso em: 4 set. 2025.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

IPCC. *Mudanças climáticas generalizadas, rápidas e intensas – IPCC*. 2021. Disponível em: <https://www-ipcc-ch.translate.goog/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>. Acesso em: 18 maio 2025.

JANNUZZI, P. de M.; MIRANDA, WL de; SILVA, Daniela S. G. da. Análise multicritério e tomada de decisão em políticas públicas: aspectos metodológicos, aplicativo operacional e aplicações. *Informática Pública*, v. 11, n. 1, p. 69-87, 2009.

KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 147-265, 1956.

LANA, C. E. A Geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero. In: CASTRO, P. T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A. L. (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: 3i Editora, 2020. p. 194-215.

LUIZ PEDRO DE OLIVEIRA MENDES, M. R. et al. *Caminhos de Geografia*. Uberlândia, out. 2024.

MAPBIOMAS. *Relatório Anual do Fogo 2025: Brasil registra 30,8 milhões de hectares queimados; influência climática (El Niño) e pressões antrópicas*. São Paulo: MapBiomass Fogo, 2025. Acesso em: 16 jul. 2025.

MARCHEZETTI, A. L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. C. B. Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 2, p. 181-188, abr./jun. 2012.

MARENGO, J. A. et al. Climatology of the South American low-level jet east of the Andes and relations to precipitation. *Journal of Climate*, v. 17, p. 2261-2280, 2004.

McNEILL, John R. *Algo novo sob o sol: uma história ambiental do século XX*. São Paulo: Companhia das Letras, 2010.

MINUZZI, R. B. et al. El Niño na ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 3, p. 364-371, 2005.

MONTECINO, V. et al. Currents and processes along the Eastern Boundary Current Systems. In: *Ocean currents: a derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press, 2009. p. 339-354.

NASCIMENTO, G. C.; SENNA, M. C. A. A influência de eventos El Niño e La Niña na avaliação dos riscos de ocorrência de incêndios no Pará. *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, 01 abr. 2020. p. 189-201.

NEWS, O. *Chuvas ligadas ao El Niño e à mudança climática arrasam o Sul do Brasil*. ONU News, 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/05/1831311>. Acesso em: 18 maio 2025.

NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *El Niño Southern Oscillation (ENSO)*. NOAA, 2025. Disponível em: <https://psl.noaa.gov/enso/>. Acesso em: 18 maio 2025.

NOAA/ICOADS. *International Comprehensive Ocean–Atmosphere Data Set (ICOADS) Website*. Atualizado em: 15 abr. 2024. Disponível em: <https://icoads.noaa.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

NOAA/NCEI. *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) – Product Page*. Atualizado em: 2025. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

NOAA/NWS. *El Niño and La Niña Information*. Louisville, KY: Weather Forecast Office. Disponível em: <https://www.weather.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Monthly Weather Review*, v. 125, p. 279-291, 1997.

PRETO, T. O. *O Pico do Itacolomi*. Turismo Ouro Preto. Disponível em: <https://turismoouropreto.com/ecoturismo/o-pico-do-itacolomi/>. Acesso em: 18 maio 2025.

PSL/NOAA. *Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series – Descrição do ONI e regiões Niño baseada em ERSSTv5*. Disponível em: <https://psl.noaa.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

SAATY, T. L. *The analytic hierarchic process: planning, setting priorities, resource allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Pittsburgh: RWS Publications, 1991.

SAMPAIO, O. B. *Estudo comparativo de índices para previsão de incêndios florestais na região de Coronel Pacheco, Minas Gerais*. 1991. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1991.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Solos desenvolvidos sobre canga ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros. In: CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y. (Org.). *Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para a conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais*. Belo Horizonte: 3i, 2015. p. 77-102.

SILVA, E. S.; QUEIROZ, G. A. *Introdução à análise espacial de dados geográficos*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

SILVA, F. R. *A paisagem do Quadrilátero*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 53 p.

SODRÉ, G. R. C. et al. Distribuição sazonal das queimadas na Amazônia Oriental sob influência de El Niño e La Niña. [Revista a confirmar], 2018. [Dados a conferir]. Acesso em: 16 jul. 2025.

TESSA L. MONTINI, C. J. et al. *The South American Low-Level Jet: A new climatology*. Santa Barbara: University of California, 2018. 19 p.

TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. *Zeitschrift für Geophysik*, v. 6, p. 297-309, 1930.

UCAR - UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. *Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI e TNI) | Climate Data Guide*. Última modificação: 2019. Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu>. Acesso em: 16 jul. 2025.

UNITED STATES. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *Climate Prediction Center. Oceanic Niño Index (ONI)*. Washington, DC: NOAA, 2025. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 30 jul. 2025.

VARAJÃO, A. F. D. C. et al. Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10Be) e da pedogênese. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1409-1425, 2009.

YNOUE, R. Y. *Meteorologia: noções básicas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.