

Mayara Franco Costa
Leonardo França da Silva
Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho
Cristiano Márcio Alves de Souza
José Rafael Franco

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS FOCOS DE INCÊNDIO NA VEGETAÇÃO E NA QUALIDADE DO AR NO PERÍODO DE 2022 A 2024 NA CIDADE DE PARACATU

2025



MAYARA FRANCO COSTA
LEONARDO FRANÇA DA SILVA
CARLOS WAGNER GONÇALVES ANDRADE COELHO
CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA
JOSÉ RAFAEL FRANCO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS FOCOS DE
INCÊNDIO NA VEGETAÇÃO E NA QUALIDADE
DO AR NO PERÍODO DE 2022 A 2024 NA
CIDADE DE PARACATU**

EDITORA PASCAL

2025

Editor Chefe: Prof. Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: autores

Conselho Editorial

Dr. William de Jesus Ericeira Mochel Filho

Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dr^a Elba Pereira Chaves

Dr^a Thais Roseli Corrêa

Dr^a Gerbeli de Mattos Salgado Mochel

Dr^a Giselle Cutrim de Oliveira Santos

Dr^a Sandra Imaculada Moreira Neto

Dr^a Anna Christina Sanazario de Oliveira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C837a

Costa, Mayara Franco; França da Silva, Leonardo; Coelho, Carlos Wagner Gonçalves Andrade; Alves de Souza, Cristiano Márcio; Franco, José Rafael

Avaliação do impacto dos focos de incêndio na vegetação e na qualidade do ar no período de 2022 a 2024 na cidade de Paracatu / Mayara Franco Costa et al. — São Luís: Editora Pascal, 2025.

66 f. : il.:

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-6068-160-6

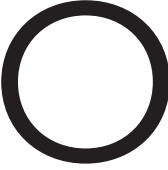
D.O.I.: 10.29327/5589352

1. Queimada. 2. Impacto ambiental. 3. Qualidade do ar. 4. Paracatu - MG. 5. Avaliação. I. Costa, Mayara Franco. II. França da Silva, Leonardo. III. Coelho, Carlos Wagner Gonçalves Andrade. IV. Alves de Souza, Cristiano Márcio. V. Franco, José Rafael. VI. Título.

CDU: 504.5:502.3(815.1)"2022/2024"

Qualquer parte deste livro poderá ser reproduzida ou transmitida, sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros, desde que seja citado o autor.

PREFÁCIO

 Os incêndios florestais representam uma das mais preocupantes ameaças aos ecossistemas, à saúde pública e à qualidade de vida, especialmente em regiões onde fatores climáticos, socioeconômicos e de uso da terra favorecem sua ocorrência. No município de Paracatu, Minas Gerais, os anos de 2022 a 2024 foram marcados por eventos recorrentes de focos de calor, cujos impactos diretos e indiretos ainda demandam análise aprofundada, crítica e interdisciplinar.

Este livro nasce da necessidade de compreender, de forma estruturada e científica, os efeitos dos incêndios sobre a vegetação e a qualidade do ar, considerando as especificidades locais e os desafios ambientais contemporâneos. Mais do que relatar dados, esta obra busca contextualizá-los dentro de um arcabouço teórico que permita ampliar a discussão e oferecer caminhos para o monitoramento, a prevenção e a mitigação dos impactos causados pelo fogo.

Ao longo dos capítulos, o leitor encontrará uma abordagem fundamentada em dados históricos de queimadas, análises sobre a qualidade do ar e seus desdobramentos na saúde humana, além da apresentação de ferramentas e metodologias que podem subsidiar políticas públicas e práticas de gestão ambiental mais eficazes. A interdisciplinaridade entre meio ambiente, saúde e tecnologia é um dos pilares que sustenta esta obra, oferecendo uma leitura abrangente e crítica da realidade do Município.

Assim o ebook “**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS FOCOS DE INCÊNDIO NA VEGETAÇÃO E NA QUALIDADE DO AR NO PERÍODO DE 2022 A 2024 NA CIDADE DE PARACATU**”, não é apenas uma contribuição científica, mas também um convite à reflexão e à ação. Que esta leitura possa fomentar o diálogo entre pesquisadores, gestores, estudantes e a sociedade civil, no sentido de promover uma convivência mais equilibrada entre o homem e os recursos naturais.

Boa leitura!

AUTORES



Mayara Franco Costa

Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais (CEFET-MG). Engenheira de Bioprocessos e Mestre em Ciências pela Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ). Atuou como Professora de Magistério Superior na Faculdade de Pitágoras, campus Venda Nova, lecionando as disciplinas de Fenômenos de Transportes, Termodinâmica, Hidráulica, Máquinas de Fluxo, Ciências dos Materiais, Química e Física. Possui experiência nas áreas de educação ambiental, qualidade do ar e emergências ambientais.

Leonardo França da Silva

Engenheiro Agrônomo (UFMG), Matemático e Engenheiro de Segurança do Trabalho, especialista em Engenharia de Produção. Mestre em Agronomia (UNESP), Doutor em Engenharia Agrícola (UFV) e Pós-Doutor em Engenharia Agrícola na UFGD, com foco em modelagem matemática em sistemas de produção agrícola. Atualmente Professor Adjunto I da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília - UnB. Possui experiência em Engenharia Agrícola, Construções Rurais, Desenho Técnico e Assistido por Computador, Sustentabilidade em sistemas de produção, Segurança do Trabalho, Ergonomia, Agricultura Digital e Sequestro de Carbono.



Cristiano Márcio Alves de Souza

Professor Titular da Universidade Federal da Grande Dourados. Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1999) e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2004). Orientador nos Programas de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) e Agronomia (Doutorado em Produção Vegetal) da UFGD. Áreas pesquisadas: projeto de máquinas agrícolas e pós-colheita de produtos agrícolas - atuando nos seguintes temas: agricultura digital e de precisão, colheita, semeadura, compactação do solo, tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas, secagem e aeração de grãos, modelagem, simulação e otimização de sistemas agrícolas, energia na agricultura.

AUTORES

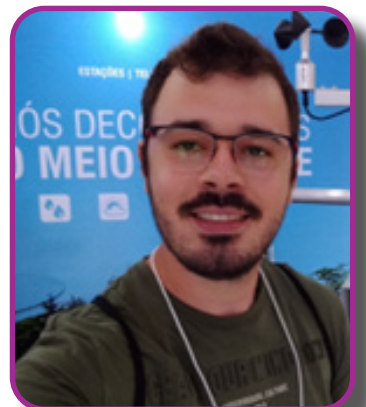


Carlos Wagner G. A. Coelho

Doutor em Geografia - Tratamento da Informação Espacial pela PUC- MINAS. Professor efetivo dos cursos de Graduação em Engenharia Ambiental e Técnico e Tecnológico em Meio Ambiente do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG). Foi chefe de Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental - DCTA - CEFETMG Gestão 2015-2017. Atualmente é coordenador do curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária - CEFETMG. Foi tutor do PET -Ambiental - Programa de Educação Tutorial, do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária Período 2020-2022. Membro do grupo de pesquisa “Grupo Transdisciplinar de Pesquisa e Extensão em práticas culturais do Heavy Metal”, chancelado pelo Cnpq. Coordenou os cursos de Pós-graduação Lato Sensu em Geoprocessamento e Gestão Ambiental no Centro Universitário UNA. Foi professor de Pós-graduação em Geoprocessamento da PUC VIRTUAL, professor do Centro Tecnológico UNATEC- UNA e professor do centro universitário UNI-BH. Trabalhou na Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG por 23 anos, destes, 12 como Técnico de Planejamento Hidro energético no setor de Meteorologia. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Climatologia Geográfica e Geoprocessamento, atuando principalmente nos seguintes temas: Análise espacial e climatologia e Educação Ambiental..

José Rafael Franco

Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia de Botucatu (2017). Especialização em Banco de Dados na UNICESUMAR em Botucatu (2019), Mestrado em Irrigação e Drenagem na Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu (2021). Graduando em Ciência de Dados pela Faculdade Univesp. Doutorado em Engenharia Agrícola na Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu. Possui experiências nas áreas de Telecomunicações, Redes de Computadores, Desenvolvimento de Softwares, Banco de Dados, Agrometeorologia, Instrumentos Meteorológica, Microcontroladores e Aplicações de baixo custo no meio agrícola. Professor no Centro universitário Uneduvale de 2023.



JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

As características do ar estão intimamente ligadas à saúde dos seres humanos e ao bem-estar dos ecossistemas ambientais. Nesse sentido, conforme Sant'anna *et al.* (2021), a qualidade do ar é uma grandeza de avaliação dos níveis de poluentes atmosféricos aos quais os sistemas vivos estão expostos. Ademais, os padrões de qualidade do ar, que determinam níveis máximos recomendáveis de exposição em termos de concentração, são fundamentais a fim de viabilizar políticas públicas concernentes ao assunto, bem como, controle da poluição.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2023), 7 milhões de pessoas morrem todos os anos, de forma prematura, devido ao contato com a poluição do ar e, conforme dados da própria OMS (2024), 99% da população mundial respira ar que excede aos limites preconizados pelo órgão, devido aos altos níveis de poluentes atmosféricos, sendo os países de média e baixa renda, aqueles que apresentam os maiores níveis de exposição.

No Brasil, dentre os grandes contribuintes para a queda da qualidade do ar estão as queimadas, que são, historicamente, comumente utilizadas no país como forma de retirada de cobertura vegetal. Como consequência, a poluição atmosférica produzida por elas representa um grande risco potencial para a saúde da população, em especial indivíduos mais vulneráveis, como as crianças, idosos e pessoas suscetíveis a doenças respiratórias e outras (COELHO *et al.*, 2023).

Além dos impactos na saúde humana, a queima de vegetação traz sérios impactos nos níveis climatológico, ambiental e socioeconômico, afetando as propriedades do solo, biodiversidade presente no local e fornecimento de água (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2021).

No ano de 2023, Minas Gerais ocupou a 11ª colocação no ranking nacional do número de focos de incêndio do Brasil, sendo responsável por 6948 dos 189901 focos registrados no país pelo Programa de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esse número correspondeu a 19 focos catalogados diariamente em terras mineiras para o referido ano.

Uma das formas de analisar a ocorrência de queimadas e a suscetibilidade de coberturas vegetais a focos de incêndio é a utilização de imagens de satélite. Conforme Lizundia-Loiola *et al.* (2020), as imagens provenientes de sensoriamento remoto a partir de satélites têm sido empregadas para gerenciar as dinâmicas de um incêndio, com a finalidade de estimar possíveis situações de perigo, identificar o comportamento do fogo e investigar os efeitos da regeneração da vegetação.

Nesse sentido, o mapeamento de focos de incêndio é uma medida preventiva fundamental para a preservação ambiental, para a manutenção da saúde pública da população e para a evolução de práticas econômicas mais sustentáveis a longo prazo, visto a dependência dos meios de produção com os recursos naturais.

Este livro tem como propósito central investigar os impactos das queimadas sobre a vegetação e a qualidade do ar no município de Paracatu, Minas Gerais, no período compreendido entre os anos de 2022 e 2024. A obra busca contribuir com a produção científica e o debate ambiental ao integrar múltiplas dimensões do problema, associando a análise ambiental aos seus desdobramentos sociais e de saúde pública.

Para isso, propõe-se uma abordagem teórico-metodológica que contempla o levantamento histórico dos focos de incêndio, a avaliação dos padrões de qualidade do ar, os impactos das emissões sobre a saúde da população e o uso de ferramentas geotecnoló-

gicas aplicadas ao monitoramento ambiental. Especificamente, pretende-se quantificar a cobertura vegetal por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), avaliar a distribuição espacial da densidade de focos de incêndio por meio do estimador de Kernel e analisar as correlações entre os focos registrados e as concentrações de partículas inaláveis (PM10), com foco comparativo entre os meses de janeiro e setembro nos três anos analisados. Assim, o livro oferece subsídios técnicos e científicos para a formulação de estratégias de prevenção, controle e mitigação dos efeitos das queimadas no contexto regional.

SUMÁRIO

Justificativa do Estudo	7
CAPÍTULO 1	10
QUEIMADAS, SAÚDE E MONITORAMENTO AMBIENTAL: UMA ABORDAGEM INTEGRADA SOBRE OS IMPACTOS E AS FERRAMENTAS DE ANÁLISE NO CONTEXTO BRASILEIRO	
<i>Queimadas no Brasil</i>	<i>11</i>
<i>Monitoramento da qualidade do ar</i>	<i>14</i>
<i>Geoprocessamento como ferramenta de monitoramento</i>	<i>16</i>
<i>Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)</i>	<i>18</i>
<i>Paracatu</i>	<i>19</i>
CAPÍTULO 2.....	22
ASPECTOS METODOLÓGICOS	
<i>Área de estudo</i>	<i>24</i>
<i>Levantamento dos dados de focos de incêndio</i>	<i>25</i>
<i>Avaliação temporal do estudo.....</i>	<i>25</i>
<i>Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....</i>	<i>26</i>
<i>Satélite e imagens utilizadas.....</i>	<i>26</i>
<i>Densidade de focos de incêndio.....</i>	<i>27</i>
<i>Coleta de dados de qualidade do ar</i>	<i>29</i>
<i>Coleta de dados de precipitação</i>	<i>30</i>
<i>Análise metodológica dos dados.....</i>	<i>31</i>
CAPÍTULO 3.....	32
RESULTADOS E DISCUSSÃO: IMPACTOS DAS QUEIMADAS NA VEGETAÇÃO E NA QUALIDADE DO AR EM PARACATU – MG (2022-2024)	
<i>Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....</i>	<i>34</i>
<i>Análise quantitativa.....</i>	<i>34</i>
<i>Análise qualitativa.....</i>	<i>36</i>
<i>Estimador de Kernel, focos de incêndio e NDVI.....</i>	<i>40</i>
<i>Focos de incêndio e material particulado.....</i>	<i>48</i>
CAPÍTULO 4	58
PERSPECTIVAS FUTURAS	
CAPÍTULO 5.....	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS	
Referências	62

1

QUEIMADAS, SAÚDE E MONITORAMENTO AMBIENTAL: UMA ABORDAGEM INTEGRADA SOBRE OS IMPACTOS E AS FERRAMENTAS DE ANÁLISE NO CONTEXTO BRASILEIRO



As queimadas no Brasil configuram-se como um fenômeno recorrente e multifacetado, marcado por intensos impactos ambientais, sociais e à saúde pública. Em diferentes biomas, especialmente na Amazônia e no Cerrado, o uso do fogo como prática de manejo ou como resultado de ações ilegais tem gerado significativas alterações na cobertura vegetal, degradação dos recursos naturais e comprometimento da qualidade do ar.

Este capítulo propõe uma abordagem integrada sobre os efeitos das queimadas, considerando seus reflexos diretos na saúde humana e na atmosfera, ao mesmo tempo em que discute as ferramentas disponíveis para o monitoramento e a gestão desses eventos. Para isso, aborda-se o estado da arte sobre as queimadas no território brasileiro, os efeitos dos poluentes atmosféricos oriundos da combustão na saúde respiratória e cardiovascular da população, e os mecanismos utilizados para acompanhar e avaliar a qualidade do ar.

Além disso, explora-se o papel das geotecnologias no monitoramento ambiental, com destaque para o uso do sensoriamento remoto e de índices espectrais como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), fundamentais para detectar alterações na vegetação e avaliar os impactos da atividade antrópica ao longo do tempo.

A estrutura teórica aqui apresentada visa fornecer base conceitual e técnica para a compreensão dos capítulos seguintes, que aprofundam a análise espacial e temporal dos focos de incêndio e seus desdobramentos na cidade de Paracatu entre 2022 e 2024.

Queimadas no Brasil

Historicamente, no final do século XVIII e durante todo o século XIX, as queimadas e os desmatamentos realizados por agricultores, foram fortemente debatidos pela comunidade científica e pelo corpo político ao redor do mundo, compondo a primeira crítica ambiental da história moderna, segundo Grove (1995) e Pádua (2002, 2009). Especialmente no Brasil, as críticas a essas práticas se referiam principalmente às regiões de florestas, onde se aglutinavam a produção agroexportadora escravista de cana-de-açúcar, café e algodão (PÁDUA, 2002).

Embora sejam atividades diferentes, tanto o desmatamento quanto as queimadas, estão entre as principais causas ambientais enfrentadas no Brasil, estando ligadas à utilização de fogo, ocorrendo a retirada da vegetação e em sequência, a queima do material vegetal (GONÇALVES, 2012).

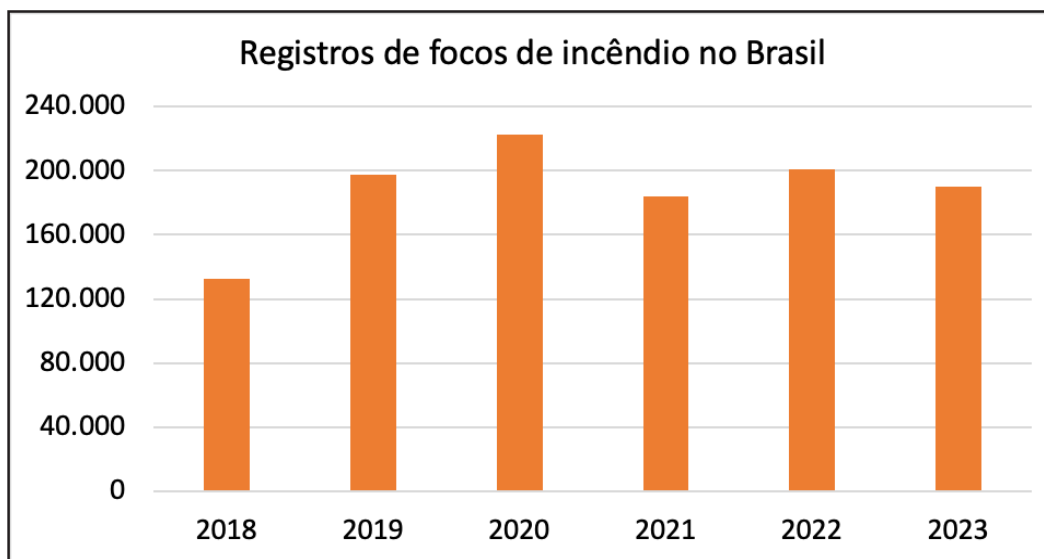
A prática figura como uma das técnicas tradicionais amplamente utilizadas na agricultura familiar na maior parte do país. Cujo objetivo é limpar uma determinada área para o plantio de culturas sazonais (SESP, 2019). Ademais, as queimadas ainda são utilizadas para facilitar a colheita nas extensas áreas cobertas por canaviais, sobretudo no estado de São Paulo e na Zona da Mata Nordestina (RIBEIRO *et al.*, 2002).

Porém, essa queima deve ser feita com cautela e com forte controle pelos seus idealizadores, compreendendo a sinalização, abertura de aceiros, delimitação de área, bem como, monitoramento durante e após o processo de queima (SENAR, 2018). Nesse contexto, o fogo descontrolado já se configura como um incêndio florestal, passível de avançar sobre qualquer forma de vegetação, podendo ter sido originado por causa natural ou decorrente de fonte antrópica, intencional ou acidental (IBAMA, 2024).

A partir de dados de monitoramento do Programa de Queimadas do INPE (2024), o

Brasil teve um aumento percentual em seu número de focos de incêndio de 42,92%, considerando o período dos últimos 6 anos (2018 até 2023). A Figura 1, a seguir, traz a evolução numérica desses registros.

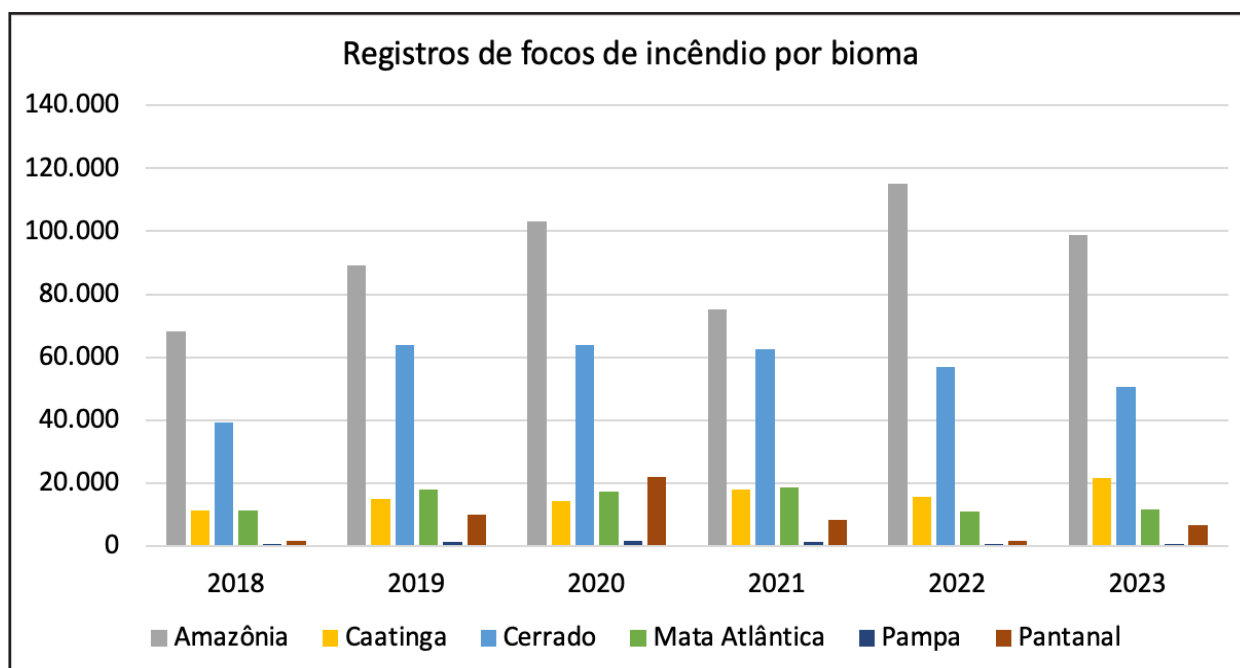
Figura 1. Número de focos de incêndio de 2018 a 2023



Fonte: INPE (2024).

Nota-se que, 2018 foi o ano que apresentou o menor número de focos, totalizando 132.870, durante o período considerado. Além disso, observa-se que, houve um salto de 2018 para 2019 no número de registros, porém, o maior valor catalogado para o período foi em 2020, com 222.797 focos, cujo aumento percentual foi de 67,68% comparado com 2018, correspondendo a 89.927 novas ocorrências. Ademais, a partir do ano de 2021, percebe-se que há uma ligeira diminuição e uma sutil constância nos montantes de registros nos anos seguintes. De forma complementar, sob a ótica dos biomas brasileiros, a Figura 2, apresenta a evolução numérica analisada por bioma, considerando os mesmos últimos 6 anos

Figura 2. Número de focos de incêndio nos biomas brasileiros de 2018 a 2023



Fonte: INPE (2024).

De acordo com a Figura 2, de 2018 a 2023, observa-se a mesma tendência vista na Figura 1. Contudo, analisando precisamente sob os biomas, nota-se que os mais impactados com focos de incêndio foram a Amazônia, o Cerrado e a Mata Atlântica. De maneira análoga ao que foi observado na Figura 1, 2018 foi o ano que apresentou a menor quantidade de registros e o aumento similar também é observado para os 2 anos consecutivos (2019 e 2020), comparados ao ano inicial.

Essa tendência era esperada de ser observada em relação aos biomas brasileiros, entretanto, há um ponto importante que deve ser ressaltado: o número de registros amazônicos, que é substancialmente maior que os demais. Em 2020, que correspondeu ao pico brasileiro, foram observados um total de 103161 focos somente na Amazônia, esse número é, aproximadamente, 46,30% do total brasileiro, que foi de 222797.

Ademais, pode-se sugerir que o aumento do número de focos de incêndio observados na região amazônica, no Cerrado e na região da pantaneira foram responsáveis pelo aumento a nível nacional observados nos 3 primeiros anos. Esse argumento pode ser ainda mais reforçado quando se observa, na Figura 2, a tendência geral dos números dos demais biomas de 2018 a 2023, cujos valores respectivos não sofreram grandes alterações de um ano para o outro.

Outro número que merece destaque, também evidenciado pela Figura 2, é o do Pantanal, que teve seu recorde de queimadas no ano de 2020 amplamente noticiado pela mídia. Foi captada uma soma de 22116 focos nesse bioma, aproximadamente 2,2 vezes mais que o ano 2019 (10025 registros), perfazendo um aumento de 120,61%.

É importante ressaltar que, inicialmente, as cinzas dessa queima contribuem com a fertilidade do solo, entretanto, a prática recorrente o empobrece (SESP, 2019). Porém, a manutenção de processos ecológicos e a conservação da biodiversidade podem ser grandemente ameaçadas devido à ocorrência de queimadas em áreas compostas por vegetação e de cultivo agrícola. Sobretudo, são mais graves em áreas pequenas, em ecossistemas muito sensíveis à presença de fogo, localidades afastadas por cidades, áreas habitadas por espécies raras e/ou ameaçadas de extinção e em monoculturas agrícolas (MEDEIROS *et al.*, 2004).

Ademais, a severidade dos impactos ocasionados pelo fogo no contexto social, econômico e ambiental estão atrelados à uma diversidade de fatores, tais como, sua intensidade, duração, quantidade de material carburante (materiais vivos ou mortos), condições edafoclimáticas, bem como, o tempo desde a última queimada, e da área queimada (BERNARDES, 2019).

A fim de que esses impactos sejam evitados ou minimizados, é fundamental que haja combate aos focos de incêndio, para tanto, deve-se ter o conhecimento da existência deles através da identificação, localização e comunicação da ocorrência desses fatos. Observa-se que a detecção e o monitoramento podem ser realizados através da vigilância terrestre, aérea ou por imagens de satélites (SENAR, 2018).

Os eventos que envolvem grandes queimadas no cenário mundial despertaram a atenção para a temática, no entanto, as providências tomadas para prevenir e/ou controlar os incêndios ainda são incipientes e insatisfatórias (GONÇALVES, 2012).

Impacto na saúde e na qualidade do ar

Bilhões de pessoas respiram ar nocivo para a saúde, sendo os países de média e baixa renda do globo os mais impactados com a poluição do ar. Além disso, as pessoas que habitam essas localidades estão entre as menos cobertas em termos de medição da qualidade do ar, de acordo com a OMS (2022).



Aproximadamente, 50% da população do planeta sofrem com a exposição à poluição do ar causada por emissões provenientes da queima de biomassa (ALVES *et al.*, 2017). E, segundo Arbex *et al.* (2004), aproximadamente 80% das queimadas ocorrem nos trópicos. Essa prática é um dos principais contribuintes para a emissão de gases tóxicos e de efeito estufa, alterando química e fisicamente a atmosfera ao introduzir espécies químicas que mudam substancialmente o pH da água da chuva, impactando o balanço térmico pela interferência no montante de radiação solar refletida para o espaço.

O Brasil contribui significativamente para a emissão de poluentes devido à queima de biomassa (SILVA *et al.*, 2013). De acordo com o Instituto de Física da Universidade de São Paulo (2017), ao longo das últimas décadas, foram observadas altas concentrações de MP na atmosfera em decorrência de emissões provenientes das queimadas.

Entre os principais poluentes consequentes dessa prática, que são lançados na atmosfera, estão o monóxido de carbono (CO), os materiais particulados respirável (PM_{2,5}) e inalável (PM₁₀), o dióxido de nitrogênio (NO₂), o dióxido de enxofre (SO₂), a fumaça (FMC), o ozônio (O₃) e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) (OMS, 2022). Ressalta-se que, os materiais particulados são os que mais impactam à saúde, conforme Carmo *et al.* (2013).

Os efeitos adversos devido à exposição aguda a esses poluentes se manifestam, sobretudo, pelo aumento no número de atendimentos médicos e de internações consequentes de doenças cardiorrespiratórias (SARRA *et al.*, 2021). Ademais, os impactos sentidos pela população estão intimamente relacionados à proximidade com a fonte da queima da biomassa, a depender do maior ou menor grau de exposição dos indivíduos. Outros pontos a serem observados são a direção e a intensidade dos ventos, que também têm forte influência na dispersão dos poluentes atmosféricos, bem como, sobre as áreas afetadas pela pluma proveniente do fogo. Sendo assim, caso os ventos se dirijam para áreas urbanas ou densamente povoadas, um número maior de pessoas estarão sujeitas aos impactos adversos (RIBEIRO *et al.*, 2002).

A má qualidade do ar pode trazer prejuízos na saúde por toda a vida, acarretando diversas enfermidades, tais como: doenças pulmonares, cardiovasculares e acidentes vasculares cerebrais; tendência ao desenvolvimento de câncer e diabetes; demência em adultos e alteração no desenvolvimento cognitivo em crianças (ASSAF *et al.*, 2019). Ademais, populações de menor nível socioeconômico, crianças e idosos, estão entre os mais vulneráveis e susceptíveis a sofrerem com as más condições atmosféricas (VORMITTAG *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a prevenção, o combate, bem como, o monitoramento da ocorrência de queimadas e de focos de incêndio, figuram como medidas fundamentais a fim de garantir a saúde pública da população.

Monitoramento da qualidade do ar

Recentemente foi aprovada a Lei n. 14850/2024 que instituiu a Política Nacional de Qualidade do Ar, sendo que, um de seus princípios norteadores é a adoção de uma visão sistêmica na gestão da qualidade do ar, considerando as diferentes fontes de emissões, abrangendo as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública. A regulamentação também determina a adoção de limites máximos para emissões atmosféricas, bem como, o monitoramento da qualidade do ar, com o intuito de fomentar políticas públicas (BRASIL, 2024).

No país, os padrões de qualidade do ar estão estabelecidos pela Resolução CONA-

MA n. 506/2024 que dispõe limites de concentrações para partículas totais em suspensão (PTS), fumaça, partículas inaláveis (PM_{10} e $PM_{2,5}$), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2) e chumbo (PB). Ainda, a resolução determina os critérios para episódios agudos de poluição do ar (BRASIL, 2024). Os padrões são apresentados na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1. Padrões Nacionais de Qualidade do Ar.

Poluente	Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PF
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	24 horas	120	100	75	50	45
	Anual ¹	40	35	30	30	10
$PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	24 horas	60	50	37	25	15
	Anual ¹	20	17	15	10	5
SO_2 ($\mu g/m^3$)	24 horas	125	50	40	40	40
	Anual ¹	40	30	20	20	20
NO_2 ($\mu g/m^3$)	1 hora ²	260	240	220	200	200
	Anual ¹	60	50	45	40	10
PTS ($\mu g/m^3$)	24 horas	-	-	-	-	240
	Anual ⁴	-	-	-	-	80
Fumaça ($\mu g/m^3$)	24 horas	120	100	75	50	45
	Anual ¹	40	35	30	20	15
O_3 ($\mu g/m^3$)	8 horas ³	140	130	120	100	100
CO (ppm)	8 horas ³	-	-	-	-	9
Pb ⁵ ($\mu g/m^3$)	Anual ¹	-	-	-	-	0,5

Fonte: Adaptado de Brasil, 2024.

1 - Média aritmética anual

2 - Média horária

3 - Máxima média móvel do dia

4 - Média geométrica anual

5 - Medido no PTS

PI - padrão intermediário

PF - padrão final

ppm - parte por milhão



Conforme a Tabela 1, nota-se que os padrões de qualidade do ar estão divididos em padrões intermediários (1, 2, 3 e 4). Em outras palavras, são categorias temporárias cumpridas em etapas, que restringem as concentrações passíveis de serem encontradas no ar visando alcançar o padrão final determinado pela OMS em 2021 (BRASIL, 2024). O monitoramento da qualidade do ar é feito para identificar a concentração desse grupo de poluentes, que é amplamente reconhecido como indicadores, tanto por serem os mais comuns na atmosfera quanto por causarem efeitos prejudiciais ao meio ambiente (FEAM, 2024).

Os valores de concentrações preconizados pela resolução supracitada são fundamentais na política de monitoramento da qualidade do ar no país e no estado de Minas Gerais, que segue os valores legislados a nível nacional. Ressalta-se que cada estado tem seu próprio modelo de gestão em termos de monitoramento (FEAM, 2023).

Especialmente em terras mineiras, a rede de monitoramento é composta por estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar operadas e mantidas por empresas cujas atividades têm potencial poluidor e são licenciadas por órgão ambiental. Essas estações são estabelecidas por meio de condicionantes no âmbito do licenciamento ou através de Termos de Ajustamento de Conduta (TAC). Os dados são coletados, recebidos, tratados e divulgados para a população pelo Núcleo de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões Atmosféricas (NQA) da Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) (FEAM, 2023).

O monitoramento da qualidade do ar é fundamental como promotor de saúde pública e de bem-estar sócio-ambiental, pois, através da medição das concentrações de poluentes atmosféricos, fornece informações sobre a situação atual do ar, cria um histórico de dados e capacita os responsáveis a elaborar estratégias e políticas públicas para garantir uma boa saúde ambiental (VORMITTAG *et al.*, 2021). Além disso, os dados se tornam poderosas ferramentas de conscientização, educação e de controle das emissões de processos produtivos cujo potencial poluidor envolve a atmosfera.

Geoprocessamento como ferramenta de monitoramento

No que tange às diversas formas de controle, prevenção e combate aos incêndios florestais, queimadas e focos de incêndio, o geoprocessamento figura como uma poderosa metodologia para o entendimento da dinâmica da paisagem a fim de definir a espacialização de eventos que envolvem fogo em vegetação, bem como, um suporte para a busca de soluções nesses contextos (FERNANDES *et al.*, 2011).

Ademais, é crucial que a detecção e o monitoramento dos incêndios florestais ocorram de forma rápida e eficaz, a fim de possibilitar o efetivo controle do fogo, reduzir os gastos nas ações de combate e minimizar os prejuízos causados. Mesmo porque, a falta de informação acurada sobre a localização e extensão dos incêndios compromete a avaliação do impacto ambiental provocado pelo fogo (BATISTA, 2004).

Dentro do geoprocessamento, o uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) é uma ferramenta que permite captar, sobrepor, manipular e visualizar grandes volumes de dados, que podem ser oriundos tanto da possibilidade de ocorrência de fogo, da sua capacidade de propagação, bem como, dos seus consequentes efeitos. Ademais, o SIG auxilia os tomadores de decisão em local, em tempo e na implementação das ações necessárias para a proteção do ambiente frente aos impactos decorridos dos incêndios (VAKALIS *et al.*, 2011).

Devido às especificidades do Brasil, como é o caso de sua grande extensão territorial, o monitoramento via satélite é o que mais se mostra eficiente e com menor custo, frente

a outros métodos como a vigilância terrestre, torres de observação e patrulhamento aéreo com aeronaves (BATISTA, 2004). Além disso, o território brasileiro é amplo em sua diversidade, biomas e possui localidades de difícil acesso, o que reforça ainda mais o uso de SIG.

Nacionalmente, esse trabalho é realizado pelo INPE desde o início em meados da década de 1980. O processo de detecção de queimadas começou através de um experimento de campo entre pesquisadores desse instituto e da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (NASA) e, desde 1987 vem evoluindo e é continuamente operado (INPE, 2024).

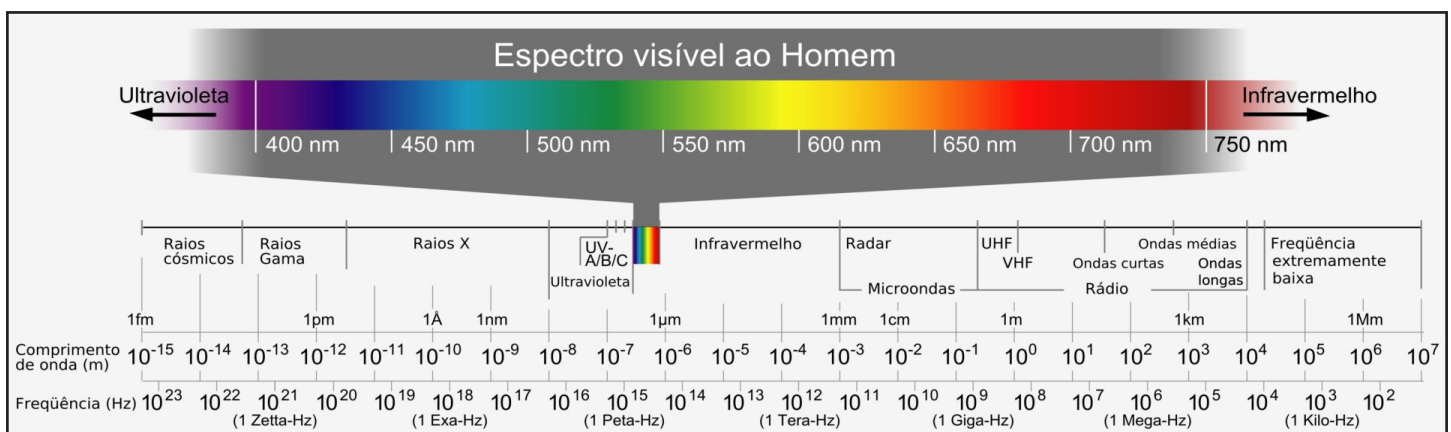
É importante ressaltar que, os satélites de monitoramento conseguem captar focos ou fontes de calor mesmo estando distantes aproximadamente 700 a 900 km da superfície terrestre. Então, em uma ocorrência que envolve fogo ou incêndio, podem ser gerados 01 ou vários focos de calor (SESP, 2019).

O monitoramento é realizado com a recepção de imagens de 10 satélites, dentre eles polares e geoestacionários, que possuem sensores ópticos que operam na banda termal-média de 4 μ m (INPE, 2024). Em outras palavras, a operação numa banda termal permite a captação de informações de radiação térmica infravermelha provenientes de objetos e superfícies. Isso viabiliza a análise das temperaturas e de distribuição de calor de uma determinada área mapeada (AERO ENGENHARIA, 2023).

Nesse conjunto, cada satélite de órbita polar produz pelo menos 02 conjuntos de imagens por dia, enquanto, os geoestacionários geram 06 imagens por hora. No total, são processados automaticamente mais de 200 imagens por dia unicamente para a detecção de focos de queima da vegetação. Em termos de abrangência, todo o país e grande parte da América do Sul são contemplados pelas imagens geradas, devido às estações utilizadas situadas em Cachoeira Paulista, município do estado de São Paulo, e Cuiabá, município do estado do Mato Grosso (INPE, 2024).

É importante ressaltar que, as imagens geradas pelos satélites em órbita são fortemente dependentes dos sensores a eles acoplados. Em outras palavras, esses sensores são capazes de emitir e/ou receber informações sob a forma de energia eletromagnética: radiação (IBGE, 2024). Essa energia captada apresenta diferentes comprimentos de ondas e é organizada em bandas (faixas) no espectro eletromagnético, conforme a Figura 3.

Figura 3. Espectro eletromagnético.



Fonte: Micha et al. (2011).

Quando falamos em sensoriamento remoto, bandas mais utilizadas são a do visível (0,38 – 0,76 μ m), do infravermelho (0,8 – 300 μ m) e micro-ondas (0,01 – 100 cm). Em outras palavras, essas são as principais faixas espectrais utilizadas pelos sensores para captar in-

formações sobre a superfície terrestre, e cada uma delas possui uma função específica. Por exemplo, diferentes tipos de vegetações e a temperatura dos oceanos e da terra podem ser coletados por sensores que trabalham na região do infravermelho. Por outro lado, a rugosidade da superfície da Terra e os ventos na superfície do mar, são coletados por meio de outros que captam a energia na região de micro-ondas (OLIVEIRA, 2020). De forma geral, a formação da imagem de satélite compreende a captação e a interpretação computacional dessas ondas eletromagnéticas.

No Brasil, a atual desvitalização das políticas públicas ambientais tem intensificado ainda mais os incêndios florestais, acarretando impactos generalizados em todo o país (NUNES *et al.*, 2023). Nesse sentido, a utilização do geoprocessamento no monitoramento da queima de biomassa se torna ainda mais vital para a preservação da biodiversidade e do patrimônio genético remanescente, bem como, para a garantia de uma boa qualidade do ar, promovendo bem-estar sócio-ambiental.

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Conforme Meneses *et al.* (2012), a qualidade da informação extraída das imagens captadas por sensores espaciais é possibilitada através de um conjunto de algoritmos matemáticos que viabilizam uma diversidade de técnicas de processamentos a serviço do utilizador de acordo com a sua finalidade. Dentro do geoprocessamento, essa ferramenta é chamada de Processamento Digital de Imagens (PDI).

A utilização do PDI visa a extração de informações de imagens, bem como, corrigir erros que podem ocorrer na captura delas pelos sensores, o que facilita a interpretação das imagens pelo usuário final. As correções necessárias a serem feitas podem ser decorrentes de interferências, ruídos, efeitos atmosféricos e outros (MACHADO, 2017).

Dentre os algoritmos matemáticos disponíveis nesse contexto de PDI, existem os índices de vegetação (MACHADO, 2017), que estão relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, podendo caracterizar a biomassa e produtividade de determinada cultura. Os índices visam destacar o contraste espectral entre a vegetação e o sol, para isso, os dados podem ser coletados por meio de imagens de satélite e por equipamentos próximos ao objeto de interesse (PONZONI *et al.*, 2010).

Um dos índices mais comuns para o monitoramento de vegetações é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que avalia o equilíbrio entre a recepção e a emissão de energia por parte dos objetos que estão na superfície da Terra, chamada de reflectância. Ao ser utilizado nas comunidades vegetais, o NDVI determina um valor que reflete o grau de “verdez” de uma área, ou seja, a quantidade de vegetação constante naquela região, bem como, o seu estado de saúde ou vigor no crescimento (MENESES-TOVAR, 2011).

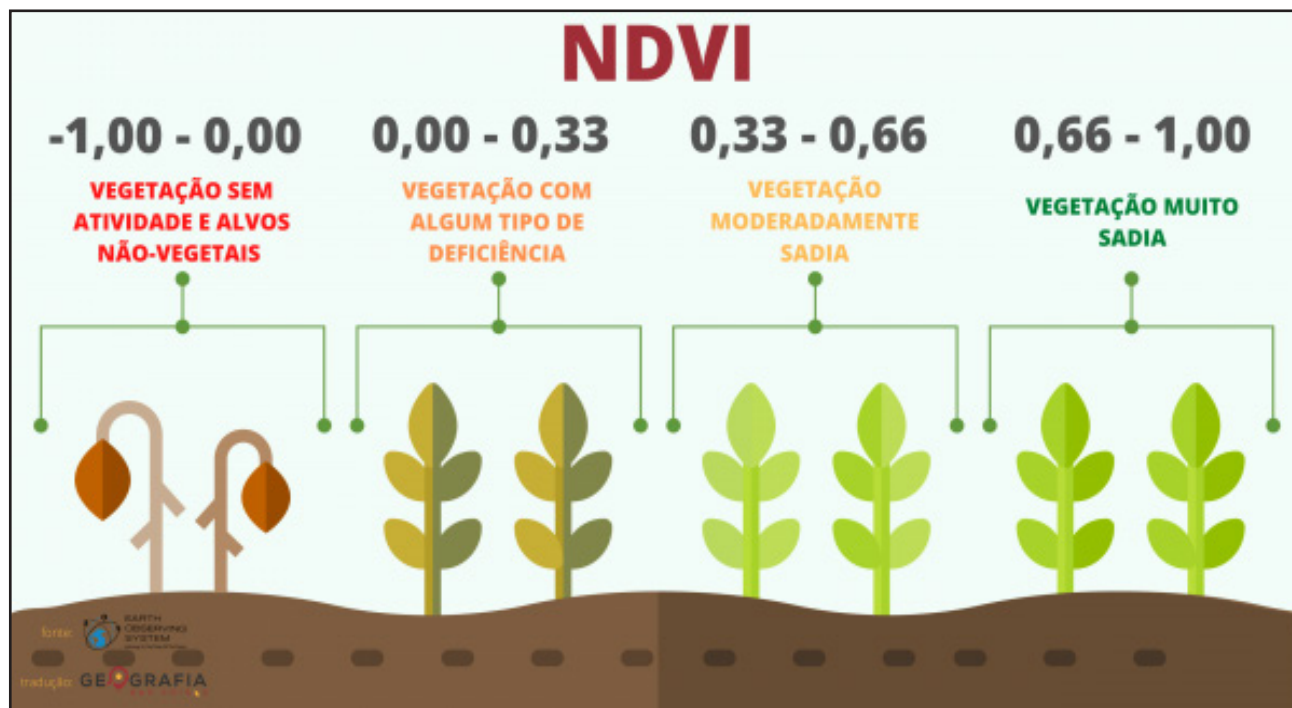
Esse índice foi criado em 1973 por dois cientistas, Rouse Jr. e Deering, como parte de um esforço para progredir em métodos de avaliação das condições da vegetação a partir de dados captados por sensores de satélite (SCCON Geospatial, 2023).

Para o monitoramento ambiental, o NDVI utiliza duas bandas espectrais no espectro eletromagnético: a região do vermelho visível, situada entre 630 nm a 690 nm, e a região do infravermelho próximo, localizada nos comprimentos de onda de 760 nm a 900 nm. A partir das informações das imagens captadas por satélites nessas faixas espectrais, o índice é calculado da seguinte forma (MENESES, 2012):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{Equação 1})$$

De acordo com a Equação 1, o NDVI resulta da diferença entre as reflectâncias do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho visível (RED) dividida pela soma dessas mesmas reflectâncias. Conforme Machado (2017), para os resultados obtidos são encontrados valores compreendidos entre -1 e 1, onde, quanto mais próximo de 1, maior possibilidade de presença vegetativa, por outro lado, valores mais próximos de -1, trazem menor indício de vegetação e, portanto, maior possibilidade de solo descoberto.

Figura 4. Relação entre o NDVI e a saúde da vegetação



Fonte: Adaptado de Geografia das Coisas (2024).

Mediante a Figura 4, é possível observar claramente a relação entre o resultado do índice e a saúde da vegetação. É importante ressaltar que, a utilização do NDVI é mais oportuna em situações que envolvem análises ao longo do tempo para uma mesma área, pois é mais provável de ser menos impactado pelas variações das condições atmosféricas (MENESES, 2012).

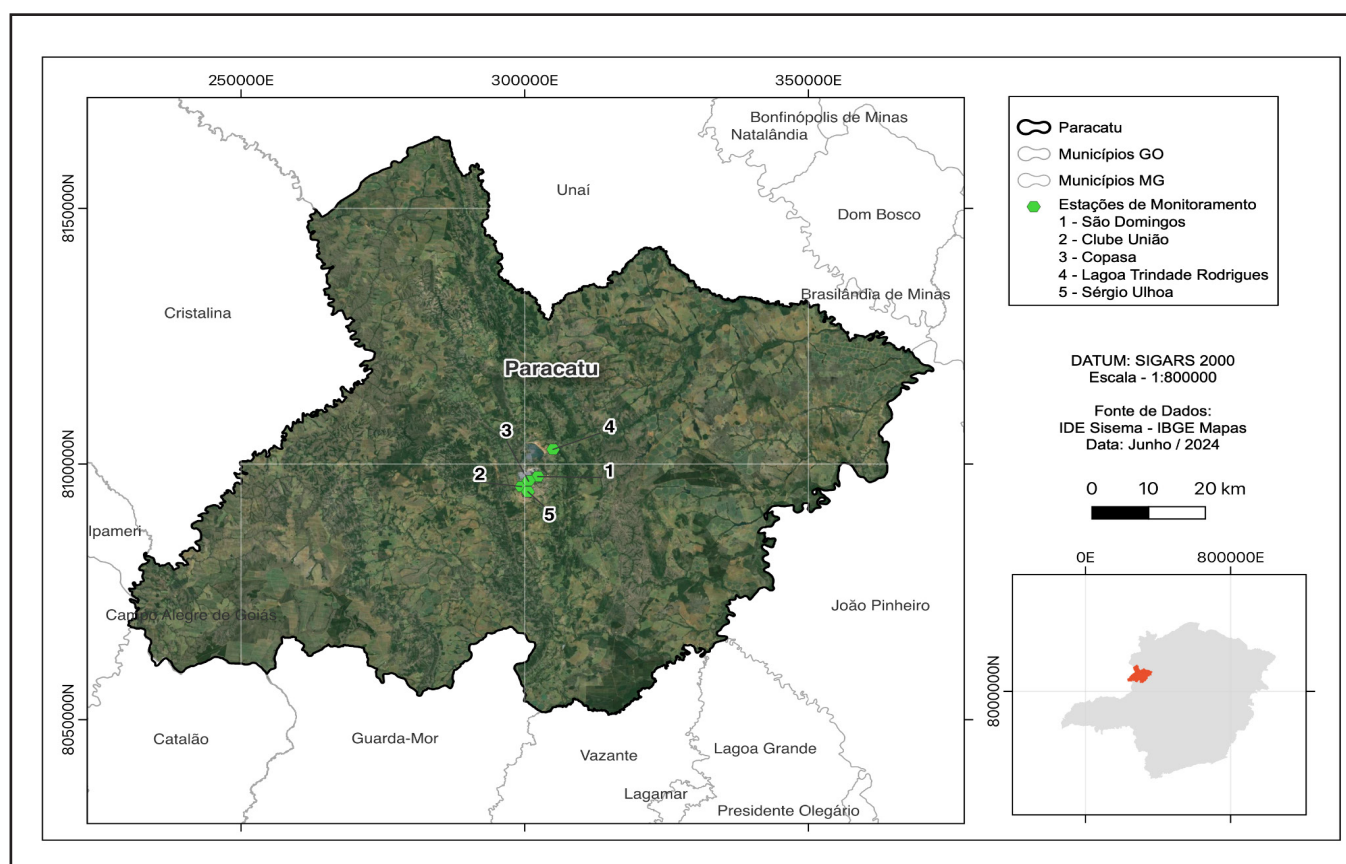
Paracatu

Paracatu é uma cidade localizada na Mesorregião Noroeste do estado de Minas Gerais e, em 2022, a sua população era de 94023 habitantes (IBGE, 2022). Entre habitantes de áreas urbanas e rurais, 87% da população situava-se em áreas urbanas e 23% em áreas rurais (IBGE, 2010). Historicamente, a cidade é conhecida pela exploração de metais preciosos, em especial, o ouro (ASTOLPHI *et al.*, 2021). Além disso, evidencia-se no estado pela produção de grãos e pela pecuária. Contudo, a mineração tem uma presença marcante devido às suas reservas de ouro, calcário, zinco e chumbo (PARACATU, 2024).

O PIB resultante das atividades econômicas da região alcança aproximadamente 2,8 bilhões de reais (IBGE, 2021). A Kinross Gold Corporation, uma empresa canadense especializada em mineração e comércio de ouro, opera na mina Morro do Ouro há pelo menos 15 anos, sendo responsável por aproximadamente de 22% dos empregos formais na região (KINROSS, 2024).

Através de um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) entre o Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) e a mineradora Kinross, foi acertada a criação de uma rede de monitoramento da qualidade do ar em Paracatu, para acompanhar diariamente as concentrações de partículas inaláveis, respiráveis e totais em suspensão devido às atividades da empresa canadense na região. Mediante esse TAC, foram instaladas 5 estações que monitoram parâmetros meteorológicos (velocidade do vento, direção do vento, temperatura e pressão atmosférica) e poluentes ($PM_{2,5}$, $PM_{2,5}$ e PTS). A Figura 5, a seguir, apresenta as estações de monitoramento constantes na região.

Figura 5. Estações de monitoramento da qualidade do ar de Paracatu

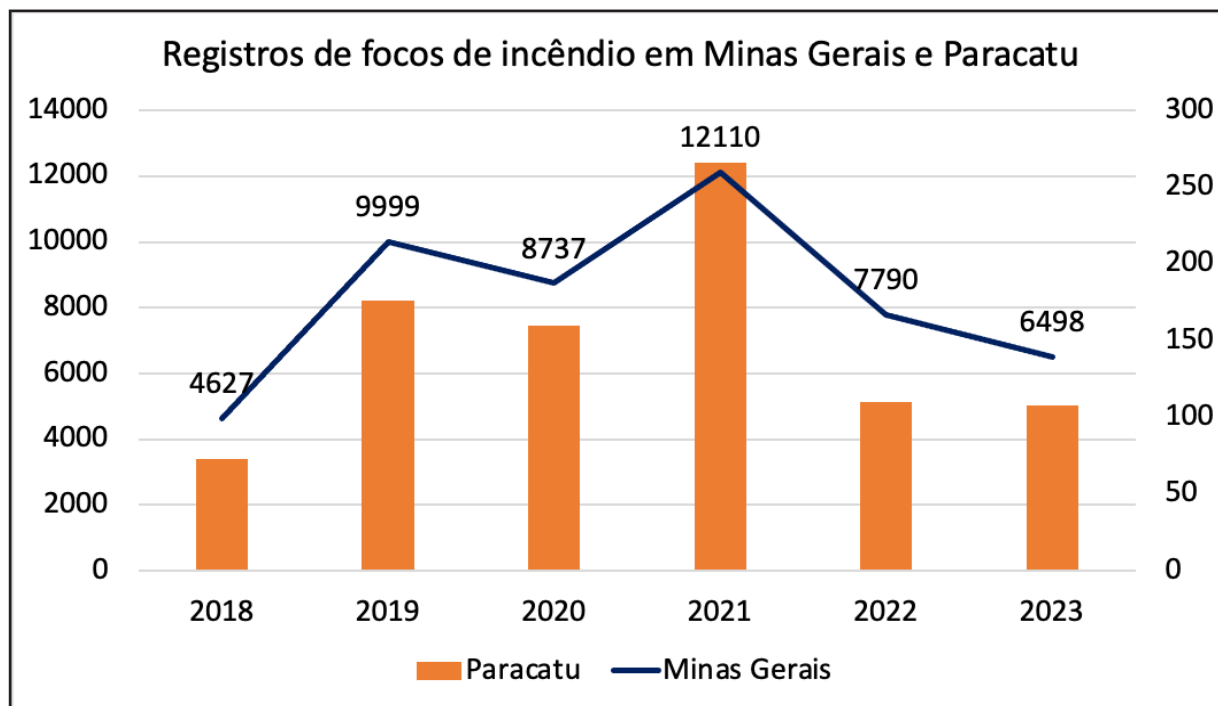


Fonte: Autores (2025).

O acompanhamento da qualidade do ar em Paracatu é ainda mais imprescindível devido aos altos números de focos de incêndio catalogados na região. Entre os anos de 2018 a 2023, a cidade foi presença constante no ranking das 5 localidades mineiras com maiores registros de focos de incêndio no estado (INPE, 2024). A Figura 6 mostra o número de focos catalogados pelo INPE para o estado e para a referida cidade.

A Figura 6 apresenta no eixo primário (linha) os números relativos ao estado de Minas Gerais e seus respectivos valores anuais e, em seu eixo secundário (barras), os registros de focos de incêndio para a cidade de Paracatu. Nota-se que, nos 4 primeiros anos do período analisado há uma crescente acentuada no número de focos entre 2018 e 2021, saindo de 73 para 266, respectivamente, com um aumento percentual de 264%. Ressalta-se que, nesse mesmo ano de 2021, Paracatu foi a cidade que apresentou o maior número de ocorrências de focos de incêndio do estado de Minas Gerais, assim como, no ano de 2019, observando 176 focos (INPE, 2024). Em outras palavras, nesse período analisado, a cidade do Noroeste do estado esteve duas vezes como campeã em números de focos de incêndio.

Figura 6. Número de focos de incêndio de 2018 a 2023 para Minas Gerais e Paracatu



Fonte: INPE (2024).

Diante desse cenário, o monitoramento da qualidade do ar, bem como, o uso de imagens de satélite são de suma importância para uma cidade que registra tantos números de focos de incêndio e tem uma presença marcante da atividade minerária. Afinal, essas ferramentas figuram como poderosas formas de avaliação de sustentabilidade, compreendendo o bem-estar social, a qualidade ambiental e o impacto no sistema econômico. Ademais, são importantes subsídios de avaliação, gestão, previsão, prevenção e de suporte a políticas públicas.

2

ASPECTOS METODOLÓGICOS



A estrutura metodológica deste livro adota uma abordagem interdisciplinar, fundamentada em métodos tanto qualitativos quanto quantitativos, com o objetivo de compreender os efeitos das queimadas na vegetação e na qualidade do ar no município de Paracatu, Minas Gerais, durante o período de 2022 a 2024. O estudo baseia-se na utilização de dados secundários, provenientes de fontes oficiais e confiáveis, como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), plataformas de monitoramento atmosférico, além de estudos científicos previamente publicados.

A análise da cobertura vegetal foi realizada utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido por meio de imagens de satélite de sensores remotos. Esse índice foi aplicado especificamente aos meses de janeiro e setembro de cada ano dentro do período considerado (2022-2024). O NDVI permitiu avaliar alterações na densidade e no vigor da vegetação, evidenciando os efeitos das queimadas e de outros fatores que podem causar degradação ambiental. A aplicação desse índice é crucial para quantificar a vegetação e identificar possíveis processos de degradação, como a perda de biomassa resultante dos incêndios.

Para a análise espacial da ocorrência dos focos de incêndio, utilizou-se o estimador de densidade Kernel, uma técnica estatística aplicada em geoprocessamento. Essa ferramenta permite a criação de mapas temáticos, que ajudam a identificar e avaliar áreas de maior concentração de queimadas, facilitando a compreensão das dinâmicas espaciais dos focos de incêndio. A utilização dessa técnica é fundamental para destacar as regiões mais afetadas pelos incêndios e para identificar padrões temporais e espaciais de ocorrência desses eventos.

Além disso, a análise da qualidade do ar foi central para este estudo, sendo realizada a partir dos dados de partículas inaláveis (PM₁₀), cujas concentrações diárias foram obtidas a partir de estações de monitoramento atmosférico. Esses dados foram cruzados com os registros dos focos de incêndio nos mesmos períodos de tempo para identificar correlações entre o número de focos e as variações na qualidade do ar. Esse processo permitiu levantar inferências sobre o impacto direto das queimadas nas condições atmosféricas da região, especificamente sobre a poluição gerada pelas partículas finas, que têm implicações diretas para a saúde pública.

A abordagem teórica que orienta o estudo abrange um referencial robusto sobre o histórico de queimadas no Brasil, os efeitos dessas práticas sobre a saúde humana e os mecanismos de monitoramento ambiental. A obra também explora o uso de geotecnologias, como o geoprocessamento, no controle e mitigação dos impactos ambientais. Dessa forma, o livro integra dados técnicos, análises científicas e contextos sociais para fornecer uma visão abrangente sobre a problemática das queimadas, com ênfase nas especificidades do município de Paracatu.

O estudo metodológico foi estruturado com base em um arcabouço teórico e técnico composto por artigos científicos, dissertações, teses e outros trabalhos acadêmicos consultados ao longo da pesquisa. As palavras-chave de busca utilizadas para direcionar as consultas bibliográficas foram: qualidade do ar, geoprocessamento, densidade de Kernel, NDVI, material particulado, queimadas, focos de incêndio, focos de calor e mineração de ouro. Essas palavras-chave foram fundamentais para assegurar a profundidade e a abrangência da revisão literária, fornecendo uma base sólida para as análises desenvolvidas.

A metodologia adotada visa, portanto, garantir um entendimento amplo e detalhado dos efeitos das queimadas na vegetação e na qualidade do ar, utilizando ferramentas

avançadas de monitoramento ambiental e geotecnologia, alinhadas a uma análise crítica e fundamentada sobre os impactos ambientais e de saúde na região de Paracatu.

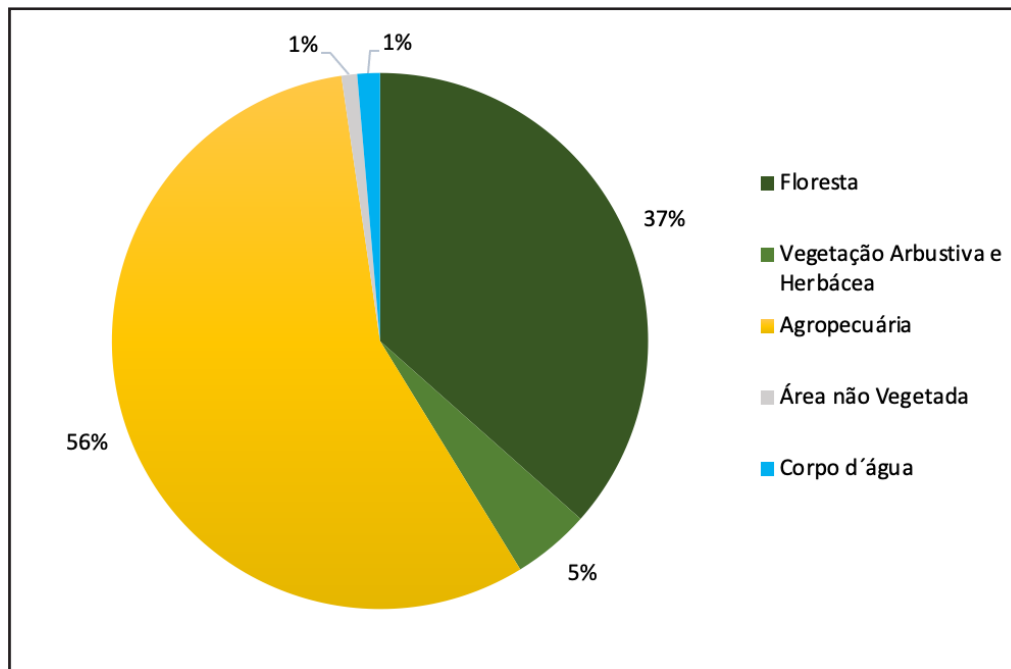
Área de estudo

A área analisada compreende todo o município de Paracatu, devido aos seus altos números de focos de incêndio. A região está localizada na Mesorregião Noroeste do estado de Minas Gerais (IBGE, 2022).

Em termos climáticos, prevalece na região um clima morno e, de forma geral, a temperatura varia de 14 °C a 33 °C. A estação seca dura 6,6 meses e o mês de menor precipitação é julho (12 mm de chuva), por outro lado, o período chuvoso compreende 5,4 meses, cujo mês de maior precipitação é dezembro, alcançando a marca de 260 mm de chuva. A velocidade dos ventos não apresenta variações expressivas na cidade, cuja maior parte do ano (8 meses) apresenta ventos calmos, que vão de julho a novembro. O restante do ano época de mais ventos, chega a apresentar a velocidade média acima dos 10,9 km/h. No geral, em termos de direção do vento, Paracatu recebe a maior parte proveniente do Leste (11 meses) e do Norte (1 mês) (WEATHER SPARK, 2024) e Nordeste (CETEM, 2013).

O seu território é contornado pelas bacias hidrográficas do Rio São Marcos (Bacia Federal do Rio Paranaíba) e pela bacia do Rio Paracatu (Bacia Federal do Rio São Francisco). A predominância topográfica é plana ou levemente ondulada e sua vegetação é típica de cerrado (MONTEIRO, 2015). Conforme dados do ano de 2023, a região de estudo apresenta o seguinte recorte territorial apresentado na Figura 7 (MAPBIOMAS, 2024).

Figura 7. Recorte territorial de Paracatu (2023).



Fonte: MAPBIOMAS, 2024.

Conforme a Figura 7, nota-se que, aproximadamente, 43% da região de Paracatu é natural e compreende a floresta (37%), a vegetação arbustiva e herbácea (5%), bem como, os recursos hídricos, que ocupam 1% de toda área. Em número absolutos, em torno de 351.000 hectares são remanescentes e 470.000 hectares são antrópicos (MAPBIOMAS, 2024).

Levantamento dos dados de focos de incêndio

O número de focos de incêndios entre os anos de 2022 e 2024 foram baixados gratuitamente através do monitoramento do Programa de Queimadas do INPE (2024). Para tanto, foram utilizados como filtros de pesquisa a cidade de Paracatu e os respectivos períodos de 01/01 até 31/12 de cada um dos anos supracitados. Os arquivos foram exportados em dois formatos de trabalho: *shapefile*, posteriormente utilizados no *software* “QGIS” versão 3.34.11-Prizren e; CSV, para análises no *software* “Microsoft Excel”.

Ressalta-se que os dados de focos de calor se baseiam em pontos que contém informações sobre os focos, possuindo as seguintes variáveis: data, hora de observação do foco, satélite, país, estado, município, bioma, dias sem chuva, precipitação, risco de fogo, coordenadas geográficas (latitude e longitude) e potência radiativa da queima (FRP).

É importante ressaltar que, para efeitos de padronização, o presente trabalho tratará de forma similar os termos “focos de calor” e “focos de incêndio”, visto que, conforme destacado por Santos *et al.* (2017), os dados de focos de calor funcionam como indicadores de queimadas, ainda que não forneçam informações concisas sobre a extensão das áreas queimadas ou a gravidade desses eventos. Mesmo assim, esses dados representam eficazmente a distribuição espacial e temporal dos focos e podem ser utilizados como ferramenta de análise de áreas queimadas, sobretudo na ausência de registros específicos sobre as queimadas.

Avaliação temporal do estudo

Paracatu figura como uma das cidades que mais apresenta focos de incêndio em Minas Gerais. Nesse sentido, para a avaliação do impacto das queimadas na área de estudo, o trabalho apresenta um recorte temporal que compara apenas os meses de janeiro e setembro dos últimos três anos. Essa escolha foi baseada em padrões identificados nos dados históricos de focos de incêndios previamente obtidos pelo Programa Queimadas do INPE. Em outras palavras, o menor número de registros ocorreu em janeiro e o maior, em setembro.

Janeiro, apresenta condições climáticas menos favoráveis à ocorrência de focos de incêndio, uma vez que está situado no calendário chuvoso da região. Desta forma, figura-se como mês representativo de condições pré-fogo, antes de danos significativos à vegetação, servindo como um referencial para a análise temporal.

Por outro lado, setembro coincide com a estação seca no Brasil e com a intensificação de práticas de uso do fogo também para manejo agrícola e pastagem, conforme o MAPBIOMAS (2024). Esse contexto faz com que seja um dos períodos de maior registro de focos, podendo representar um pico de impacto ambiental.

Por fim, a escolha desses dois meses permite uma análise robusta das condições ambientais antes e após o período de maior intensidade de queimadas observados para o período de 2022 e 2024. Além disso, esse referencial temporal permite as avaliações pretendidas pelo trabalho em termos de saúde de vegetação e qualidade do ar subsidiando sobre o impacto das mesmas na área de estudo.



Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

A metodologia compreende análise da área de estudos em termos de vegetação (bioma), quantificação da cobertura vegetal da região através de técnicas de processamento digital de imagens de satélite por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Após incêndios florestais, o NDVI é usado para avaliar a extensão dos danos e monitorar a recuperação da vegetação ao longo do tempo. Visto que, as imagens de satélite são comparadas antes e depois do incêndio, facilitando a mensuração da regeneração. Ressalta-se que, a geração do NDVI, bem como, o processamento digital das imagens de satélite foram realizados no *software* “QGIS”, versão 3.34.11-Prizren.

Satélite e imagens utilizadas

Para o presente trabalho, as imagens utilizadas foram adquiridas a partir do satélite *LANDSAT 8-9 OLI-TIRS Collection 2 Level 2*, disponibilizadas a partir do site oficial do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Foram baixadas imagens correspondentes aos meses de janeiro e setembro dos anos de 2022 a 2024, conforme a Tabela 2, cujas datas foram escolhidas para visualizar com mais assertividade a dinâmica de alteração da vegetação em Paracatu (MG), considerando mês de menor e de maior número de focos de incêndio: janeiro e setembro, respectivamente. É importante destacar que, para o mês de setembro, foram escolhidas duas datas que compreendessem tanto o início quanto o final do mês.

Na Tabela 2, também pode-se notar que, ao lado das datas, há a porcentagem de cobertura de nuvens nas imagens escolhidas. A metodologia levou em consideração as imagens com a menor porcentagem de nuvens sobre a terra dentro do banco de dados disponível para download, visto que, conforme Salgado *et al.* (2019), a queima de vegetação e a presença de nuvens dificultam a avaliação óptica das imagens geradas de satélites.

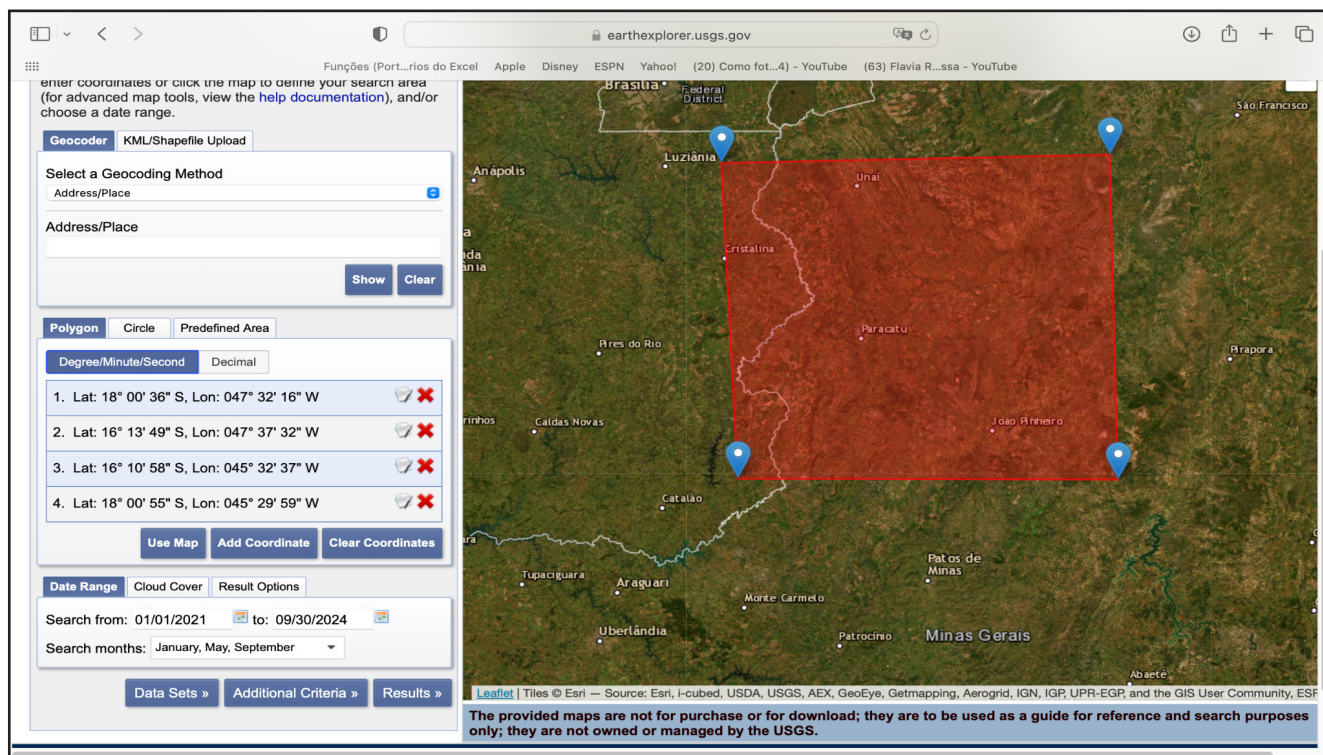
Tabela 2. Datas das imagens do LANDSAT 8-9

Mês	2022	2023	2024
Janeiro	20/01 (2%)	15/01 (29,4%)	18/01 (13%)
Setembro	01/09 (0%)	04/09 (0%)	06/09 (3%)
	17/09 (21,7%)	20/09 (0%)	30/09 (0%)

Fonte: Autores (2025).

Ressalta-se que, foram escolhidas as bandas de superfície de reflectância de nível 2: B01 (ultra-azul), B02 (azul), B03 (verde), B04 (vermelho), B05 (infravermelho próximo), B06 e B07, ambas de infravermelho de ondas curtas. Todas as imagens utilizadas apresentam a resolução de 30 metros e, dentre alguns de seus principais empregos estão: a análise de vegetação, uso da terra, mapas de cobertura do solo e monitoramento de mudanças, fatores esses que justificam o emprego no presente estudo. Ademais, como critério de busca espacial, utilizou-se a criação de um polígono capaz de compreender todo o território da cidade de Paracatu, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8. Interface ilustrativa do polígono de busca



Fonte: Adaptado de Serviço Geológico dos Estados Unidos (2024).

Após o download das bandas espectrais do LANDSAT, foi gerado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) através do *software* QGIS, sendo processado para criar uma imagem raster renderizada em falsa-cor, onde as tonalidades variavam de vermelho (representando os menores valores do índice, -1) até verde escuro (os maiores valores do índice, +1). O processamento dessa forma foi fundamental para analisar e comparar a saúde da vegetação, pois, o contraste em cores permite uma visualização mais elucidada das condições ambientais, bem como, a visualização de regiões específicas com base na densidade da vegetação.

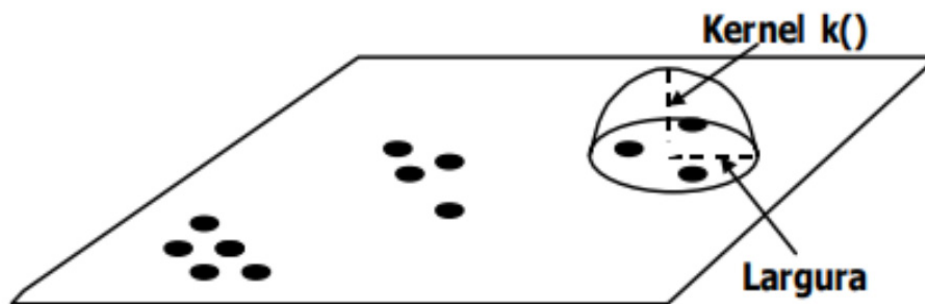
O modo de classificação utilizado para a análise foi o quartil, com o objetivo de enfatizar as diferenças entre os valores mais altos e mais baixos do índice NDVI. Essa abordagem foi escolhida devido à natureza visual do índice, onde variações de contraste são essenciais para identificar transições sutis na saúde da vegetação, destacando tanto as áreas mais degradadas quanto as de vegetação densa. Essa metodologia também permitiu uma análise eficaz para destacar a heterogeneidade da paisagem.

Densidade de focos de incêndio

A fim de analisar a densidade de registros de focos de incêndio no município de Paracatu, foi utilizado o estimador de Kernel, que é um método simplificado de se obter a estimativa da intensidade de um fenômeno pelo valor de uma determinada área. Além disso, fornece uma representação visual da distribuição dos dados numa localidade através da sua representação em um mapa.

Através dele é desenhada uma vizinhança circular ao redor de cada ponto dos dados amostrais (Figura 9), correspondendo ao raio de influência, e então é aplicada o valor de 1 na posição do ponto da amostra e 0 na fronteira do *kernel* (HOKI, 2020).

Figura 9. Método de Kernel.



Fonte: Adaptado de Druck et al. (2004).

O estimador de kernel realiza uma contagem de todos os pontos dentro de uma região de influência, ponderando-os pela distância de cada um à localização de interesse (DRUCK et al., 2004). Diante disso, para cada *kernel*, o modelo geoestatístico aplica a função matemática dada pela Equação 2 a seguir (HOKI, 2020):

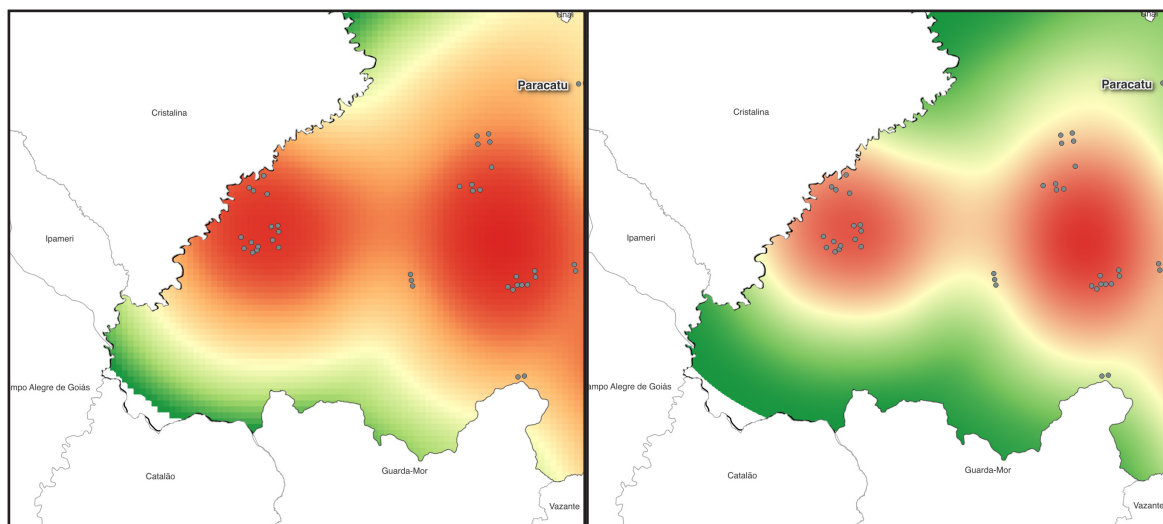
$$f(s) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: $f(s)$ é a estimativa de densidade no local s , n é o número de observações da amostra, h é a largura de banda ou tamanho do *kernel*, K é a função do *kernel* e d_i é a distância entre o local s e a localização da i -ésima observação do espaço amostral utilizado.

Para o presente trabalho, os dados de focos de incêndios de 2022 a 2024 foram baixados através do monitoramento do Programa de Queimadas do INPE (2024) em extensão .CSV e foram analisados no *software* “QGIS” versão 3.34.11-Prizren. O estimador de densidade de *kernel* foi aplicado aos dados provenientes do mês de setembro, de cada um dos referidos anos, para averiguar a concentração geoespacial dos registros de focos e, foi aplicado também aos dados acumulados dos três anos. Ademais, para a entrada de parâmetros no *software*, foram considerados os seguintes valores para a geração dos mapas:

- Tamanho do pixel: 0,1 km;
- Raio de influência de *kernel*: 30 km;
- Formato *kernel*: Quártico.
- Cores: vermelho para densidade muito alta; laranja para densidade alta; amarelo para densidade média; verde claro para densidade baixa e verde escuro para densidade muito baixa (BARBORA et al., 2014; HOKI, 2020).

O tamanho do pixel, ou a dimensão da célula, define a granulidade aparente da concentração de *kernel* no mapa (Figura 10). Valores mais altos produzem uma resolução baixa e tornam a colorização do mapa menos fluida.

Figura 10. Representação do tamanho do pixel de *kernel*.

Fonte: Fonte: Autores (2025).

O raio de influência de *kernel* impacta na análise que se quer fazer, ou seja, raios de influência menores trazem análises mais pontuais e locais, por outro lado, quilometragens maiores permitem incluir uma área mais vasta e trazer uma visão geral da dispersão dos dados, objetivo do presente trabalho. Por fim, o formato *kernel* impacta também na suavização do estimador. Optou-se pelo “Quártico” por desejar limites bem definidos entre as áreas de alta e baixa densidade.

Coleta de dados de qualidade do ar

O acompanhamento da qualidade do ar na cidade de Paracatu compreende a recepção de dados de 5 estações de monitoramento automático situadas na área de estudo: Clube do União, Copasa, Lagoa Trindade Rodrigues, São Domingos e Sérgio Ulhoa. Essas estações captam as concentrações de partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis e respiráveis (PM_{10} e $PM_{2,5}$), além de dados meteorológicos como pressão atmosférica, temperatura e direção e velocidade do vento.

Nesse sentido, a presente pesquisa utilizou dados de partículas inaláveis provenientes do monitoramento contínuo da região, considerando os anos de 2022 e 2024. A escolha do lapso temporal, bem como, a especificidade do poluente em questão, são justificadas pelo maior volume de dados validados disponíveis e divulgados pelo órgão competente: Núcleo de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões Atmosféricas (NQA) da Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Ademais, conforme CARMO *et al.* (2013), o PM_{10} figura como um dos principais poluentes que são lançados na atmosfera consequentes da prática da queima de vegetação.

Os dados de 2022 e 2023 foram baixados do próprio site do NQA/SEMAD, sendo disponibilizados à população já avaliados e validados em arquivo de formato *Excel* contendo dados horários das concentrações de poluentes e das variáveis meteorológicas monitorados pela respectiva estação automática. Por outro lado, os dados de monitoramento referentes ao ano de 2024 ainda não passaram pelo processo de validação interna do NQA/SEMAD e, por esse motivo, foram disponibilizados mediante contato com o núcleo, porém, sem tratamento.

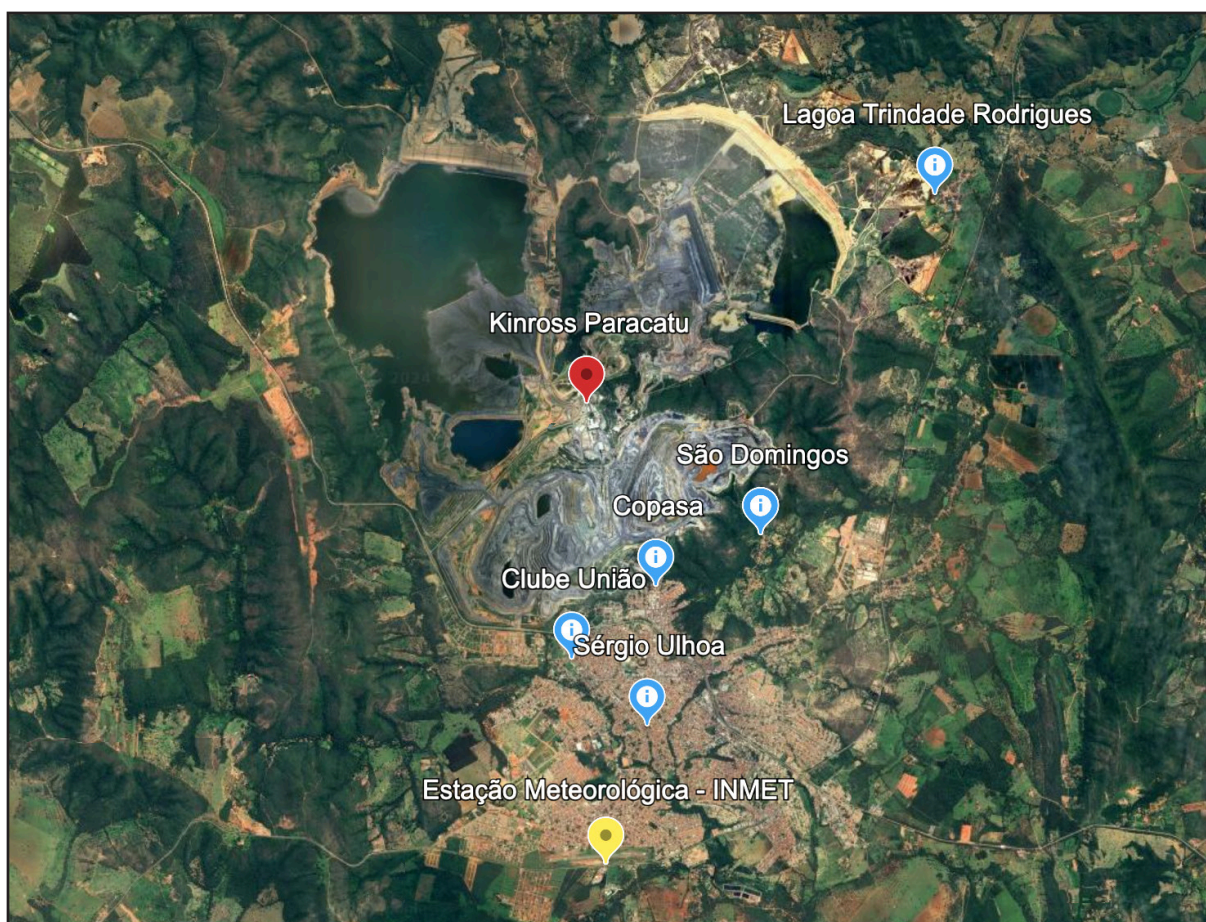
Assim, para o presente estudo, foi necessário trabalhar com dados brutos, que de-

mandaram uma análise prévia para a exclusão de valores negativos ou previamente sinalizados como invalidados pela empresa responsável pelo monitoramento, a Kinross Gold Corporation, garantindo maior confiabilidade nas análises realizadas.

Coleta de dados de precipitação

Em complementação aos dados de material particulado, o presente estudo utilizou dados de precipitação obtidos a partir da estação automática de meteorologia localizada em Paracatu, situada na latitude -17,244444 e longitude -46,881667, identificada pelo código A571. A Figura 11 mostra a localização da estação meteorológica, das estações de monitoramento da qualidade do ar (já citadas anteriormente) e da mineradora Kinross.

Figura 11. Visão aérea das estações meteorológica e da qualidade do ar



Fonte: Google Earth, 2024.

A estação, que integra a rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), opera desde a sua instalação em 15 de março de 2018 e está a uma altitude de 705 metros. Nota-se, a partir da Figura 11, que o monitoramento das variáveis meteorológicas ocorre ao sul da concentração populacional de Paracatu e da mineradora Kinross. Os dados foram baixados do próprio site do INMET, sendo disponibilizados em tempo real à população em arquivo de formato *Excel*, sem controle de qualidade, contendo diversos parâmetros, dentre eles: data, horário, temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade do vento, direção do vento, radiação e chuva.

A inserção desses dados no presente estudo é fundamental para complementar as análises relacionadas à qualidade do ar, visto os impactos significativos das condições me-

teorológicas nas dinâmicas atmosféricas.

Análise metodológica dos dados

Inicialmente, foi feita uma avaliação prévia de todos os dados baixados: qualidade do ar, precipitação e focos de incêndio. A partir disso, foram averiguadas situações de ausência e invalidações nesses dados, situações comuns em monitoramento ambiental.

O segundo passo foi fazer a estatística descritiva tanto para os dados supracitados quanto para o estimador de Kernel e o NDVI, ainda que, esses dois últimos, tenham uma abordagem qualitativa e imagética. Afinal, os valores dão maior embasamento para as análises visuais. Nesse sentido, considerando os meses de janeiro e setembro, para os anos de 2022, 2023 e 2024, foram calculados: valores mínimo e máximo, média, mediana e desvio padrão. Diante disso, no presente trabalho, serão encontradas duas vertentes de comparações:

- a) para anos diferentes foram feitas comparações de um mesmo mês: versa mais sobre uma análise temporal;
- b) para o mesmo ano, foram feitas análises comparativas de meses diferentes: diz respeito a uma comparação entre padrões de comportamento das variáveis analisadas.

3

RESULTADOS E DISCUSSÃO: IMPACTOS DAS QUEIMADAS NA VEGETAÇÃO E NA QUALIDADE DO AR EM PARACATU – MG (2022-2024)



Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise dos dados relacionados ao impacto das queimadas na vegetação e na qualidade do ar no município de Paracatu, Minas Gerais, durante o período de 2022 a 2024. As metodologias aplicadas incluíram a utilização do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o estimador de densidade de Kernel, e a análise das concentrações de material particulado (PM10) em conjunto com os focos de incêndio e dados meteorológicos, como a precipitação. A seguir, discutem-se os resultados de cada uma dessas análises.

a) Análise do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

A análise do NDVI foi realizada com base em imagens de satélite adquiridas para os meses de janeiro e setembro durante os três anos de estudo (2022-2024). O NDVI é um índice amplamente utilizado para monitorar a saúde da vegetação, uma vez que reflete a diferença entre a radiação refletida pela vegetação em diferentes comprimentos de onda. Nos períodos analisados, observou-se uma redução significativa nos valores do NDVI, especialmente em áreas próximas aos focos de incêndio. As imagens indicaram uma clara degradação da vegetação em áreas mais suscetíveis às queimadas, com uma diminuição da densidade e vigor da vegetação nos meses pós-incêndio, especialmente no mês de setembro, após o pico de queimadas. Este padrão sugere que os incêndios causaram uma diminuição na capacidade fotossintética das plantas, resultando em menor cobertura vegetal.

b) Estimador de Densidade de Kernel Aliado ao NDVI e Focos de Incêndio

O estimador de densidade de Kernel foi empregado para analisar a espacialização dos focos de incêndio e sua correlação com as áreas de degradação detectadas pelo NDVI. Essa técnica gerou mapas temáticos que permitiram identificar as regiões com maior concentração de focos de incêndio, bem como sua relação com a vegetação nas áreas afetadas. A análise revelou que as áreas com maior densidade de focos de incêndio coincidem com as regiões que apresentaram os menores valores de NDVI, sugerindo que os incêndios são um dos principais fatores responsáveis pela degradação da vegetação em Paracatu. A combinação do estimador de densidade de Kernel com o NDVI possibilitou um entendimento mais detalhado da dinâmica espacial das queimadas e de seus impactos sobre o ecossistema local.

c) Material Particulado, Precipitação e Focos de Incêndio

A qualidade do ar foi analisada com foco nas concentrações de material particulado, especialmente as partículas PM10, que são de grande importância para a saúde humana. Os dados de monitoramento da qualidade do ar indicaram que as concentrações de PM10 aumentaram significativamente durante os períodos com maior número de focos de incêndio. Observou-se uma correlação positiva entre os incêndios e os picos de material particulado na atmosfera, especialmente nos meses secos de setembro. Além disso, a precipitação foi analisada como um fator mitigador dos efeitos dos incêndios. Em períodos de maior precipitação, foi possível observar uma redução na concentração de partículas no ar, sugerindo que a chuva tem um efeito positivo na dissipação dos poluentes atmosféricos. No entanto, durante os períodos secos, a intensidade das queimadas e a consequente elevação das concentrações de PM10 tiveram um impacto direto e significativo na qualidade do ar, o que representa um risco para a saúde da população, especialmente para grupos vulneráveis.

Esses resultados ressaltam a complexa interação entre as queimadas, a vegetação e a qualidade do ar, destacando a importância do monitoramento contínuo e da implemen-

tação de políticas públicas voltadas para a mitigação dos efeitos ambientais e de saúde causados pelos incêndios em Paracatu. A combinação das metodologias de análise, como o NDVI, o estimador de densidade de Kernel e o monitoramento de material particulado, fornece uma visão abrangente dos impactos das queimadas, contribuindo para a compreensão dos desafios ambientais e de saúde enfrentados pela região.

Desta forma, primeiramente, serão apresentadas a análise do NDVI em duas vertentes: abordagem dos dados da estatística descritiva das camadas raster geradas (imagens), evidenciando informações sobre média, desvio padrão e variabilidade dos índices vegetativos e; posteriormente, análise dos padrões visuais, permitindo uma avaliação qualitativa dos contrastes sazonais entre janeiro e setembro de cada ano. Ressalta-se que, a comparação visual foi ordenada de acordo com os valores do índice vegetativo (-1 a 1), assegurando que todas as vegetações de mesma saúde apresentassem a mesma coloração, auxiliando na interpretação e comparação dos resultados. Não foram definidos valores específicos para recursos hídricos, solo exposto, vegetação densa, rasteira ou área agrícola, bem como, área urbana e edificações.

Em seguida, foram apresentados os resultados da densidade de Kernel para os focos de incêndio, numa análise mais global para o território de Paracatu, tanto quantitativamente quanto qualitativamente. A partir desses resultados, realizou-se um recorte nas áreas de maior densidade de Kernel, para averiguar alteração nos valores de NDVI.

Por fim, no que tange a qualidade do ar, foram feitas inferências comparativas acerca das concentrações de material particulado inalável para janeiro e setembro de 2024, frente aos números de focos de incêndio registrados e os dados de precipitação, a fim de discutir uma possível relação entre esses fatores ambientais. É importante ressaltar que, nesse último caso, não foram apresentados resultados para 2022 e 2023, visto a ausência de dados de precipitação para os referidos anos.

Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

Análise quantitativa

A geração do NDVI a partir do software QGIS mostrou-se uma ferramenta de fácil implementação, sendo eficiente para a geração das imagens raster baseadas nas bandas B04 (vermelho) e B05 (infravermelho próximo) do satélite *LANDSAT* 8-9. Além disso, o índice permitiu a obtenção de resultados qualitativos, por meio da interpretação visual das imagens geradas, e quantitativos, por meio das estatísticas básicas fornecidas pelo próprio raster, como valores mínimo, máximo, média e desvio-padrão. Essa abordagem forneceu subsídios fundamentais para avaliar o estado da cobertura vegetal de uma forma mais ampla do município de Paracatu.

Na Tabela 3 são apresentados os dados quantitativos para cada um dos índices gerados, considerando o período de 2022 a 2024, tanto para os meses de janeiro e setembro, com suas respectivas datas. Para facilitar o entendimento, cada um dos arquivos NDVI gerados foram nomeados de acordo com “dia” + “mês” + “ano”.

Tabela 3. Dados quantitativos do NDVI para cada data de análise.

NDVI	Máximo	Média	Mínimo	Amplitude	Desvio Padrão
20JAN22	0,890872	0,340888	-0,275859	1,166731	0,121186
01SET22	0,754409	0,177813	-0,353673	1,108081	0,069003
17SET22	0,64788	0,158695	-0,318752	0,966632	0,065946
15JAN23	0,931171	0,289915	-0,35685	1,288021	0,14427
04SET23	0,555329	0,17867	-0,245207	0,800536	0,067808
20SET23	0,674462	0,191472	-0,531491	1,205954	0,074002
18JAN24	0,861175	0,319808	-0,269916	1,131092	0,121096
06SET24	0,539281	0,170529	-0,301121	0,840402	0,049758
30SET24	0,569837	0,185433	-0,223784	0,793621	0,063071

Fonte: Autores (2025).

Conforme a Tabela 3, nota-se que, os maiores valores do NDVI foram encontrados para as datas de janeiro de cada um dos anos, 15JAN23 (0,931171), 20JAN22 (0,890872) e 18JAN24 (0,861175). Isso também pode ser percebido através dos valores das respectivas médias, indicando a presença de uma vegetação mais sadia, em comparação com o mês de setembro de cada um dos respectivos anos.

Ademais, essa mesma tendência pode ser observada tanto para o desvio padrão quanto para os valores da amplitude, podendo indicar grande variabilidade entre áreas de vegetação vigorosa e áreas degradadas ou expostas, bem como, diversidade vegetativa. Visto que, conforme Sannier *et al.* (1998), em áreas não homogêneas, diferentes níveis de NDVI podem resultar de diferenças nas características ecológicas, tais como, solo e o tipo de vegetação presente na região e não serem decorrentes da saúde vegetativa.

Por outro lado, os valores mais baixos para o índice foram observados no mês de setembro, 01SET22 (-0,353673), 20SET23 (-0,531491) e 06SET24 (-0,301121). Esse resultado pode indicar possíveis áreas com baixa cobertura vegetal ou solo exposto, sendo também refletido nas médias quantitativas do mês de setembro de cada um dos anos.

A comunidade científica tem mostrado que o NDVI apresenta uma correlação com algumas variáveis climáticas em diversas condições ambientais (GURGEL *et al.*, 2003), como exemplo, tem-se o comportamento do NDVI com a precipitação, ao se considerar períodos úmidos e secos (LIU *et al.*, 1991), bem como, o tipo de bioma (BATISTA *et al.*, 1997).

O NDVI foi comparado para dois meses em épocas diferenciadas: janeiro, no período chuvoso e setembro, no período seco. Diante disso, a variabilidade no resultado do NDVI pode estar fortemente associada às condições climáticas. Visto que, segundo Covele (2011), a vegetação tem respostas diferenciadas, em termos de seu desenvolvimento, ao se comparar estações secas e chuvosas, sendo a precipitação uma variável fundamental nesse contexto.

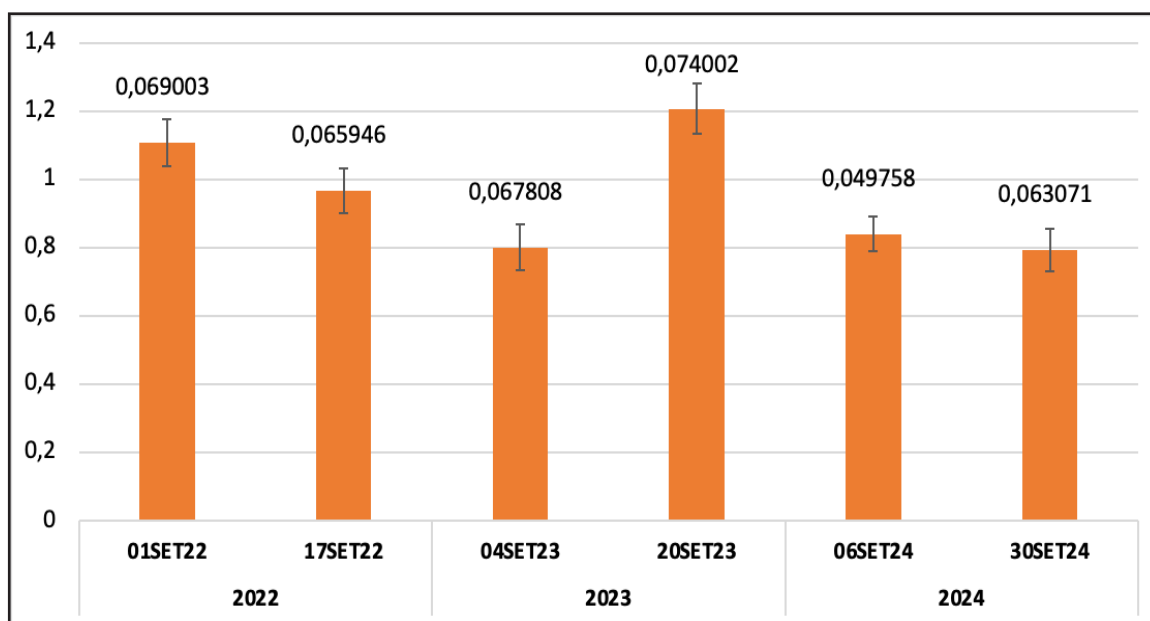
Ademais, Paracatu está situada na região central do país, cujo a predominância é do Cerrado brasileiro. De acordo com Gurgel *et al.* (2003), os valores máximos de NDVI para esse bioma são mais encontrados entre março e maio, por outro lado, os menores núme-

ros ocorrem em setembro, corroborando com os resultados numéricos encontrados aqui para 2022, 2023 e 2024.

Fausto *et al.* (2013) também analisaram o NDVI para uma área de cerrado e notaram que havia uma variação substancial nos valores do índice com a mudança de estação, cujo período seco, devido ao comportamento peculiar do bioma, muitas espécies de arbustos perdem suas folhas, trazendo como consequência uma redução no índice.

Outro ponto digno de ser notado, são os resultados quantitativos quando se compara datas diferentes para o mês de setembro. Não há significativa variabilidade entre elas, o que pode ser observado pelo desvio padrão e pela amplitude (diferença entre o máximo e o mínimo), conforme pode ser observado na Figura 12.

Figura 12. Variação do NDVI e desvio padrão para os dados de setembro



Fonte: Autores (2025).

Como pode ser visto na Figura 12, tem-se valores similares tanto para a amplitude, quanto para o desvio padrão, o que sugere uma menor variabilidade entre os valores de NDVI para o mês de setembro, que pode estar relacionada a uma maior homogeneidade da cobertura vegetal nesse período.

Entretanto, em 2023, os valores destoaram ligeiramente, com desvio padrão de 0,067808 (04SET23) e 0,074002 (20SET23), sugerindo maior dispersão em relação do início para o final do mês, o que pode ser observado também com o aumento da amplitude, 0,800536 e 1,205954, respectivamente. Isso reflete a maior variação entre os valores máximo e mínimo para o NDVI, indicando uma grande diferença entre áreas de vegetação saudável e degradada nesse período. Ressalta-se que, para 2023, o valor mínimo do NDVI teve uma piora de -0,245207 (04SET23) para -0,531491 (20SET23), o que pode ser uma consequência dos focos de incêndio, da intensificação de atividades antrópicas ou de outros impactos ambientais intensificados nesse mês e ano.

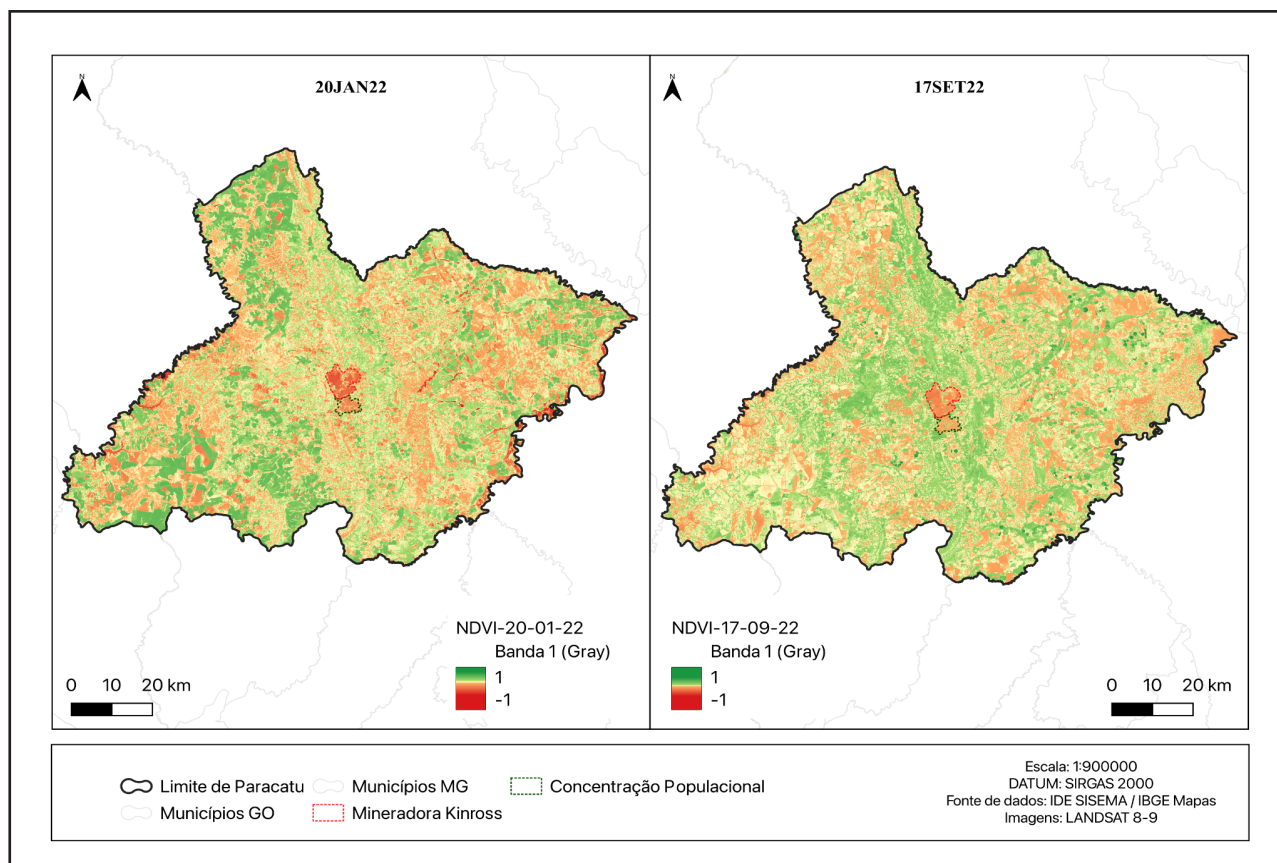
Análise qualitativa

A análise visual do NDVI permitiu identificar variações nos padrões de saúde da vegetação na área de estudo, auxiliando no monitoramento da mudança da paisagem, seja

por diferentes práticas de manejo de solo ou pelo impacto das atividades antrópicas. Esse índice permitiu observar o aspecto vegetativo da área de estudo para os diferentes anos, conforme levantado por Meneses-Tovar (2011), onde, o NDVI, quando aplicado às comunidades vegetativas, estabelece o quão verde está a região.

Nesse sentido, a seguir são apresentados os resultados comparativos do índice para os meses de janeiro e setembro de cada um dos anos de 2022 (Figura 13), 2023 (Figura 14) e 2024 (Figura 15).

Figura 13. NDVI 2022



Fonte: Autores (2025).

Conforme pode ser visto na Figura 13, há visível mudança da cobertura vegetal quando se compara o NDVI para 20JAN22 e 17SET22, sobretudo em toda porção oeste do território da área de estudo. Em janeiro tem-se a predominância de valores de NDVI mais elevados (próximos de 0,89), indicando uma vegetação muito mais sadia e possivelmente mais densa, podendo estar relacionado ao período chuvoso típico do verão brasileiro. Para além disso, há maior heterogeneidade espectral na representação visual do mês de janeiro, em outras palavras, consegue-se perceber maior discrepância nas cores que compõem a camada raster gerada, ressaltando regiões onde a vegetação apresenta mais vigor vegetativo, com um verde mais saturado.

Por outro lado, ao observar a representação visual do NDVI para 17SET22, conforme a Figura 8, nota-se uma maior homogeneidade no padrão espectral da camada raster gerada, sugerindo menor variabilidade espacial dos índices de vegetação, típico de uma paisagem da estação seca. Além disso, segundo a Tabela 3, observa-se uma diminuição considerável nos valores de NDVI, com um máximo de 0,64788 e mínimo de -0,318752, comparados com 20JAN22.

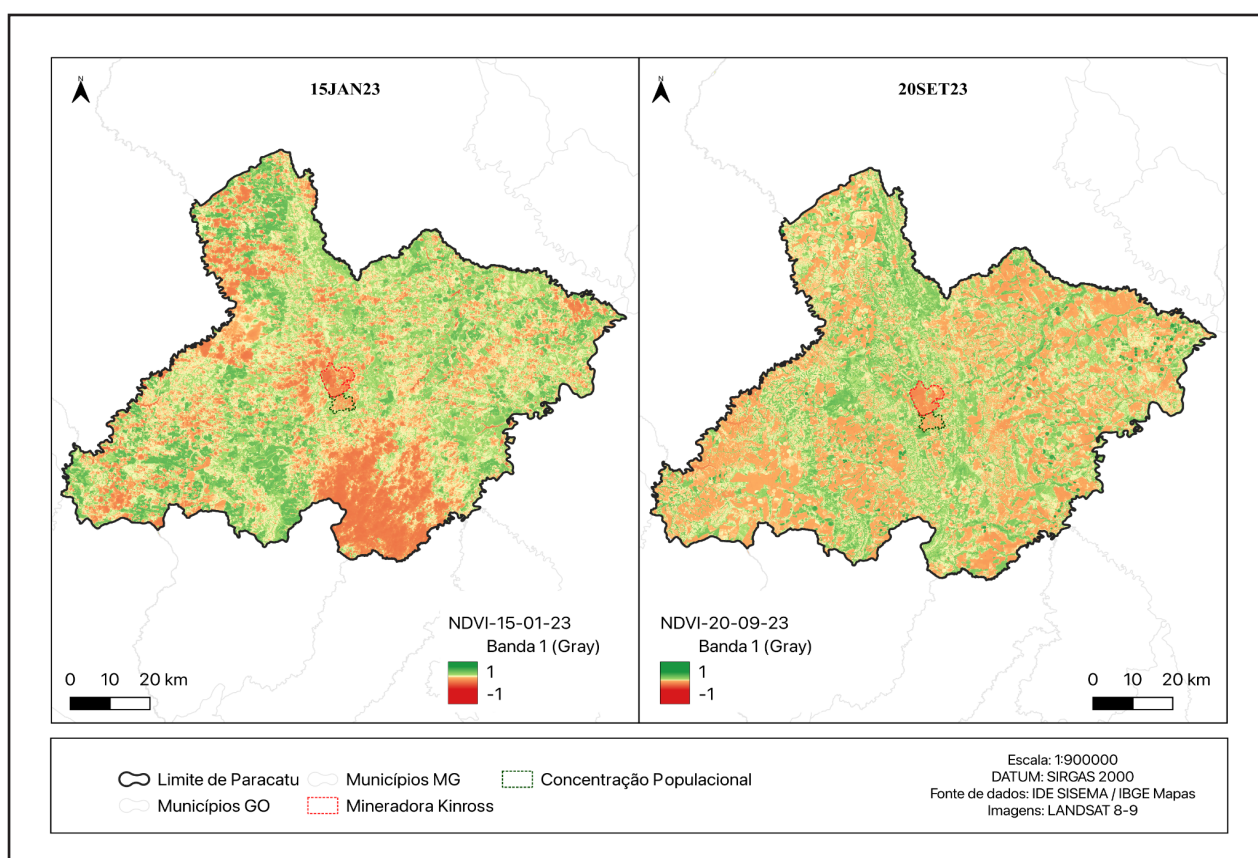
No geral, para o ano de 2022, o índice saiu do máximo de 0,890872 (janeiro) para

0,64788 (setembro), podendo ser considerada moderadamente sadia. Nesse sentido, sugere-se a possibilidade de que houve baixa disponibilidade hídrica ou mesmo o impacto dos focos de incêndio na região.

Resultados similares foram encontrados por Santos *et al.* (2020), ao analisar o padrão da cobertura vegetal da cidade de Teixeira/MG, considerando também a geração de imagem representativa da estação seca (setembro) e da chuvosa (dezembro). Conforme os autores, dezembro apresentou valores maiores para o índice de vegetação quando comparados ao mês de setembro, indicando maior vigor e adensamento vegetacional. Além disso, o padrão visual do NDVI para a referida bibliografia saiu de uma imagem raster homogênea para heterogênea.

A Figura 14 apresenta os resultados do NDVI para o ano de 2023. Nota-se que o índice teve um incremento para o valor máximo, em comparação com o ano anterior e, trouxe resultados mais ainda mais baixos para o valor de mínimo, para ambos os meses analisados.

Figura 14. NDVI 2023



Fonte: Autores (2025).

A partir da Figura 14, regiões de coloração laranja bem saturadas são encontradas para a data de janeiro, diferentemente do NDVI do mês de setembro. Essa discrepância visual é condizente com áreas cobertas por nuvens, uma vez que se trata de coloração bem marcante e com baixa variação do nível de cinza, conforme reportado por Siravenha *et al.* (2013). Isso pode ser claramente observado, sobretudo nas regiões noroeste e sudeste da imagem, lembrando que, por ser uma época chuvosa, há um aumento na cobertura de nuvens (MARTINS *et al.*, 2018).

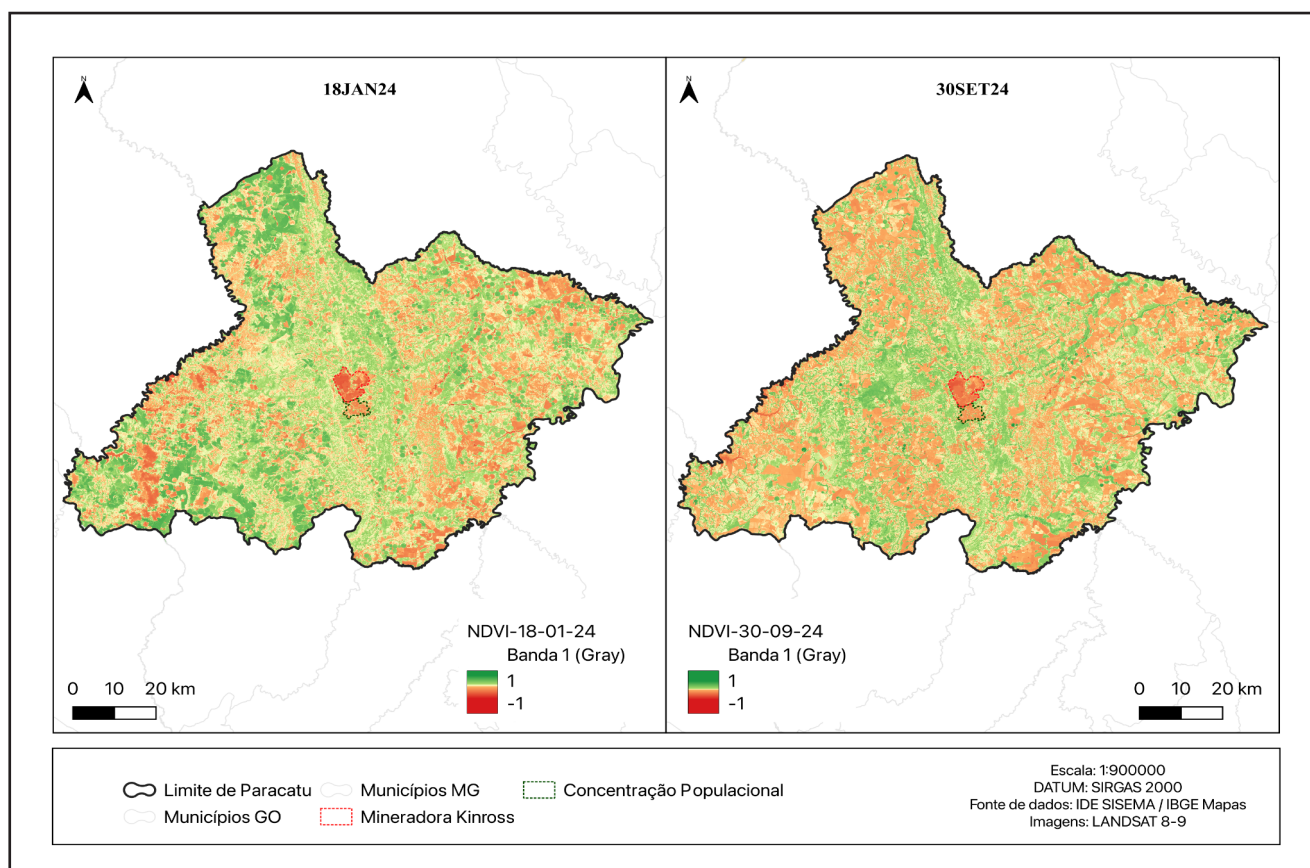
Essa ocorrência pode ter impactado nos resultados do NDVI, visto que, conforme Victoria *et al.* (2009), as imagens de satélites estão condicionadas a uma série de interferentes atmosféricos, dentre eles a presença de nuvens, bem como, sombras e aerossóis.

Ainda assim, visualmente, o NDVI de 15JAN23 mostrou uma maior variação espacial dos valores do índice, podendo observar maior diversidade da saúde vegetal, visto a discrepância entre a vibração dos diferentes verdes presentes. Isso sugere que, durante este período, algumas áreas apresentaram alto vigor vegetativo, possivelmente impulsionado pelas condições climáticas características do período chuvoso.

Já em setembro de 2023 (20SET23), houve uma queda substancial nos valores de NDVI, com o máximo diminuindo para 0,674462 e o mínimo diminuindo para -0,531491. Visualmente, observa-se uma grande tendência uniforme para setembro, sem grandes variações perceptíveis no padrão da vegetação. Isso corrobora com o baixo desvio padrão (0,074002) encontrado para a referida data, conforme mostrado na Tabela 3, indicando menor variabilidade espacial. Entretanto, pode-se notar que as áreas antes saudáveis de janeiro, passaram (em setembro) por algum tipo de deficiência hídrica, possivelmente resultantes do padrão típico da estação seca.

Analogamente ao ano de 2022, a Figura 15 apresenta os resultados do NDVI para o ano de 2024, onde podem ser observados praticamente os mesmos padrões visuais concernentes a uma época chuvosa e uma época seca, respectivamente, relacionadas aos meses de janeiro e setembro. Nota-se que, as áreas mais saudáveis, aparentemente, encontram-se na porção oeste de Paracatu.

Figura 15. NDVI 2024



Fonte: Autores (2025).

O NDVI 18JAN24 apresentou o valor máximo de 0,861175 e mínimo de -0,269916, condizente com o padrão visual de grande diferença de vibração entre os tons de verdes presentes, bem como, disparidades relevantes que variam do amarelo ao vermelho, denotando diferentes padrões vegetativos. Esses aspectos presentes na Figura 15, podem ser ratificados a partir dos dados presentes na Tabela 3, cujos contrastes são provenientes, sobretudo, da compa-

ração entre o valor médio (0,319808) e o mínimo (-0,269916), passível de destacar a presença de áreas não vegetadas ou de vegetações sem atividade fotossintética, que são responsáveis pela fragmentação da paisagem, seja por influência natural ou antrópica. Por outro lado, o valor máximo demonstra um padrão vegetativo típico dos meses chuvosos, com alta densidade de vegetação, podendo trazer indícios de áreas agrícolas bem estabelecidas e de áreas florestais vigorosas. Essa diversidade para o índice pode ser confirmada pelo valor encontrado para o desvio padrão de janeiro que foi de 0,121096, mostrando uma grande variabilidade e dispersão dos valores encontrados para a camada raster em relação à média.

Conforme pode ser visto na Figura 15, tanto os valores de máximo e mínimo tiveram redução para o NDVI. O padrão visual mudou de forma considerável, em comparação com o mês de janeiro do mesmo ano, com uma predominância de áreas com tons mais claros, como amarelo, laranja e até regiões próximas do vermelho, o que indicia menor presença de cobertura vegetal. Corroborando com o padrão sazonal de uma época de estiagem, o desvio padrão encontrado para o índice (0,063071, conforme Tabela 3) reflete uma baixa variabilidade na saúde da vegetação para a área de estudo, podendo reforçar que a variação espacial esteja associada a uma perda mais uniforme do vigor vegetativo nas áreas de Paracatu.

Nesse contexto, os resultados encontrados para 2024, similares aos de 2022 e 2023 no que tange a análise do aspecto visual do NDVI sugere a forte influência das condições climáticas, sobretudo, da precipitação. Os resultados aqui encontrados vão de acordo com os de Júnior *et al.* (2007), que em suas análises temporais de NDVI a partir de imagens de LANDSAT ETM+ para o Cerrado, observaram valores mais altos do índice durante a estação chuvosa, devido à maior disponibilidade hídrica para a vegetação, viabilizando maior atividade fotossintética. Por outro lado, eles também notaram que, durante a estação seca houve diminuição dos valores de NDVI.

Além do fator climático, a presença de queimadas também impacta na resposta espectral do NDVI. No período considerado, o ano de 2024 (até 30SET24) contou com 193 focos de incêndio, sobretudo no mês de setembro de 2024, que podem sugerir menores valores para o índice. Conforme CARDOZO *et al.* (2011), a presença de tonalidades mais avermelhadas indica a diminuição do vigor vegetativo, podendo ser explicado por áreas decorrentes de episódios de queimadas.

Como fator impulsionador, a meteorologia também impulsiona o aumento significativo de focos de fogo, conforme Marinho *et al.* (2021), sobretudo entre o inverno e a primavera na região Sudeste do Brasil. Nessa época, o aumento dos registros é explicado devido à diminuição das chuvas e à ocorrência de massa de ar aliada às condições meteorológicas que favorecem períodos de seca prolongadas.

Adiante, os focos de incêndio serão mais bem abordados, bem como, sua relação com o NDVI, tomando como norteador o estimador de Kernel.

Estimador de Kernel, focos de incêndio e NDVI

A análise visual do NDVI permitiu identificar variações nos padrões de saúde da vegetação na área de estudo e, nesse sentido, os resultados angariados com a utilização do estimador de Kernel, propiciaram uma análise espacial mais direcionada a partir da densidade de focos de incêndio e potencializaram as análises visuais do NDVI no contexto do trabalho.

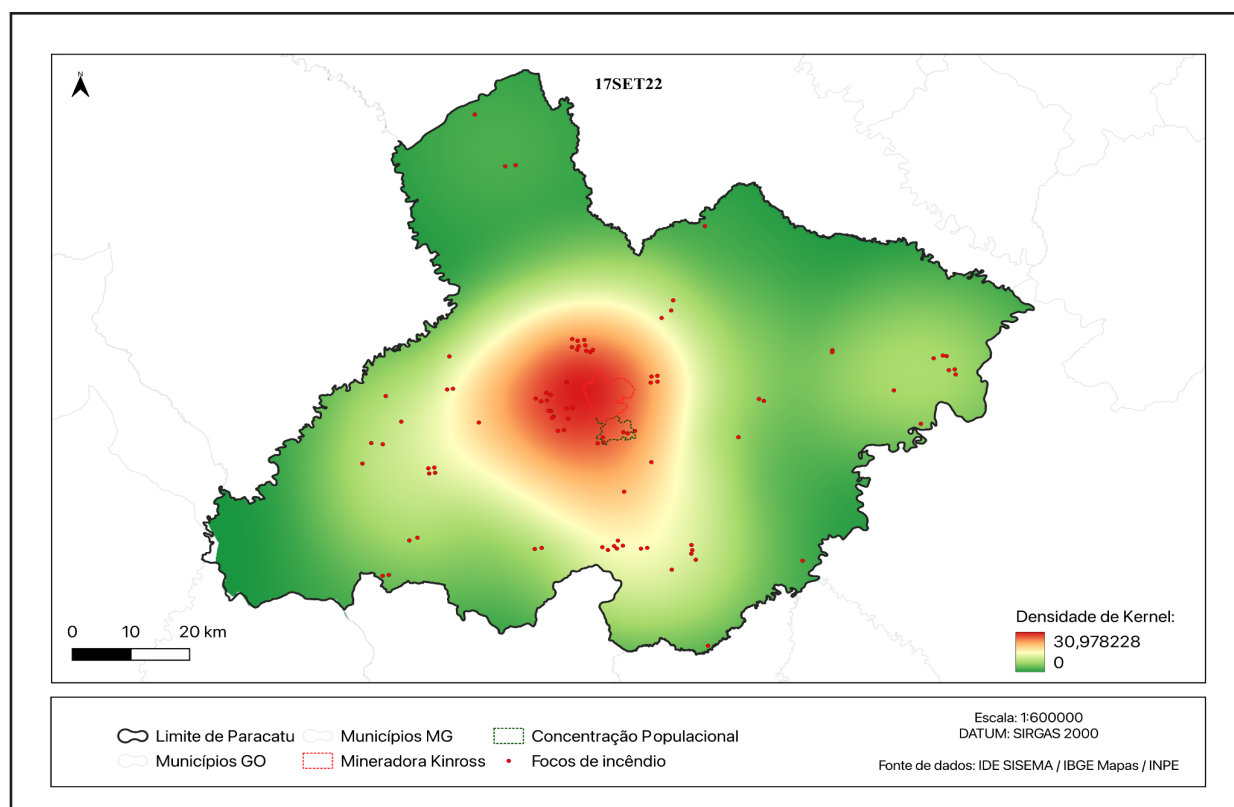
Os resultados foram similares a outras bibliografias que utilizaram a mesma metodologia para averiguar a concentração de focos de calor e focos de incêndio, dentre elas,

a de Amaral (2022), que utilizou o geoestatístico para observar a intensidade na região de Uberaba, obtendo um produto visual de concentração geográfica de focos de calor.

Aqui, o estimador de kernel foi aplicado considerando um raio de 30 km para que um resultado mais amplificado dos focos fosse encontrado, num padrão mais sistêmico e menos local. Para tanto, serão apresentados os resultados obtidos e, ao final do item, as discussões serão feitas frente a outros trabalhos científicos encontrados.

As Figuras 16, 18 e 20 apresentam os resultados para a densidade do estimador de Kernel para os anos de 2022, 2023 e 2024, respectivamente, considerando os focos de incêndio até as respectivas datas concernentes ao cálculo do NDVI: 17SET22, 20SET23 e 30SET24.

Figura 16. Estimador de Kernel para os focos de incêndio até 17SET22

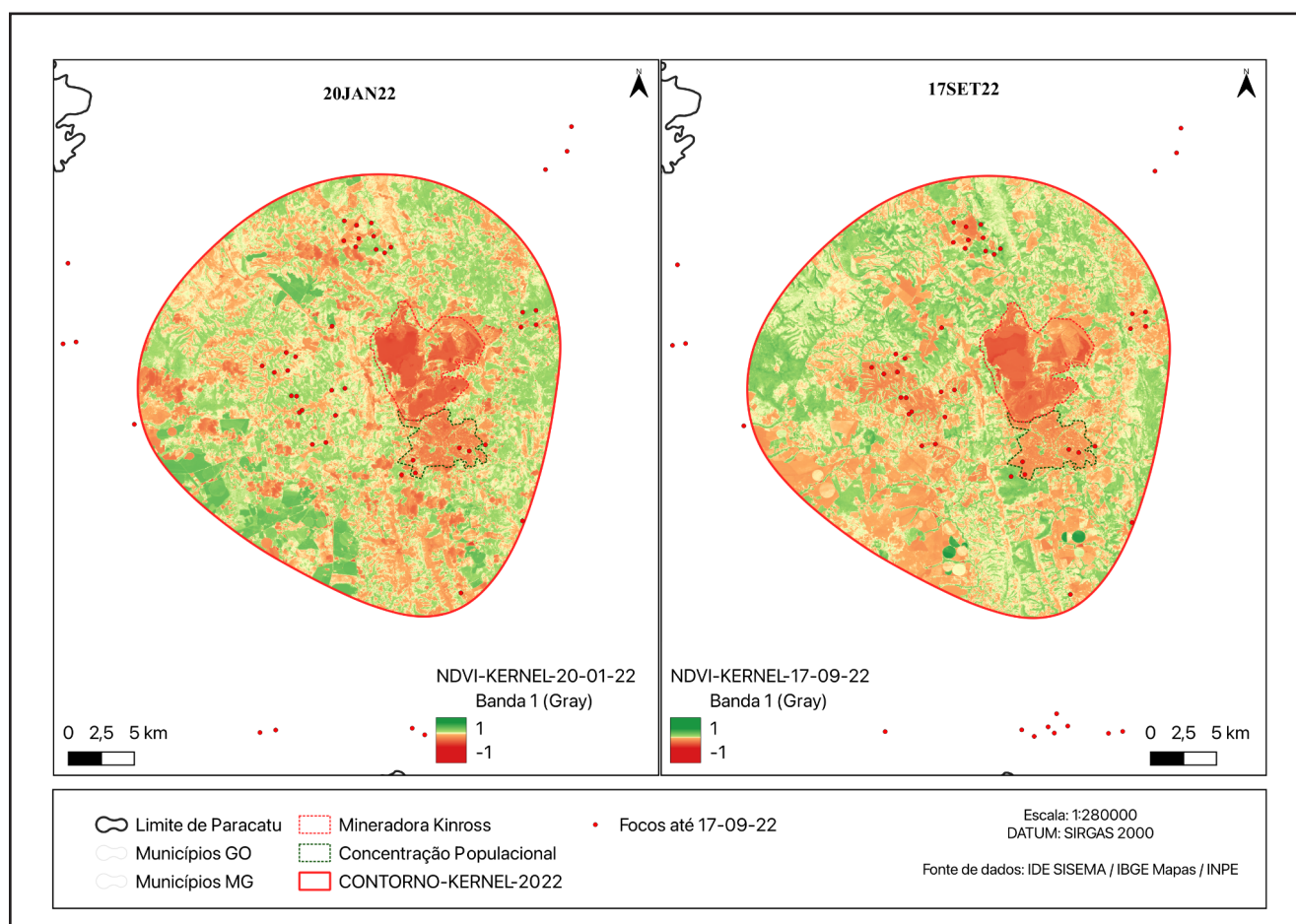


Fonte: Autores (2025).

A partir da Figura 16, é evidente que a densidade dos focos de incêndio (até a data de 17 de setembro de 2022), está mais localizada na região centro-sul do território de Paracatu, alcançando a máxima densidade de Kernel de 30,978228 sobretudo nas proximidades da mineradora Kinross, cujas classificações de muito alta e alta densidades (cores em vermelho e laranja) podem ser observadas. Ressalta-se que, até a presente data, foram registrados 91 focos de incêndio na região de estudo.

Quantitativamente, foi encontrado um valor relativamente baixo para a média do estimador (4,7126), indicando que a densidade foi baixa na maior parte da área de estudo, com poucas áreas críticas mais concentradas próximas à atividade minerária. Além disso, o desvio padrão de 6,3864 sugere que o número de focos possui uma distribuição moderadamente dispersa, ratificando um caráter mais isolado e pontual para a densidade dos focos. Em outras palavras, isso indica que não há uniformidade quanto à distribuição das densidades de Kernel no território paracatuense. A Figura 17 apresenta os resultados do NDVI para a área de maior densidade do estimador.

Figura 17. Área de maior densidade de Kernel e NDVI (2022)



Fonte: Autores (2025).

Conforme pode ser visualizado na Figura 17, a comparação entre 20JAN22 e 17SET22 mostra o contraste visual do padrão vegetativo, através da alteração do índice de vegetação, na área de maior densidade de Kernel, sobretudo nas áreas correspondentes a focos de incêndio, representados no mapa por pontos em vermelho.

Nota-se que, em janeiro, essas áreas apresentaram majoritariamente NDVI com valores mais elevados (tons de verde), aparentando uma biomassa mais vigorosa, enquanto que setembro evidenciaram-se amplos domínios de tons avermelhados e alaranjados, indicando uma queda substancial do índice e, por consequência, sinalizando a degradação da área através da perda expressiva da cobertura vegetal, possivelmente associada a presença dos focos de incêndio e ao período seco.

A estatística do contorno de Kernel, área em destaque da Figura 17, apresenta a alteração quantitativa do NDVI, segundo a Tabela 4.

Tabela 4. Dados quantitativos do NDVI para a área de maior densidade de Kernel (2022).

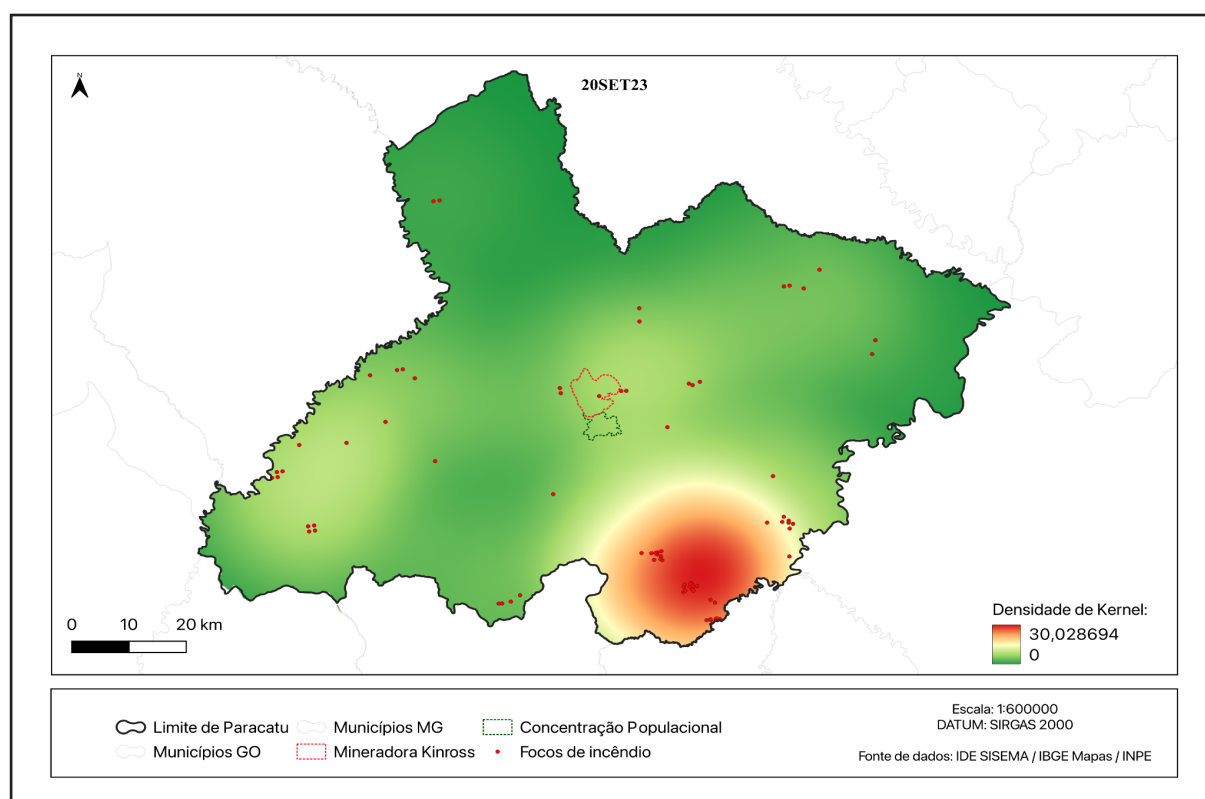
NDVI	Máximo	Média	Mínimo	Amplitude	Desvio Padrão
20JAN22	0.814998	0.324205	-0.244201	1.059199	0.111996
17SET22	0.519776	0.187761	-0.133575	0.653352	0.069529

Fonte: Autores (2025).

Mediante os resultados acima, constata-se que houve queda na saúde da vegetação, uma vez que, o valor máximo do NDVI saiu de 0.814998 para 0.519776, ou seja, uma biomassa que antes era muito sadia, apresentou relativo estresse hídrico em setembro, tendo impacto em seu vigor. Além disso, a amplitude (diferença entre os valores máximo e mínimo), para ambos os meses, revela que, a paisagem da área em questão deixou de ser heterogênea e tornou-se mais homogênea, reflexo esse proveniente do padrão de estiagem, característicos da época de seca, bem como, da presença de focos de incêndio.

Já para o ano de 2023, há uma alteração vertiginosa no padrão visual e geográfico para o pico de densidade máxima do estimador (muito alta), estando deslocado para o sudeste do município, próximo à divisa com outros municípios mineiros vizinhos, com maior concentração em áreas antes menos críticas, conforme pode ser visto na Figura 18.

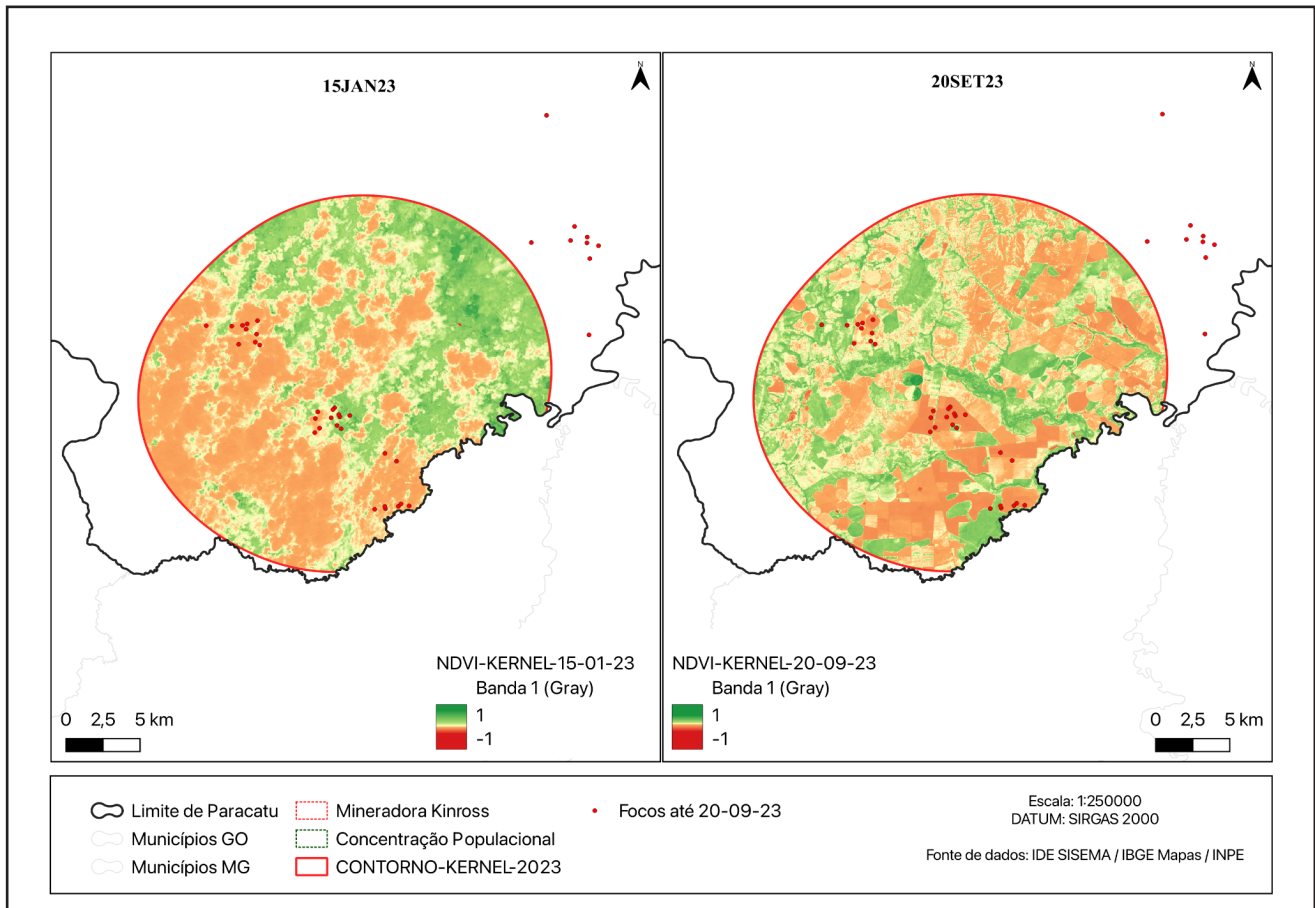
Figura 18. Estimador de Kernel para os focos de incêndio até 20SET23



Fonte: Autores (2025).

Com a redução do número de focos, saindo de 91 (em 2022) para 80, houve uma ligeira queda na densidade máxima do estimador (30,023319), conforme a Figura 13. Além disso, o desvio padrão (5,3660) indica uma densidade ainda mais concentrada, quando comparada ao ano de 2022, o que pode trazer indícios de que houve mudanças nos fatores que desencadearam os registros. A Figura 19 apresenta os resultados do NDVI para a área de maior densidade do estimador.

Figura 19. Área de maior densidade de Kernel e NDVI (2023)



Fonte: Autores (2025).

Devido a presença da cobertura de nuvens (29,4%) na imagem de satélite que corresponde a data de 15JAN22, a comparação visual do NDVI entre janeiro e setembro, pode ser melhor visualizada a nordeste na área de contorno do Kernel, visto que, os focos de incêndio catalogados estão (em maior parte) contidos exatamente na cobertura de nuvens.

Ainda assim, é possível notar uma transição marcante no padrão visual do índice a partir da região centro-norte e nordeste da imagem comparativa, com grande parte dominada por tons esverdeados, assinalando uma cobertura vegetal saudável. Todavia, em setembro, essas mesmas regiões são identificadas por tons de amarelo a laranja, indicando alteração do padrão espectral da vegetação com perda sintomática de sua biomassa, possivelmente devido a contribuição dos focos de incêndio adjacentes à área.

A estatística do contorno de Kernel, área em destaque da Figura 19, apresenta a alteração quantitativa do NDVI, segundo a Tabela 5.

Tabela 5. Dados quantitativos do NDVI para a área de maior densidade de Kernel (2023).

NDVI	Máximo	Média	Mínimo	Amplitude	Desvio Padrão
15JAN23	0.757713	0.124790	-0.272267	1.029980	0.129702
20SET23	0.529213	0.189086	-0.178194	0.707407	0.080857

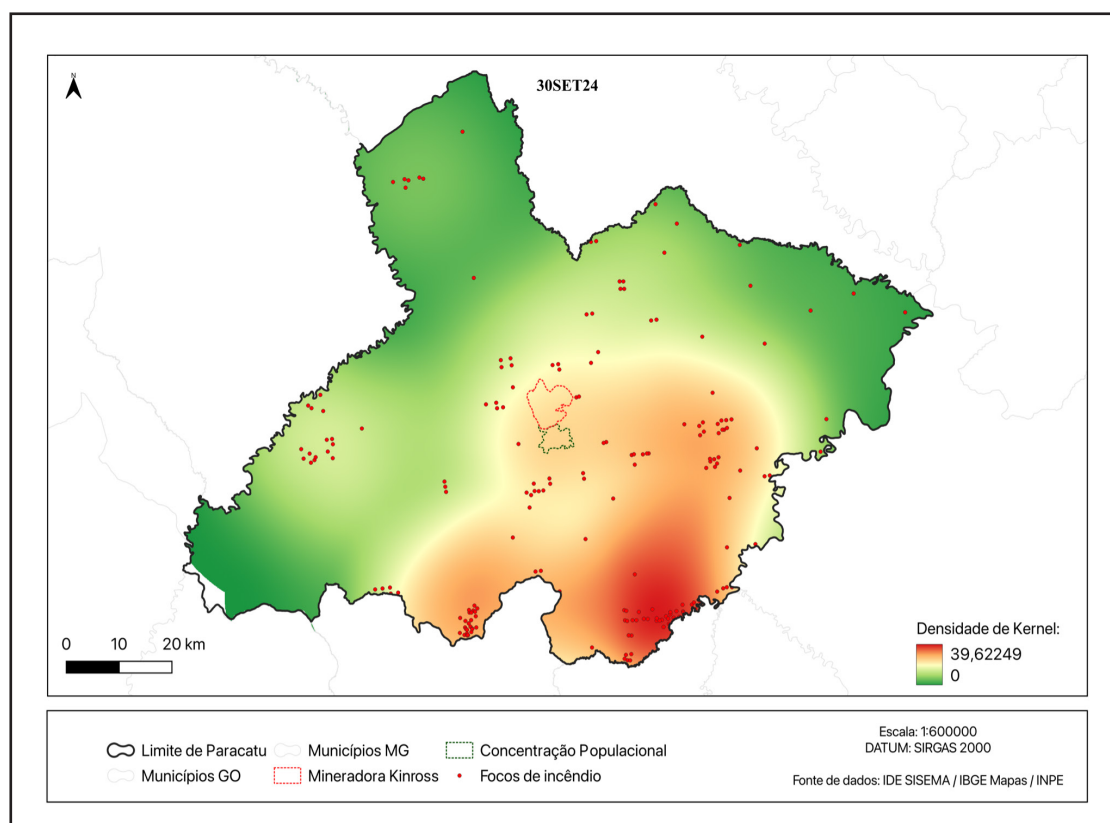
Fonte: Autores (2025).

Seguindo a mesma tendência de 2022, os resultados acima constataram que houve queda na saúde da vegetação, uma vez que, o valor máximo do NDVI saiu de 0.757713 para

0.529213, ou seja, uma biomassa que antes era muito sadia sofreu impactos em seu vigor. De igual maneira, a amplitude sinaliza que a paisagem deixou de ser heterogênea e tornou-se mais homogênea, sendo também indicado pela diminuição do desvio padrão, conforme a Tabela 5. Ou seja, houve uma menor variação no padrão espectral da vegetação para o mês de setembro.

2024 apresentou um salto no número de registro de focos de incêndio com 193 casos, tomando como referência o período analisado no presente estudo e esse número reflete ativamente na densidade de Kernel, mediante a Figura 20.

Figura 20. Estimador de Kernel para os focos de incêndio até 30SET24



Fonte: Autores (2025).

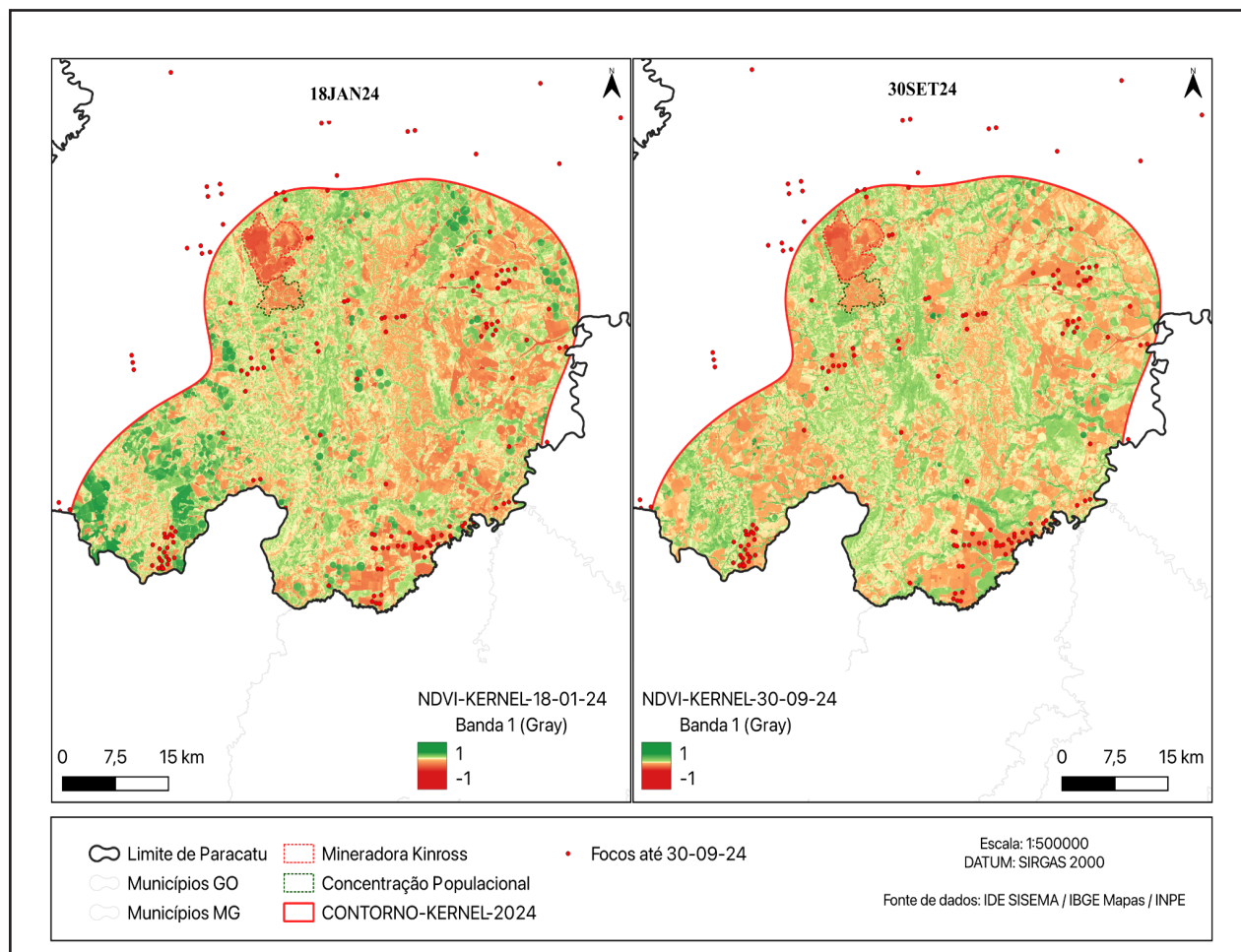
Visualmente, os focos de incêndio catalogados encontram-se espalhados e, praticamente, perfazem toda porção de Paracatu. Os maiores valores para o estimador de densidade se distribuem de forma mais abrangente, com mais porções do município apresentando classificações de muito alta e alta para Kernel, cores vermelho e laranja, respectivamente. Ainda segundo a Figura 20, nota-se também menor predomínio da coloração verde mais escura, denotada como densidade muito baixa, corroborando com a grande quantidade de focos de incêndio registrada.

Essa variabilidade do estimador, denotada pela Figura 20, concorre com as análises de Santos *et al.* (2020), a partir de um comparativo da proporção de focos de queimadas no Noroeste de Minas Gerais em relação ao Cerrado Brasileiro entre os anos de 2015 e 2019. Conforme os autores, há uma grande associação da agropecuária com a prática das queimadas, tanto como via de limpeza local quanto na agricultura familiar, especialmente em Paracatu, onde há lavouras de eucalipto e cana de açúcar em grandes extensões de terra. Ademais, a diversidade espacial dos focos também está aliada a existência de muitas comunidades rurais situadas a mais de 80 km da sede municipal paracatuense.

Analogamente ao ano de 2023, o sudeste do município também apresentou uma

densidade muito alta e, de forma complementar, a região centro-sul obteve uma classificação de densidade alta. Nota-se que a densidade máxima de focos foi de 39,62249, valor superior aos anos anteriores. Além disso, a média do estimador observada foi de 8,9605 para 30SET24, aproximadamente duas vezes superior àquelas encontradas para 2023 e 2022, reflexo direto do aumento do número de focos. Seguindo essa mesma tendência, o desvio padrão foi alto, seu valor de 9,9190 demonstrou uma grande variação entre as áreas de baixa e alta densidade. Esse resultado vai de encontro a percepção visual mostrada pela Figura 15, visto a grande dispersão dos focos e com várias regiões mais críticas distribuídas ao longo dos limites paracatuenses. A Figura 21 apresenta os resultados do NDVI para a área de maior densidade do estimador.

Figura 21. Área de maior densidade de Kernel e NDVI (2024)



Fonte: Autores (2025).

Dentro do período considerado, 2024 apresentou um salto no número de registros de focos de incêndio. Conforme citado anteriormente, até 30SET24, foram identificados 193 casos, o que refletiu diretamente numa área de maior contorno para a densidade de Kernel. A partir da Figura 21, a sudoeste da mineradora e da concentração populacional, percebe-se um forte contraste de alteração visual do NDVI, comparando-se janeiro e setembro. Com a mudança drástica das tonalidades de verde para amarelo e o laranja, pode-se perceber a queda na saúde da vegetação. Inclusive, nessa mesma localidade, tem-se a presença de focos de incêndio.

Porém, ressalta-se que, de uma forma geral, as geolocalidades que reportaram focos de incêndios tiveram degradação significativa no padrão espectral do índice vegetativo conforme pode ser observado visualmente nas Figura 21, ou seja, sobretudo nessas co-

ordenadas, não se verifica a presença de biomassa em plena saúde vegetativa, trazendo fortes indícios de que a presença de focos de incêndio altera a cobertura vegetal.

A Tabela 6 apresenta a estatística descritiva do contorno de Kernel para as datas comparativas no ano de 2024, observando-se a tendência similar de queda do NDVI, conforme já reportado nos anos anteriores.

Tabela 6. Dados quantitativos do NDVI para a área de maior densidade de Kernel (2024).

NDVI	Máximo	Média	Mínimo	Amplitude	Desvio Padrão
18JAN24	0.603426	0.328068	-0.250693	0.854119	0.107699
30SET24	0.569295	0.183976	-0.194419	0.763715	0.069046

Fonte: Autores (2025).

Mediante a Tabela 6, tomando-se como referência comparativa a média e o desvio padrão de ambas as datas, nota-se que a média superior para 18JAN24 (0.328068) sugere que as áreas de vegetação são predominantes frente às regiões de solo exposto ou com cobertura vegetal degradada. Por outro lado, a queda do valor da média do NDVI para 0.183976 em 30SET24, é consequente da degradação da vegetação na área de estudo durante o período seco e, principalmente, devido ao impacto dos focos de incêndio.

Já a disparidade do desvio padrão denota a alteração da heterogeneidade da saúde da biomassa da região. Nesse sentido, comparando-se os valores de 0.107699 e 0.069046, para 18JAN24 e 30SET24, respectivamente, nota-se uma variabilidade um pouco maior nos valores do NDVI para janeiro, visto o período chuvoso e sem estresse hídrico, permitindo a manutenção de alta densidade da vegetação. Em outras palavras, tem-se a coexistência de áreas com vegetação bem estabelecida e saudável com áreas menos densas e descobertas. Essa diferença reflete no desvio padrão do índice vegetativo.

Por outro lado, setembro apresentou o desvio padrão mais baixo, caracterizando maior homogeneidade no padrão espectral do NDVI. No entanto, essa homogeneidade não é consequência de condições vegetativas favoráveis, mas sim da uniformidade em valores baixos do NDVI e características do período seco.

Em suma, houve variação espacial da concentração do estimador de Kernel, obtendo-se numericamente, uma concentração similar para os anos de 2022 e 2023 e muito superior para o ano de 2024, reflexo claro do aumento dos focos de incêndio, visto que, tomou-se como referência a concentração desses eventos para o cálculo do geoestatístico.

Santos *et al.* (2017), Freitas *et al.* (2020), Ziccardi *et al.* (2017) e Marinho *et al.* (2021), utilizaram o estimador de Kernel para mapear densidades de focos de incêndio e analisar padrões espaciais de queimadas em áreas do Cerrado brasileiro, bioma também presente na cidade de Paracatu e, Mata Atlântica.

Freitas *et al.* (2020) investigaram a relação entre a ocorrência de focos de fogo e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) no estado do Rio de Janeiro, entre 2000 e 2015. Com imagens dos satélites AQUA/TERRA MODIS aliadas aos dados de focos de incêndio do INPE em ambiente “ArcGis”. Os autores utilizaram o estimador de Kernel considerando um raio de 20 km para avaliar padrões no espaço-tempo e também encontraram variabilidade na espacialização da densidade de focos na região de Mata da Atlântica carioca para anos diferentes.

No que tange ao EVI, o trabalho encontrou resultados similares aos com o uso de NDVI em Paracatu aqui presentes. Os meses mais secos registraram diminuições nos valo-

res do índice de vegetação, enquanto que, no período chuvoso houve aumento expressivo nos valores médios de EVI. Os autores ressaltam que, o Índice de Vegetação Aprimorado sofreu variabilidade entre as estações, com destaque para a redução drástica na primavera, época que compreende o mês de estudo do NDVI.

Já Santos *et al.* (2017), a partir do uso das imagens dos satélites NOAA e AQUA/TERRA MODIS, avaliaram o comportamento espacial e temporal dos focos de calor detectados no Parque Nacional da Chapada Diamantina (PNCD). A partir da utilização do *software* “ArcGis”, os resultados do estimador mostraram qualitativamente de forma satisfatória o padrão espacial de ocorrência provável de incêndios. Ademais, outros resultados encontrados pelos autores também vieram de encontro aos do presente trabalho: a seca tem um grande impacto para ocorrência de incêndios, cujas maiores incidências de focos de calor foram catalogadas justamente entre os meses de setembro e dezembro.

Devido a grande extensão territorial de Paracatu e aos altos índices de focos de incêndio catalogados pelo INPE em diversos anos, torna-se necessária a aplicação de ferramentas de geoprocessamento tanto para monitoramento quanto para prevenção de ocorrências que envolvem fogo. Esse argumento pode ser ainda mais reforçado quando se analisa, nas Figuras 16, 18 e 20, a presença de uma faixa perceptível de ocorrência contínua e comum de registros de focos de incêndio, que vai do oeste ao leste da região central do território para todo o período analisado.

Na gestão ambiental, Marinho *et al.* (2021), utilizaram o estimador de Kernel considerando um raio de 20 km, para identificar um padrão entre a distribuição dos focos de incêndio nas mesorregiões de Minas Gerais, entre 1998 e 2015. A partir dos dados do banco de dados de focos do INPE, os resultados do mapeamento da densidade de focos destacaram as mesorregiões do estado Norte e Noroeste como as campeãs entre os anos de 2001 e 2002, ocupando o primeiro e segundo lugar, respectivamente.

Ziccardi *et al.* (2017) identificaram áreas críticas para ocorrência de fogo usando o estimador de Kernel através de cinco classificações (semelhante à esse trabalho), onde a suscetibilidade de risco de fogo partiu da mais alta até a mais baixa considerando as variações de cores: vermelha, laranja, amarela, verde claro e verde escuro. Os autores afirmaram que esses mapas de risco podem contribuir grandemente para um melhor planejamento de ações de combate aos incêndios bem como de prevenção e redução de custos nesse âmbito.

Por fim, a integração do índice NDVI com estimador de densidade de Kernel se torna uma poderosa ferramenta de análise para entender a extensão dos danos ambientais provenientes dos focos de incêndio, a perda de saúde da vegetação e até mesmo trazer evidências de impactos secundários, como alterações nos níveis de qualidade do ar devido à emissão de partículas em suspensão, reforçando a necessidade de estratégias de monitoramento e mitigação focadas nos territórios mais críticos, como é o caso de Paracatu, devido aos altos índices de focos de incêndio constantemente catalogados pelo INPE.

Focos de incêndio e material particulado

O uso do fogo em campos naturais e florestas é criticado por ambientalistas, pela comunidade científica e pela sociedade como um todo. Todavia, é uma prática comum em regiões tropicais e subtropicais, especialmente naquelas caracterizadas por estação seca pronunciada (SILVA *et al.*, 2013). Ademais, conforme Rios (2024), essa prática pode trazer impactos na saúde de todo ecossistema constante no entorno, intensificando sintomas no trato respiratório, sobretudo em populações mais vulneráveis. Nesse sentido, os parâ-

metros de material particulado e monóxido de carbono se tornam poderosas ferramentas indicativas de queimadas e incêndios florestais.

O período analisado para a área de estudo, compreende tanto parte do período de seca, característica do mês de setembro, quanto a parte do período chuvoso, representado pelo mês de janeiro. Em contrapartida, é importante ressaltar que, a análise concernente ao presente trabalho contempla apenas o ano de 2024, visto que, os dados de precipitação foram conseguidos apenas para esse último ano. Em outras palavras, houve ausência de dados disponíveis pelo INMET para o mês de janeiro anos de 2022 e 2023.

A Figura 22 mostra a espacialização dos focos de incêndio no município de Paracatu para as datas de 17SET22, 20SET23 e 30SET24 (respectivamente), bem como, a localização das estações de monitoramento da qualidade do ar e o resultado do estimador de Kernel para o período de estudo.

Ainda que haja muita variabilidade na localização dos focos de incêndio por todo território paracatuense, a Figura 22 mostra a presença deles nas proximidades das estações de monitoramento da qualidade do ar, sobretudo para 17SET22. Data a qual, inclusive, o estimador de Kernel apresentou uma concentração bem evidente, indicando uma elevada intensidade de focos próximos às estações.

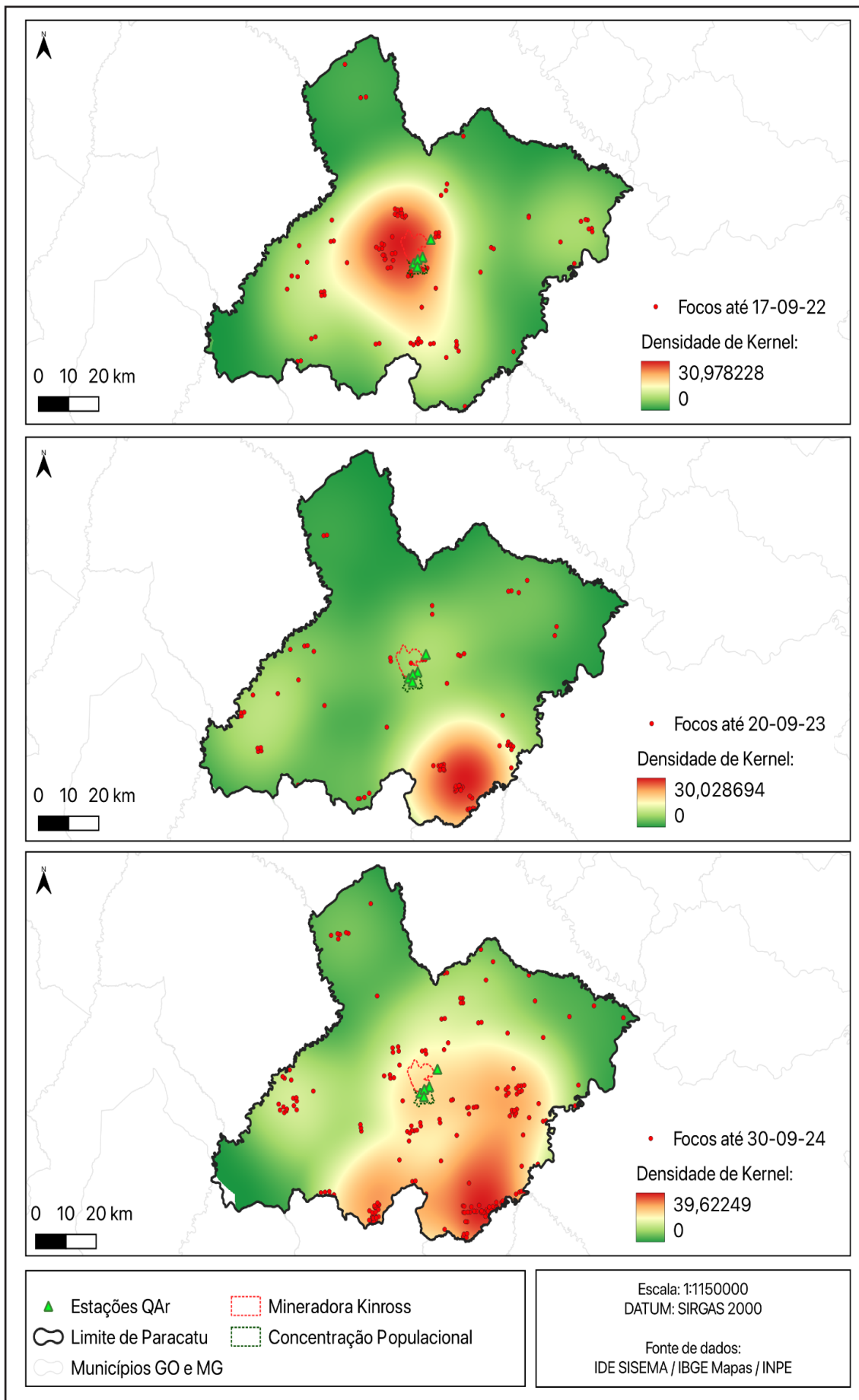
Por outro lado, no ano de 2022, há uma redução perceptível na densidade de Kernel na região central da área de estudo, reflexo de uma intensidade do evento nessa região. Independentemente da dispersão dos focos para a data de 20SET23, a Figura 22 ainda evidencia registros dispersos e em pequena quantidade ao redor das estações de QAr.

Com o aumento do número de focos de incêndio dos anos anteriores para 2024, a data de 30SET24 traz um cenário bem contrastante, com um aumento significativo na área de maior densidade de Kernel, resultado de maior incidência de registros de focos. Ressalta-se que, a espacialização dos focos também se estende para áreas próximas às estações QAr.

Os resultados podem sugerir um possível impacto adicional na qualidade do ar na região de Paracatu, sendo sentido pela população e pelo ecossistema presente no território. Pois, além da atividade minerária, o monitoramento da qualidade ambiental do ar, pode sofrer influência devido a presença de focos de incêndio.

Conforme Santos *et al.* (2019), os focos de incêndio são mais frequentes entre os meses de julho a outubro, compreendendo a estação seca e o início da estação chuvosa, especialmente no mês de setembro, onde são encontrados os maiores índices. Os autores também afirmaram que, entre os anos de 2003 e 2017, a maior concentração de eventos ocorreu a noroeste do estado, com a cidade de Paracatu tendo a maior frequência de ocorrências.

Figura 22. Estações de monitoramento QAr, estimador de Kernel e focos de incêndio.

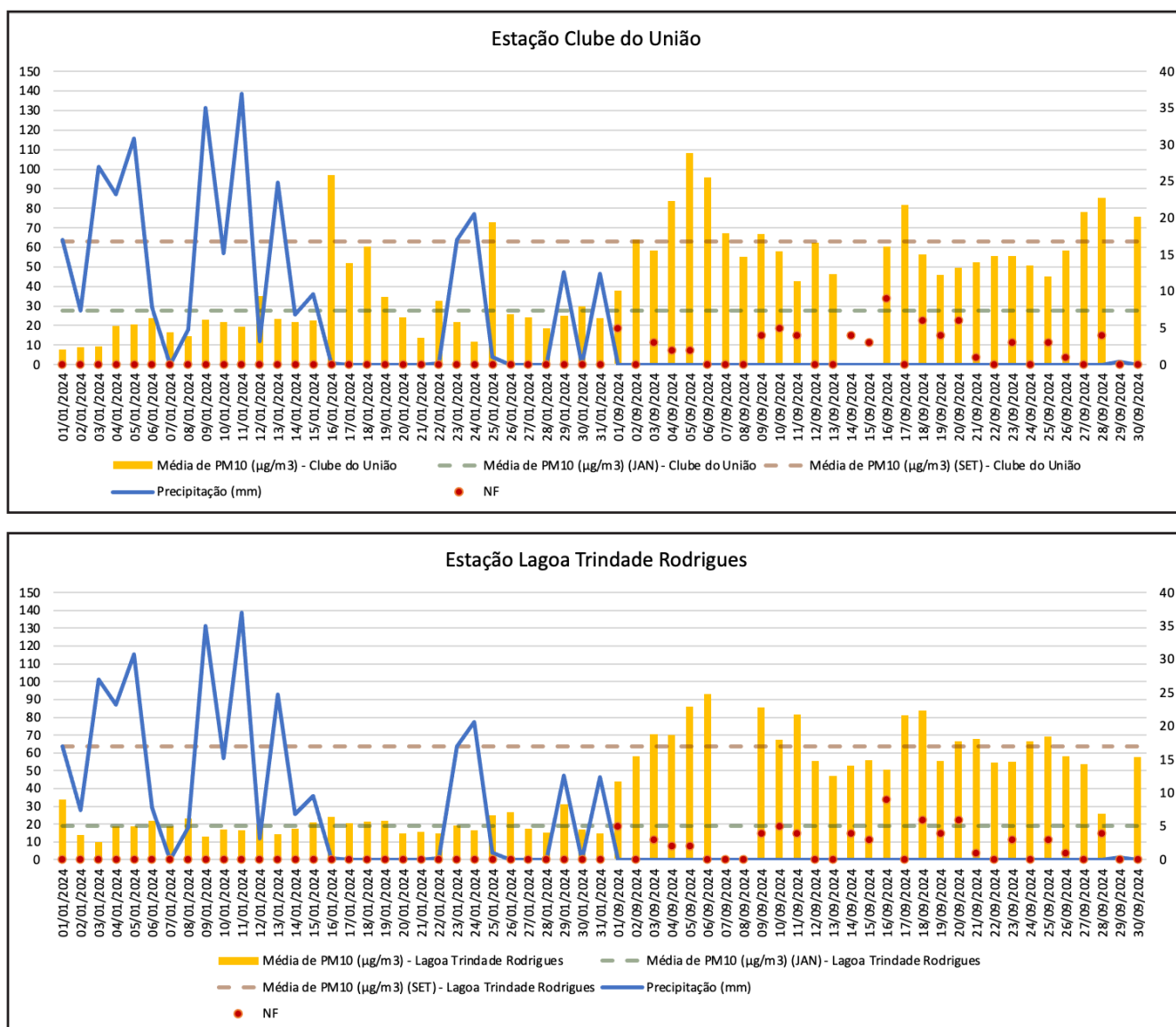


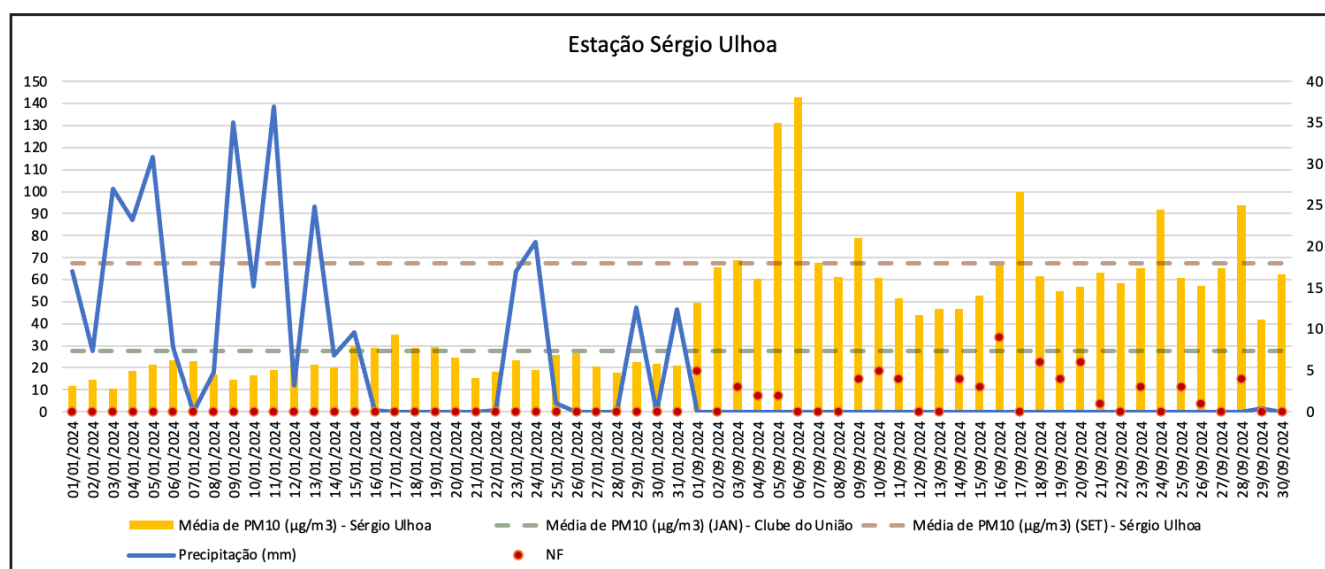
Fonte: Autores (2025).

Diante do cenário, serão apresentados a seguir as médias diárias de concentração de material particulado inalável (PM_{10}), precipitação (mm) e número de focos de incêndio para os meses de janeiro e setembro de 2024. Devido a ausência de dados de monitoramento nas estações Copasa (setembro) e São Domingos (janeiro) - devido a manutenção nas estações - os resultados e análises versam apenas para Clube do União (Figura 23a), Lagoa Trindade Rodrigues (Figura 23b) e Sérgio Ulhoa (Figura 23c).

Para melhor entendimento e leitura, as figuras trazem em seu eixo vertical principal (à esquerda) os resultados para as médias diárias de janeiro e setembro do PM_{10} , bem como, as médias mensais de janeiro e setembro. Já no eixo vertical secundário (à direita), tem-se a leitura da precipitação e dos números de focos de incêndio. Horizontalmente, no eixo x, há as datas respectivas aos dados.

Figura 23. NF, PM_{10} e precipitação para as estações Clube do União (a), Lagoa Trindade Rodrigues (b) e Sérgio Ulhoa (c).





Fonte: Autores (2025).

Numa análise geral, a Figura 23 torna clara o comportamento destoante das médias diárias de PM_{10} entre janeiro e setembro. Para todas as estações, no mês de janeiro, como era esperado, devido ao maior índice de precipitação, os níveis de PM_{10} são mais baixos frente ao mês setembro, substancialmente na primeira quinzena de janeiro, que registrou os valores mais baixos para as médias diárias de material particulado em todas as estações. Em setembro, as médias são consistentemente mais elevadas, reflexo da escassa precipitação e, possivelmente, dos registros de focos de incêndios.

Rios (2024) avaliou séries temporais das médias diárias do material particulado respirável ($PM_{2.5}$) na região da Chapada Diamantina, que compreende os biomas Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga, aliados aos dados de focos de incêndio do INPE. De acordo com os resultados angariados pelo estudo, durante o período de 2004 a 2019, em épocas com elevados números de focos, os valores do material particulado cresceram, sobretudo entre agosto e dezembro.

Pimenta *et al.* (2022) utilizaram dados de focos de incêndio dos anos de 2019 e 2020, fornecidos pelo INPE, para quantificar as taxas de emissões atmosféricas decorrentes dos incêndios florestais na cidade de Belo Horizonte, considerando PTS, $PM_{2.5}$ e CO. Os resultados mostraram uma tendência de aumento das concentrações médias amostradas nos períodos de registros de focos de incêndio.

A presença de chuvas desempenha um papel fundamental na qualidade do ar ao se comparar os padrões dos meses de janeiro e setembro. Nota-se que a presença da precipitação é fundamental para a manutenção de melhores condições atmosféricas. Silva *et al.* (2020) identificaram que, no período de julho a setembro de 2016, a cidade de Uberlândia – MG apresentou os menores índices de precipitação e níveis reduzidos de umidade relativa do ar. Conforme os pesquisadores, as condições climáticas do período seco dificultaram a dispersão de poluentes, e possibilitaram altos níveis de concentração de PM_{10} registrados naquele período.

A importância da precipitação pode ser reforçada ao se comparar dias com e sem precipitação apenas no mês de janeiro. Pois, a partir dos dados de monitoramento, sobretudo nos dias secos, nota-se a presença de valores que ultrapassaram a média mensal em todas as três estações, além disso, se observa picos de concentração muito superiores de PM_{10} em Clube do União (Figura 23a). Ou seja, essas observações já podem sugerir uma tendência para valores ligeiramente mais altos na região.

Outro fator que reforça essa hipótese é a ausência de focos de incêndio em janeiro, que poderiam contribuir para valores mais elevados. Nesse sentido, os resultados trazem indícios de um possível reflexo da própria atividade minerária que ocorre na área de estudo, reforçando a necessidade de acompanhamento da qualidade do ar na cidade de Paracatu. Mediante Santi *et al.* (2000), em áreas de mineração há uma enorme quantidade tanto de poeira quanto de partículas suspensas no ar.

Analisando a Figura 23, a estação de Sérgio Ulhoa (Figura 23c), embora siga as tendências globais dos valores, apresentou concentrações maiores no material particulado quando comparada com as estações Lagoa Trindade Rodrigues (Figuras 23b) e Clube do União (Figura 23a), as médias mensais de setembro foram (aproximadamente) $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Conforme Matos *et al.* (2024), as concentrações de MP na atmosfera devem variar espacial e temporalmente em função da espacialização e intensidade da mineração.

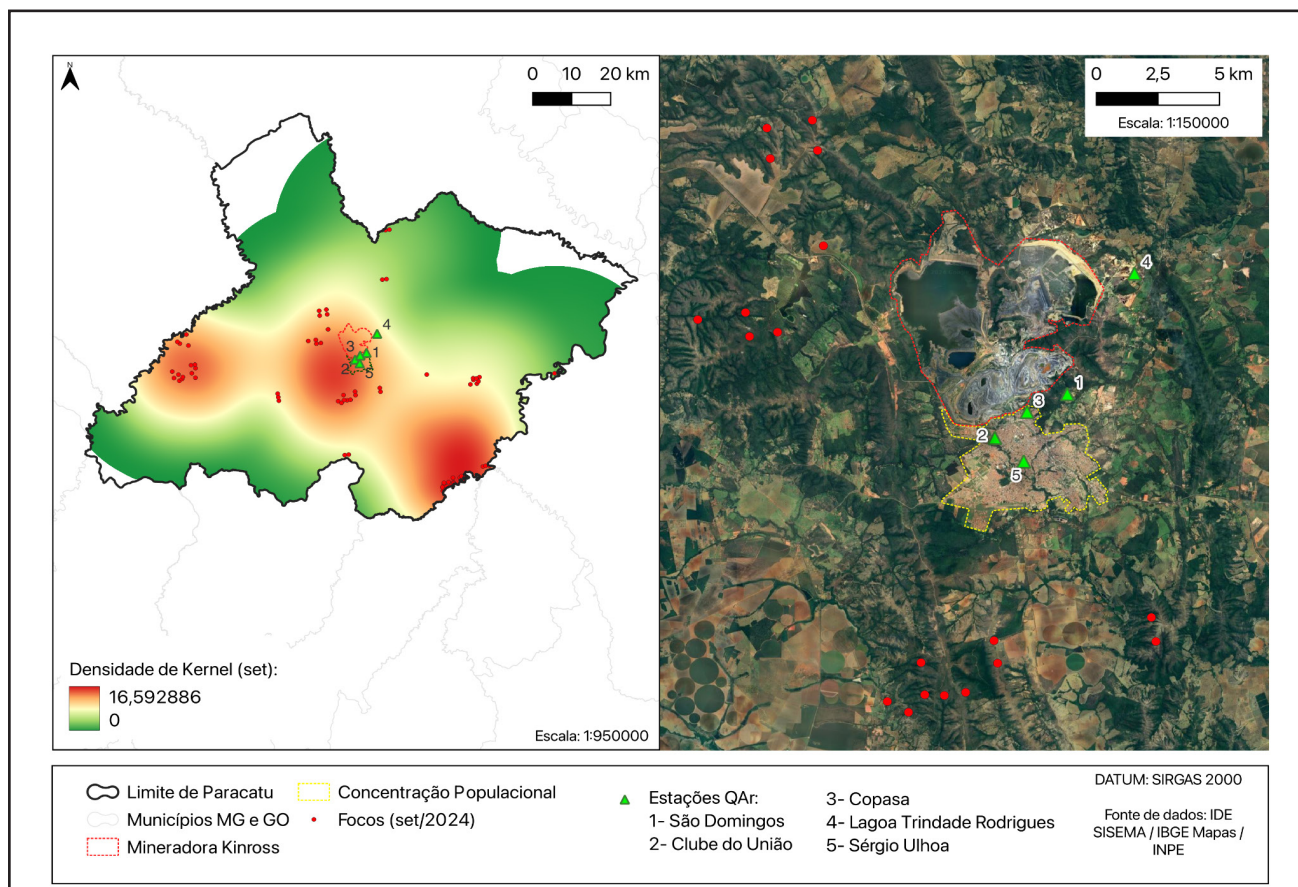
Os resultados aqui angariados corroboram com os de Santos (2020), que em seus estudos sobre a dinâmica do comportamento do PM_{10} e da temperatura da superfície no perímetro urbano de Paracatu para os anos de 2015 a 2017, observou maiores concentrações de PM_{10} na estação Sérgio Ulhoa. Conforme o autor, esses níveis mais elevados podem estar atribuídos pela localização da estação, cuja está no centro urbano do município estando suscetível ao tráfego veicular.

Além da espacialização das estações de monitoramento, outro fator preponderante para os resultados obtidos é a direção e a velocidade dos ventos. Conforme Matos (2014), o vento mantém uma relação direta com a suspensão, ressuspensão, dispersão e sua velocidade do material particulado na atmosfera. Em seus estudos no período de 2004 até 2021, a preferencial dos ventos foi de Norte a Nordeste (99% de frequência) e os meses de maior velocidade foram de agosto até outubro, período mais provável para uma maior exposição do material particulado na atmosfera.

A Figura 24 mostra a geolocalização das estações de QAr de Paracatu, bem como, o resultado para o estimador de Kernel para os focos de setembro (2024).

Até 30SET24, Paracatu registrou 193 focos de incêndio desde o início do referido ano, sendo, justamente, o mês de setembro que apresentou o maior número: 69 focos (aproximadamente 36% do total até a presente data), conforme dados do INPE (2024). Qualitativamente, a partir da Figura 24, pode-se observar que, há uma densidade de Kernel classificada como muito alta compreendendo as estações de monitoramento, a população e a mineradora. Isso sugere uma concentração de focos de incêndio catalogados nessa região, que pode ter impactado no aumento do material particulado, conforme já apontado por resultados anteriores.

Figura 24. Estimador de Kernel, focos de incêndio e estações de QAr.



Fonte: Autores (2025).

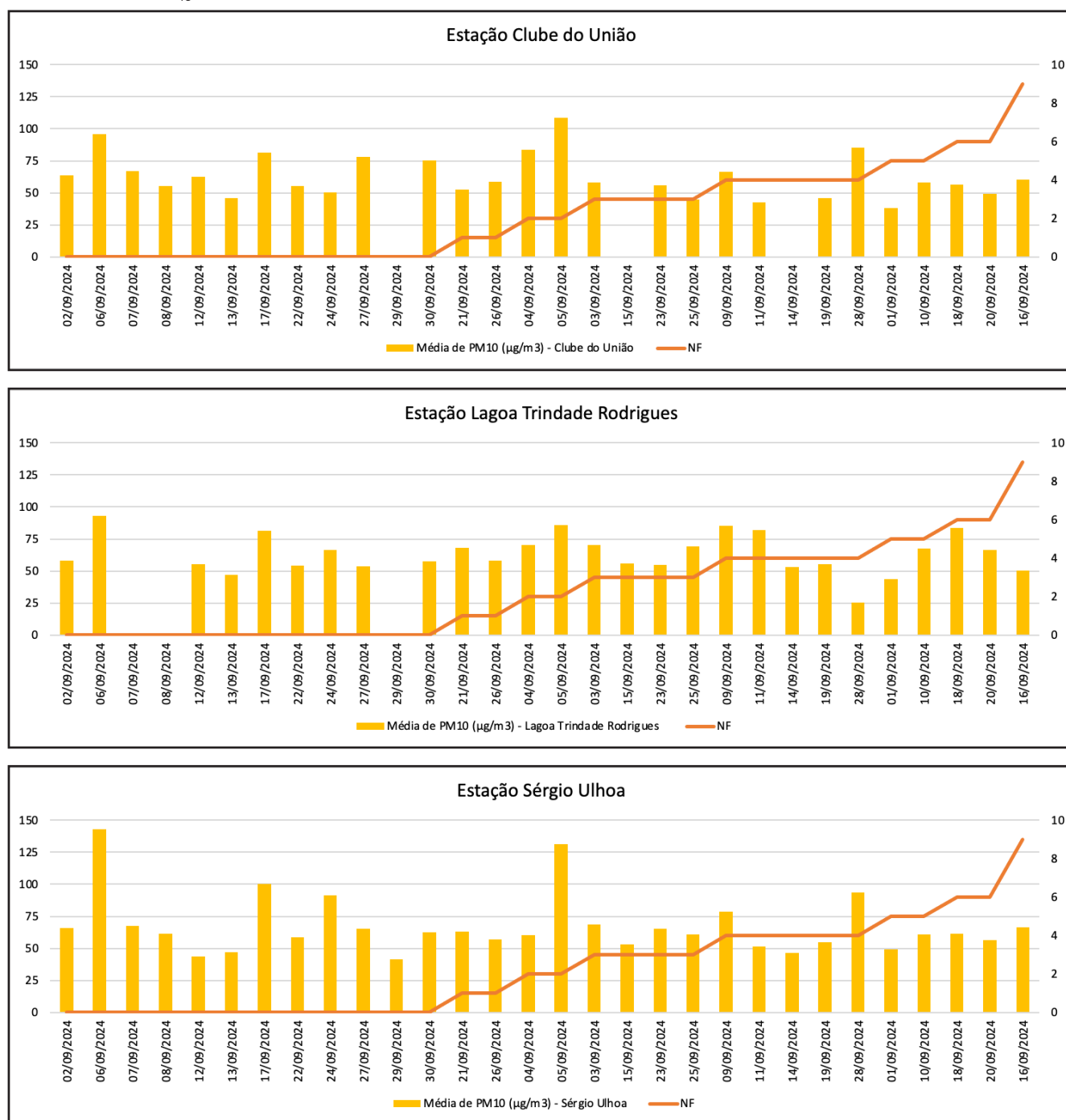
Contudo, quantitativamente, as análises dos dados apenas do mês de setembro mostram outro panorama importante. A Figura 25 mostra as médias diárias de PM_{10} e focos de incêndio para o mês de setembro nas estações Clube do União (Figura 25a), Lagoa Trindade Rodrigues (Figura 25b) e Sérgio Ulhoa (Figura 25c).

Ressalta-se que, constam, em seu eixo vertical principal (à esquerda) os resultados para a média diária, no eixo vertical secundário (à direita) tem-se os números de focos de incêndio e, no eixo horizontal, há as datas respectivas aos dados. Todavia, os resultados foram ordenados por aumento dos registros de focos, perceptível na tendência da linha.

Paracatu apresentou 12 dias sem registros e 18 dias com registros de focos de incêndio. Ou seja, a maior parte do mês de setembro foi tomada pela presença do evento, sobretudo no dia 16/09/24 (9 focos).

Conforme a Figura 25, ainda que haja aumento do número de focos de incêndio (indicado no gráfico de linha), a observação sugere que as concentrações médias de material particulado não apresentam diferenças significativas entre os dias que registraram focos de incêndio e os dias sem registros. Esse comportamento foi observado nas três estações de monitoramento da qualidade do ar.

Figura 25. NF e PM₁₀ para as estações Clube do União (a), Lagoa Trindade Rodrigues (b) e Sérgio Ulhoa (c).



Fonte: Autores (2025).

Isso pode trazer indícios de que, os focos de incêndio não contribuem diretamente para elevações notáveis na concentração de partículas na atmosfera na área de estudo, possivelmente, devido a outros fatores contribuintes: localização dos focos de incêndio em relação à direção e velocidade dos ventos, bem como, as atividades provenientes da mineração. É importante ressaltar que, os resultados não descartam a possibilidade de influência dos focos de incêndio, pois, as emissões geradas por eles podem estar sendo mascaradas por esses outros fatores que impactam substancialmente e em maior escala na qualidade do ar.

Silva *et al.* (2021) afirmam que desde a instalação da mineradora até as etapas de extração e processamento dos minerais, uma sucessão de atividades e condições ocasionaram em diversos impactos ambientais, que influenciaram na qualidade do solo, da água e

do ar, além de afetarem a qualidade de vida da população do entorno e dos trabalhadores envolvidos nas operações.

Dentre esses impactos, Silva *et al.* (2012) afirmam que, a mina “Morro do Ouro” conta com a detonação de explosivos diariamente, liberando para atmosfera grandes quantidades de diversos materiais particulados. Nesse contexto, Silva *et al.* (2024) citaram a presença de arsênio dentre os poluentes provenientes dessas explosões.

Devido às limitações temporais do estudo, daqui em diante os esforços a serem discutidos se concentram na investigação do impacto da mineração na qualidade do ar da região, principal suspeita mediante os resultados apresentados anteriormente. Visto que, a rede de monitoramento ambiental foi instalada na área de estudo devido à essa atividade econômica de potencial poluidor.

Conforme Matos (2014), Paracatu possui a maior mina de ouro a céu aberto do país, com um processo de exploração que favorece a emissão de material particulado para a atmosfera. Em seus estudos, a autora analisou as médias de concentração de PTS e PM_{10} na área de estudo e verificou dois fatores importantes: as maiores médias foram verificadas no período seco e em dias de precipitação, as concentrações foram substancialmente diminuídas. É importante ressaltar que, entre 2011 e 2012, o mês de maior concentração de PM_{10} foi justamente setembro, esses resultados angariados pela autora dialogam com os obtidos pelo presente estudo.

Para o período de 2015 a 2107, Santos (2020) encontrou 648 dias de ultrapassagens do padrão médio diário de PM_{10} recomendado pela OMS para a época ($50 \mu g/m^3$), ou seja, aproximadamente 60% do tempo, a cidade esteve longe do padrão preconizado considerado seguro pelo órgão mundial. Indo de encontro com as análises da Figura 23, dos 648 dias, 249 foram ultrapassagens registradas na Estação Sérgio Ulhoa.

Ademais, Matos (2014) e Santos (2020) corroboram que a direção e velocidade dos ventos no período seco, aliadas às explosões diárias da exploração de ouro à céu aberto da mineradora, podem ocasionar o arraste das partículas em direção às estações de monitoramento e favorecer ao aumento da concentração, visto que, a Kinross está situada à direção norte das estações Sérgio Ulhoa e Clube do União.

Nesse mesmo contexto, o estudo de Santos *et al.* (2021) avaliou a relação entre as concentrações de PM_{10} e a atividade de mineração a céu aberto no município de Paracatu. Dentre os principais resultados, as maiores concentrações de particulados inaláveis foram encontrados principalmente nos meses de agosto, setembro e outubro. Ademais, os autores atribuem os valores das concentrações à proximidade com a atividade da mineradora, localização com a zona urbana, presença de veículos automotores e ao tráfego de caminhões pesados, que pode promover a ressuspensão de partículas do solo.

Santi *et al.* (2000), em seus estudos na área minerária da antiga Companhia Vale do Rio Doce, em Itabira, avaliaram a concentração de PTS e PM_{10} para os anos de 1997 e 1999. Os resultados corroboraram com outros estudos, visto que, notaram que as concentrações de particulados são mais altas no período seco e apresentaram valores elevados nas proximidades da mineração. Conforme esses estudos, ainda que, em Itabira a exploração seja de minério de ferro, o principal poluente emitido também é o material particulado proveniente de explosivos, escavações, movimentação de maquinário, tráfego de veículos pesados e ação dos ventos nas pilhas de estéril.

Nesse cenário, possivelmente, as mesmas questões levantadas e decorrentes da mineração em Itabira são sentidas e vivenciadas pela cidade de Paracatu. Por fim, outro ponto muito importante e que reforça o grande potencial de degradação ambiental pela pre-

sença da mineração, é a alteração da paisagem. Os estudos de Silva *et al.* (2021), avaliaram os impactos ambientais através do NDVI em Paracatu, trazendo como resultados que a expansão da mineradora canadense, entre os anos de 2009 e 2019, levaram à supressão de uma parcela considerável da vegetação local refletindo na densidade vegetativa. Ademais, os autores perceberam que, em algumas áreas tanto no entorno das barragens de rejeito, quanto entre elas e a mina de extração, apresentaram solo exposto para todas as imagens geradas.



4

PERSPECTIVAS FUTURAS



O desenvolvimento da obra *Fogo, Vegetação e Ar: Uma Avaliação dos Efeitos dos Incêndios em Paracatu – MG no Período de 2022 a 2024* abriu um campo fértil para a continuidade e ampliação das discussões sobre os impactos ambientais das queimadas, especialmente quando se considera a interdependência entre vegetação, qualidade do ar e atividades antrópicas. Ao abordar a análise da cobertura vegetal por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e relacioná-lo com os focos de incêndio e a concentração de material particulado, o trabalho revelou não apenas a importância dessas ferramentas para o monitoramento ambiental, mas também levantou novas hipóteses e direcionamentos para futuras investigações.

Durante a realização da pesquisa, emergiram questionamentos pertinentes acerca da influência de outras variáveis ambientais e econômicas no contexto regional, com destaque para a atividade mineradora intensiva em Paracatu. Embora o foco central da obra tenha sido os efeitos dos incêndios, constatou-se que a mineração também pode estar promovendo impactos significativos na cobertura vegetal e na qualidade do ar, o que justifica uma abordagem integrada e mais aprofundada sobre essa temática em trabalhos futuros.

Nesse sentido, uma das principais perspectivas de continuidade do estudo consiste na utilização de séries temporais de NDVI aplicadas especificamente às áreas no entorno das operações mineradoras. Tal abordagem poderá revelar padrões mais precisos de degradação da vegetação ao longo do tempo e permitir uma comparação direta entre os efeitos provocados pelas queimadas e aqueles decorrentes da extração mineral. A análise longitudinal do comportamento da vegetação em áreas mineradas pode, inclusive, fornecer subsídios para avaliações ambientais e propostas de recuperação ecológica.

Outro caminho promissor para pesquisas futuras diz respeito ao aprofundamento da análise das variáveis meteorológicas — como temperatura, umidade, velocidade do vento e regime pluviométrico — bem como da dinâmica de uso e ocupação do solo na região. Esses fatores, quando correlacionados com dados de qualidade do ar e focos de calor, possibilitam diagnósticos mais assertivos sobre os elementos que contribuem para a degradação ambiental. Além disso, podem indicar de que forma a regeneração natural da vegetação ocorre em áreas afetadas, ou se há necessidade de intervenções para a recuperação dos ecossistemas.

Também se destaca a relevância da integração entre o NDVI e o estimador de densidade de Kernel como ferramenta para mensurar, de forma mais detalhada, a extensão e intensidade dos danos ambientais. Essa combinação de técnicas pode aprimorar a capacidade de detecção de áreas críticas e subsidiar políticas públicas mais eficazes no combate e prevenção às queimadas.

Por fim, é fundamental ressaltar a importância de estudos mais específicos sobre os efeitos da qualidade do ar na saúde da população local. A análise do material particulado, especialmente o PM10, e a possível presença de elementos tóxicos como o arsênio — associado à atividade mineradora — representam um campo de investigação urgente. Compreender os impactos cumulativos dessas substâncias na saúde pública dos paracatuenses poderá nortear estratégias de mitigação e alertar sobre riscos sanitários ainda pouco explorados.

Dessa forma, o presente trabalho não se encerra em si, mas aponta caminhos e inspira novas investigações interdisciplinares que poderão contribuir significativamente para o entendimento e o enfrentamento dos desafios ambientais e sociais da região de Paracatu.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS



O presente estudo, intitulado *Fogo, Vegetação e Ar: Uma Avaliação dos Efeitos dos Incêndios em Paracatu – MG no Período de 2022 a 2024*, evidenciou a complexa relação entre os focos de incêndio, a vegetação e a qualidade do ar na região. A utilização do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), dos dados de material particulado inalável (PM10) e da estimativa de densidade por Kernel permitiu uma abordagem integrada e eficaz para compreender os impactos ambientais associados às queimadas no município.

A metodologia adotada se mostrou satisfatória, ao permitir análises quali-quantitativas em distintos períodos climáticos dos anos de 2022, 2023 e 2024. Os resultados confirmaram o papel determinante da precipitação na dinâmica vegetativa, com maior vigor observado nos períodos chuvosos, em contraste com a degradação acentuada registrada durante a estação seca.

O estimador de Kernel demonstrou elevado potencial para mapear padrões espaciais dos focos de incêndio, especialmente em 2024, ano em que se registrou a maior densidade e abrangência territorial desses eventos. Sua associação com o NDVI contribuiu para identificar áreas críticas de perda de vegetação, reforçando seu valor como ferramenta de suporte à gestão ambiental e ao planejamento territorial.

Entretanto, a análise da qualidade do ar revelou um fator inesperado: a significativa influência da atividade mineradora da empresa Kinross sobre as concentrações de material particulado PM10, em detrimento dos efeitos diretamente associados aos incêndios. Essa constatação revela a complexidade da interação entre as diferentes fontes de poluição atmosférica e destaca a necessidade de investigações mais aprofundadas sobre os impactos das atividades antrópicas no ambiente urbano.

Além disso, observou-se que a concentração de PM10 é amplamente condicionada pelas variáveis meteorológicas, especialmente no período seco, sendo influenciada também pela localização das estações de monitoramento em relação à fonte poluidora e pela distribuição das chuvas.

Diante disso, reforça-se a urgência da ampliação e manutenção de uma rede de monitoramento da qualidade do ar em Paracatu, que permita maior precisão na identificação das fontes de poluição e no desenvolvimento de políticas públicas ambientais mais eficazes. Ademais, destaca-se a importância de abordagens sistêmicas e interdisciplinares, que considerem múltiplas variáveis ambientais de forma integrada, como estratégia fundamental para compreender e mitigar os efeitos dos incêndios florestais e demais pressões sobre os ecossistemas locais.

Referências

- AERO ENGENHARIA. (2023). O que é: Banda Termal no sensoriamento remoto. Disponível em: <<https://aero-engenharia.com/glossario/o-que-e-banda-termal-no-sensoriamento-remoto/>>. Acesso em: 15/07/24.
- ALVES *et al.* (2017). Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, artigo 10937.
- AMARAL, G. D. (2022). **Concentração de focos de calor na Amazônia Legal: análise espacial para as temporadas de 2003 a 2017**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- ARBEX *et al.* (2004). Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, n. 2, p. 158-175.
- ASSAF *et al.* (2019). Air Pollution and Health – A Science-Policy Initiative. **Annals of Global Health**, v. 85, n. 1, artigo 140, p. 1-9.
- ASTOLPHI *et al.* (2021). A produção do ouro em Paracatu/MG – Brasil: riscos para a saúde e bem-estar da população. **Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde - Hygeia**, v. 17, p. 55-70.
- BARBOSA *et al.* (2014). Kernel smoothing dos dados de chuva no Nordeste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 742-747.
- BATISTA, A. C. (2004). Detecção de incêndios florestais por satélites. **Revista Floresta**, v. 34, n. 2, p. 237-241.
- BATISTA *et al.* (1997). The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 15, p. 3195-3210.
- BRASIL. (2024). **Lei n. 14850, de 02 de maio de 2024**. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar e dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão da qualidade do ar no território nacional. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 03/05/24.
- _____. (2024). Ministério do Meio Ambiente – MMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n. 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 09/07/24.
- CARDOZO *et al.* (2011). **Avaliação de áreas queimadas a partir dos índices espectrais NDVI e NDBR**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7950. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.27.21.58/doc/p1429.pdf>>. Acesso em: 17/01/25.
- CARMO *et al.* (2013). Estudos de séries temporais de poluição atmosférica por queimadas e saúde humana. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 18, n. 11, p. 3245-3258.
- COVELE, P. A. (2011). Aplicação de índices das condições da vegetação em tempo quase real da seca em Moçambique usando NOAA_AVHRR-NDVI. **Espaço e Tempo**, n. 29, p; 85-95.
- DRUCK *et al.* (2004). Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília, EMBRAPA. Capítulo 2, p. 15. ISBN: 85-7383-260-6.
- FAUSTO *et al.* (2013). Comparação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em uma área de cerrado, MT. **IX Congresso Brasileiro de Agroinformática**, 21 a 25 de outubro, Cuiabá – MT.
- FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. (2023). **Monitoramento da Qualidade do Ar de Minas Gerais - Ano base: 2015**. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/2023/RELATORIOS_QUALIDADE_AR/monitoramento_da_qualidade_do_ar_2015.pdf>. Acesso em: 06/06/24.
- _____. (2024). Boletim da Qualidade do Ar. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/1327-boletim-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 06/06/24.
- FERNANDES *et al.* (2011). Avaliação Geoecológica de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 3, p. 299-309.
- FREITAS, W. K. *et al.* (2020). Influence of fire foci on forest cover in the Atlantic Forest in Rio de Janeiro, Brazil. **Ecological Indicators**, v. 115, 106340.
- GEOGRAFIA DAS COISAS (2024). **Tudo o que você precisa saber sobre o NDVI**: Perguntas & Respostas para a Agricultura 4.0 – parte 1. Disponível em: <<https://geografiadascoisas.com.br/artigos/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-ndvi-parte-1/>>. Acesso em: 01/11/24.
- GONÇALVES *et al.* (2012). As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. **Ciência & Saúde**

Coletiva, v. 15, n. 1, p. 1523-1532.

GROVE, R. H. (1995). *Green imperialism: Colonial expansion, tropical island Edens and the origins of environmentalism 1600-1860*. Cambridge: Cambridge University Press.

HOKI, V. S. P. (2020). **Estudo dos focos de calor em diferentes faixas de áreas de influência da rodovia BR-242/MT, no município de Nova Ubiratã/MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Cuiabá. 58 p.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais. (2024). Incêndios Florestais. Disponível em: <[https:// www. gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/incendios-florestais#incendioqueima](https://www.gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/incendios-florestais#incendioqueima)>. Acesso em: 07/05/24.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <[https:// www. ibge.gov.br/centro2010/apps/sinopse/index.php?uf=31](https://www.ibge.gov.br/centro2010/apps/sinopse/index.php?uf=31)>. Acesso em: 07/06/24.

_____. (2021). **Produto Interno Bruto dos Municípios**. Disponível em: <[https:// www. ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-%20interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=resultados](https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-%20interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=resultados)>. Acesso em: 07/06/24.

_____. (2022). **Panorama Cidades - IBGE Dados**. Disponível em: <[https:// cidades . ibge.gov.br/brasil/mg/paracatu/panorama](https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/paracatu/panorama)>. Acesso em: 07/06/24.

_____. (2024). **Atlas Geográfico Escolar - Sensoriamento Remoto**. Disponível em: <[https:// atlascolar .ibge.gov.br/cartografia/21735-sensoriamento-remoto.html](https://atlascolar.ibge.gov.br/cartografia/21735-sensoriamento-remoto.html)>. Acesso em: 29/10/24.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2024). **Focos por Estado no período de 01/01/23 até 31/12/23**. Disponível em: <[https:// terrabilis. dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/#graficos](https://terrabilis.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/#graficos)>. Acesso em: 07/05/24.

_____. (2024). **Monitoramento dos Focos Ativos por Bioma** - Programa Queimadas. Disponível em: <[https:// terrabilis. dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/](https://terrabilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/)>. Acesso em: 27/05/24.

_____. (2024). **Perguntas Frequentes** - Programa Queimadas. Disponível em: <[https:// terrabilis .dpi.inpe.br/queimadas/portal/faq/index.html](https://terrabilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/faq/index.html)>. Acesso em: 15/07/24.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. (2017). Pesquisa sobre efeitos da fumaça das queimadas. Disponível em: <[https:// portal. if.usp.br/imprensa/pt-br/node/1813](https://portal.if.usp.br/imprensa/pt-br/node/1813)>. Acesso em: 05/06/24.

JÚNIOR *et al.* (2007). Identificação das assinaturas temporais ndvi das principais fisionomias da região do ecomuseu do cerrado. **Espaço & Geografia**, v. 10, n. 1, p. 173-189.

KINROSS. (2024). **Conheça a Kinross**. Disponível em: <[http:// kinross. com.br/a-kinross/conheca/](http://kinross.com.br/a-kinross/conheca/)>. Acesso em: 07/06/24.

LIU *et al.* (1991). Normalized difference vegetation index for the South American continent used as a climatic variability indicator. **International Symposium on Remote Sensing of Environment**, 24, Rio de Janeiro.

LIZUNDIA-LOIOLA *et al.* (2020). Temporal Anomalies in Burned Area Trends: Satellite Estimations of the Amazonian 2019 Fire Crisis. **Remote Sensing**, v. 12, n. 151, p. 1-8.

MACHADO, S. L. D. (2017). **Análise da Dinâmica de Fitofisionomias do Cerrado usando séries temporais de NDVI e temperatura de superfície**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 76 p.

MAPBIOMAS. **Área queimada no Brasil entre janeiro e setembro foi 150% maior que no ano passado**.

MARINHO, A. A. R. *et al.* (2021). Temporal record and spatial distribution of fire foci in State of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 280, 111707.

MARTINS *et al.* (2018). Seasonal and interannual assessment of cloud cover and atmospheric constituents across the Amazon (2000–2015): Insights for remote sensing and climate analysis. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 309–327, 2018.

MATOS *et al.* Variabilidade espacial e temporal das concentrações de As no material particulado atmosférico em Paracatu (MG). Disponível em: <[https:// www. cetem.gov. br/antigo/images/programas/paracatu/Variabilidade-espacial-e-temporal-das-concentracoes-de-As-no-material-particulado-atmosferico-e.pdf](https://www.cetem.gov.br/antigo/images/programas/paracatu/Variabilidade-espacial-e-temporal-das-concentracoes-de-As-no-material-particulado-atmosferico-e.pdf)> Acesso em: 14/01/25.

MEDEIROS *et al.* (2004). Incêndios florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: desafios para a conservação da biodiversidade. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p.157-168.

MENESES, P. R. *et al.* (2012). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento**. Brasília: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ). 266p.



- MENESES-TOVAR, C. L. NDVI as indicator of degradation. **Unasylla**, v. 62, n. 238, p.39-46.
- MONTEIRO, T. U. (2015). **Diagnóstico do uso da água na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Isabel, no município de Paracatu, MG**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade do Noroeste de Minas (FINOM). 54 p.
- MICHA *et al.* (2011). Enxergando no Escuro: a física do invisível. **Física na Escola**, v. 12, n. 2, p.19-23.
- NUNES *et al.* (2023). Fires in brazilian biomes. **Mercator**, v. 22, p. 1-13.
- OLIVEIRA, E. N. (2020). **Geografia e Sensoriamento Remoto: volume único**. Rio de Janeiro: Fundação Ce-cierj, 366 p.
- OMS - Organização Mundial de Saúde. (2022). **Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre**. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre>>. Acesso em: 04/06/24.
- _____. (2022). **Diretrizes Globais da Qualidade do Ar**. 2022. Disponível em: <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613_por.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 05/06/24.
- _____. (2023). **Monitoring air pollution levels is key to adopting and implementing WHO's Global Air Quality Guidelines**. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>>. Acesso em: 07/05/24.
- _____. (2024). **Air pollution**. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1>. Acesso em: 07/05/24.
- PÁDUA, J. A. (2009). **Natureza e sociedade no Brasil monárquico**. In: GRINBERG, Keila; SALLES, Ricardo (org.). O Brasil imperial. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, v. 3, p. 313-365.
- _____. (2002). **Um sopro de destruição: pensamento político e crítica ambiental no Brasil escravista, 1786-1888**. Rio de Janeiro: Zahar.
- PARACATU - Prefeitura Municipal de Paracatu. **História**, 2024. Disponível em: <<https://www.paracatu.mg.gov.br/>>. Acesso em: 07/06/24.
- PIMENTA, M. F. C. *et al.* (2022). **Estudo da dispersão de poluentes atmosféricos originários dos incêndios florestais ocorridos entre 2018 e 2019, em Belo Horizonte – MG**. 106 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://www.eng-ambiental.bh.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/187/2022/04/Manuella_Faustina_de_Castro_Pimenta-1>. Acesso em: 19/01/25.
- PONZONI, F. J. (2010). **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese. 128 p.
- RIBEIRO *et al.* (2002). Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos Avançados**, v. 16, n. 44, p.125-148.
- RIOS, I. H. R. (2024). Séries temporais de material particulado e focos de incêndio na Chapada Diamantina utilizando dados do SISAM. **Revista GeoNordeste**, v. 33, n. 2, p. 192-207.
- SALGADO *et al.* (2019). Análise da interferência de nuvens na classificação de séries temporais MODIS-NDVI na região da Amazônia, município de Capixaba, Acre. **Sociedade & Natureza**, v. 31. DOI: 10.14393/SN-v31-2019-47062.
- SANNIER *et al.* (1998). Real-time vegetation monitoring with NOAA-AVHRR in southern Africa for wildlife management and food security assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 621-639.
- SANT'ANNA *et al.* (2021). **O Estado da Qualidade do Ar no Brasil**. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>>. Acesso em: 07/05/24.
- SANTI, A. M. M. *et al.* (2000). Monitoramento da qualidade do ar no município de Itabira, MG: avaliação dos resultados em anos recentes (1997/99) e das perspectivas de modernização da rede de monitoramento no contexto do licenciamento ambiental corretivo da CVRD. **Anais do Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Porto Alegre, RS, Brasil, 27.
- SANTOS, A. P. (2020). **Crescimento urbano e expansão minerária: a dinâmica do comportamento das partículas inaláveis e da temperatura da superfície no perímetro urbano de Paracatu - MG**. 85 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia – MG. DOI
- SANTOS, B. A. *et al.* (2019). Distribuição espaço-temporal dos focos de calor no estado de Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 3, p. 64-84. ISSN 0101-9759.

- SANTOS, S. M. B. *et al.* (2017). Quantificação e avaliação dos focos de calor no Parque Nacional da Chapada Diamantina e entorno no período de 2007 a 2016. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 4, n. 69, p. 701-712.
- SANTOS, W. A. *et al.* (2020). **Comparativo da proporção de focos de queimadas do Noroeste de Minas Gerais em relação ao Cerrado brasileiro entre 2015 e 2019**. Disponível em: <<https://www.finom.edu.br/assets/uploads/cursos/tcc/2021012814010614.pdf>>. Acesso em: 18/01/24.
- SARRA *et al.* (2021). Impactos das queimadas da região Centro-Oeste do Brasil sobre as cidades do estado de São Paulo. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 51237–51257.
- SCCON Geospatial. **O que é o NDVI?** (2023). Disponível em: <<https://blog.sccon.com.br/blog/o-que-e-ndvi/>>. Acesso em: 01/11/24.
- SENAR - Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. (2018). Coleção SENAR 227 - **Fogo: prevenção e controle no meio rural**. Brasília, SENAR. 88 p.
- SESP - Secretaria de Estado de Segurança Pública. (2019). **Entenda as diferenças entre queimadas, incêndios florestais e focos de calor**. Disponível em: <<https://www.sesp.mt.gov.br/-/entenda-as-diferencas-entre-queimadas-incendios-florestais-e-focos-de-calor>>. Acesso em: 07/05/24.
- SILA *et al.* (2013). Material particulado originário de queimadas e doenças respiratórias. **Revista Saúde Pública**, v. 47, n. 2, p. 345-352.
- SILVA, A. G. *et al.* (2024). Ponte para o passado: riscos e impactos socioambientais causados pela exploração de ouro no município de Paracatu/MG. **Caderno de Geografia**, v.34, n.77. ISSN 2318-2962. DOI: 10.5752/p.2318-2962.2024v34n77p511
- SILVA, B. H. R. (2021). Avaliação de impactos ambientais em áreas de mineração com o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI): estudo de caso para a região de Paracatu (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n. 3, p. 2-17.
- SILVA, L. N. *et al.* (2012). **Validação do método de determinação de arsênio em material particulado atmosférico de Paracatu (MG) em filtros de fibra de vidro**. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/119>>. Acesso em: 19/01/25.
- SILVA JÚNIOR *et al.* (2021). Avaliação de incêndio em ambiente de Caatinga a partir de imagens Landsat-8, índice de vegetação realçado e análise por componentes principais. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 417-439.
- SIRAVENHA *et al.* (2013). **Uso de índices de diferença normalizada na detecção de nuvens e sombras em imagens Landsat-5 TM**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. Disponível em: < >. Acesso em: 17/01/25.
- VAKALIS *et al.* (2004). A GIS based operational system for wildland fire crisis management II. System architecture and case studies. **Applied Mathematical Modelling**, v. 28, n. 4, p. 411–425.
- VICTORIA *et al.* (2009). **Análise harmônica de séries temporais de imagens NDVI/MODIS para discriminação de coberturas vegetais**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1589-1596.
- VORMITTAG *et al.* (2021). Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, Energia e Ambiente, v. 35, n. 102, p. 7-30.
- WEATHER SPARK. (2024). **Clima e condições meteorológicas médias em Paracatu no ano todo. Minas Gerais, Brasil**. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/30366/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Paracatu-Minas-Gerais-Brasil-durante-o-ano#>>>. Acesso em: 02/11/24.
- ZICCARDI, L. G. *et al.* (2020). Forest fire risk indices and zoning of hazardous areas in Sorocaba, São Paulo state, Brazil. **Journal of Forestry Research**, v. 31, p. 581-590.

ISBN: 978-65-6068-160-6

BR



9 786560 681606