



OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS EM ÁREA DE USO ANTRÓPICO NA REGIÃO CENTRO SUL DO ESTADO DE RORAIMA, BRASIL

DOI: <https://doi.org/10.24979/n7wgzf71>

Paulo Eduardo Barni - Universidade Estadual de Roraima/UERR (<https://orcid.org/0000-0001-7868-8691>)

Yasmin Alencar Pereira - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Reinaldo Imbrozio Barbosa - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/INPA (<https://orcid.org/0000-0002-7482-346X>)

Valeria Souza Dias - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Rayuri Vicente dos Santos - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Tiago Souza Vieira - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Thamyres Silva Alves - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Késia Graciely Alves de Sousa - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Jorge Feitosa dos Santos - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Francisco Barros do Nascimento - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Bianka Santos Pedreira - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Aldeniza Miranda Santos - Universidade Estadual de Roraima/UERR

Philip Martin Fearnside - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/INPA (<https://orcid.org/0000-0003-3672-9082>)

Resumo: O estudo teve como objetivo principal apresentar um panorama de ocorrências de queimadas em área de uso antrópico na região Centro Sul do Estado de Roraima considerando os meses de janeiro, fevereiro e 20 dias do mês de março do ano de 2023. Nesse caso o estudo se baseou em duas imagens Sentinel-2 do dia 21 de março de 2023 abrangendo uma área de 23.038,2 km² da região centro sul do estado e que intersecta parte dos municípios de Cantá, Caracarái, Rorainópolis e São Luís. Além do levantamento de queimadas nas imagens o documento apresenta uma série de análises espaço-temporais buscando correlacionar o clima, desmatamento e estradas com as ocorrências de focos de calor (*proxy* para queimadas) entre os anos de 2010 e 2022. Esperamos que essas informações sejam úteis para a melhora da tomada de decisões, no âmbito do Comitê de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais de Roraima, para os períodos mais críticos de estiagem considerando essa importante região do estado.

Palabras-clave: Desmatamento; Amazônia; manejo de pastagens e roças; Incêndios florestais.

Abstract: The main objective of the study was to present an overview of fire occurrences in an area of anthropogenic use in the Central-South region of the State of Roraima considering the months of January, February and 20 days of March in the year 2023. In this case the study was based on two Sentinel-2 images from March 21, 2023, covering an area of 23,038.2 km² in the central south region of the state and which intersects part of the municipalities of Cantá, Caracarái, Rorainópolis and São Luís. In addition to the survey of fires in the images the document presents a series of spatio-temporal analyzes seeking to correlate the climate, deforestation and roads with the occurrences of hot spots (*proxy* for fires) between the years 2010 and 2022. We hope that this information will be useful for improving decision-making, within the scope of the Roraima Forest Fire Prevention and Combat Committee, for the most critical periods of drought considering this important region of the state.

Keywords: Deforestation; Amazon; management of pastures and croplands; Forest fires.

INTRODUÇÃO

O manejo da paisagem pós desmatamento na Amazônia brasileira ainda é realizado com o uso frequente do fogo, tanto por agricultores familiares quanto por fazendeiros (p. ex., BARONA et al., 2020). Esse sistema de manejo pode ser considerado de baixo custo financeiro e de pequeno aporte tecnológico. No entanto, causam, anualmente enormes prejuízos para a floresta devido aos fogos que escapam acidentalmente do controle no momento da queima de pastagens e da biomassa cortada pelo desmatamento e de florestas secundárias (juquira, capoeira) (MAPBIOMAS, 2023) e à sociedade civil devido a emissão de fuligem para a atmosfera causando doenças respiratórias (ALVES et al., 2014; GALVÃO et al., 2018; FERNANDES, et al., 2021). Em anos de secas severas como aquelas desencadeadas pelo fenômeno El Niño, esses acidentes alcançam proporções gigantescas e imprevisíveis para sobrevivência e a integridade da floresta (ALENCAR et al., 2015; LAPOLA et al., 2023).

Neste sentido o monitoramento de queimadas e de incêndios florestais na Amazônia é de fundamental importância (p. ex., BARNI et al., 2021). O uso de imagens de Sensoriamento Remoto (SR) e ferramentas de Geoprocessamento, como Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sistemas de Posicionamento Global (GPS, na sigla em inglês), permitem o acompanhamento e a evolução da degradação da floresta por desmatamento, Extração Seletiva de Madeira (ESM) e queimadas e incêndios (p. ex., FERRO et al., 2023) quase que em tempo real. Essas informações servem para a criação e o desenho de políticas públicas realistas visando combater ou diminuir essas práticas danosas ao meio ambiente no nível regional e municipal. Dessa forma o estudo teve como objetivo principal realizar um levantamento de dados relacionados a queima da biomassa do desmatamento e de queimadas para o manejo de pastagens e roças na região centro sul do Estado de Roraima. O estudo se propôs a responder também as seguintes questões científicas (Q): **Q1.** Qual a efetividade da detecção de queimadas por focos de calor? **Q2.** Qual a relação entre o desmatamento acumulado na paisagem e as queimadas para manutenção de pastagens e roças? **Q3.** Qual o padrão mensal de ocorrência de queimadas na região Centro Sul do Estado de

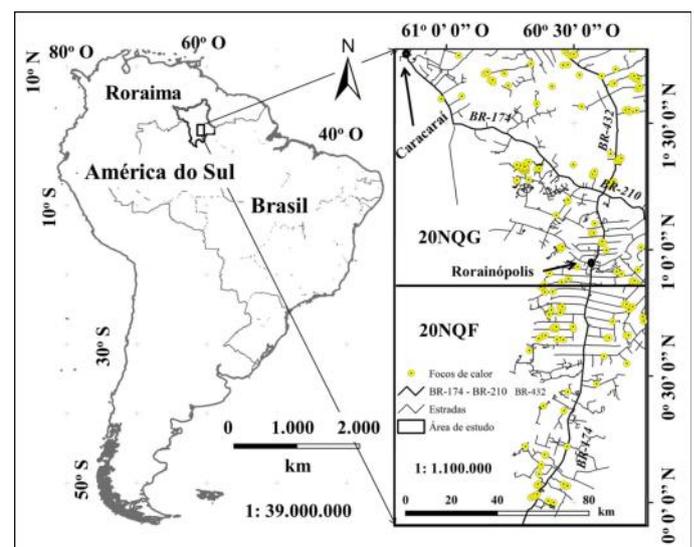
Roraima? **Q4.** Qual a relação entre focos de calor, estradas e as queimadas para limpeza de pastagens e roças?

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a uma grade vetorial do satélite Sentinel-2 abrangendo duas imagens (20NQG e 20NQF) medindo 23.038,2 km² e intersectando partes de quatro municípios da região sul do estado de Roraima: Cantá (0,9%), Caracará (40,2%), Rorainópolis (57,4%) e São Luiz (1,4%) (Figura 1). Essa área engloba florestas de ecótonos ou de tensão ecológica entre floresta ombrófila densa / campinarana, floresta ombrófila densa, campinarana e áreas de não-florestas (campinas) caracterizadas por solos pobres, arenosos e periodicamente inundados (BARNI et al., 2016). A precipitação média anual (2.181,2 mm) variou entre 1.813,8 mm a 2.548,7 mm (DesvPad = 367,4 mm) entre os anos de 1988 a 2018 (n=21 anos) (BARNI et al., 2020). A malha viária é composta por 277,0 km de rodovias federais (BR-174, BR-210 e BR-432), por 77,1 km da estrada estadual RR-070 e 2.780,8 km de estradas secundárias ou vicinais. É importante destacar que nessa região o uso do fogo é bastante frequente e é uma ferramenta de baixo custo para que agricultores e fazendeiros possam fazer a manutenção das pastagens e roças.

Figura 1: Área de estudo. Os pontos em amarelo representam a localização de 162 focos de calor registrados entre 01 de janeiro de 2023 a 20 de março de 2023 na área de estudo.



Fonte: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>.

BANCO DE DADOS GEOGRÁFICOS

O banco de dados foi composto por (1) duas imagens Sentinel-2 do dia 21 de março de 2023, correspondendo a cena NQG (cena norte) e NQF (cena sul) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>); (2) a grade vetorial das duas cenas (<https://www.instrutorgis.com.br/download-da-grade-do-satelite-sentinel2/>); (3) camada vetorial do desmatamento acumulado em Roraima até 2022 incluindo as classes de floresta, Não floresta e hidrografia (BRASIL-INPE, 2023); (4) camada vetorial de focos de calor (pontos) entre 01 de janeiro de 2010 a 20 de março de 2023 no nível estadual (<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>); (5) camada vetorial de estradas secundárias (vicinais) e BRs; (6) camada vetorial de municípios do estado (BRASIL-INPE, 2023); (7) camada vetorial dos Projetos de Assentamento (PAs) (https://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py); (8) camada vetorial das Unidades de Conservação (UCs) e Terras Indígenas (TIs) (<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>) que intersectam a área de estudo; (9) mapas de precipitação acumulada mensalmente de 1998 a 2018 (n=252) (BARNI et al., 2020); (10) mapas de precipitação acumulada mensalmente de 2019 a 2022 (n=48) e; (11) dezoito mapas de precipitação acumulada diariamente considerando os dias 26, 28, 30 e 31 de janeiro de 2023; mapas considerando os dias 01, 06, 11, 18, 22, 25 e 27 de fevereiro de 2023 e mapas dos dias 10, 13, 14, 16, 17, 18 e 20 de março de 2023 (<https://gpm.nasa.gov/data/directory>).

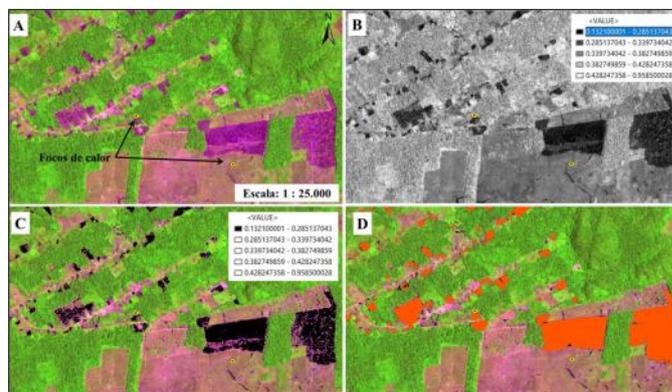
DETECÇÃO E REGISTRO DE ÁREAS QUEIMADAS EM IMAGENS SENTINEL-2

Inicialmente, todas as camadas vetoriais, abertas na área de trabalho do *software Quantum Gis* (QGis) Desktop 3.4 Madeira (QGis, 2023) foram submetidas a operação de intersect com a camada da área de estudo correspondente à grade vetorial abrangendo as duas cenas Sentinel-2. Esse procedimento teve o objetivo de excluir as partes externas não pertencentes a área de estudo de cada camada vetorial. Isto foi necessário porque as camadas vetoriais utilizadas no estudo estavam no nível estadual e nacional.

Para a detecção e caracterização de áreas queimadas nas imagens foi utilizado um arquivo de

pontos com coordenadas geográficas de roças e pastagens queimadas coletadas nas proximidades da sede municipal de Rorainópolis. De forma auxiliar e para expandir a detecção para toda área de estudo, foi utilizada uma camada vetorial de pontos de focos de queimadas ou de calor cobrindo toda área do estado. Nesse caso os focos de calor foram plotados sobre as imagens Sentinel-2 em composição RGB na área de trabalho do QGis sobrepondo áreas com resposta espectral correspondendo a áreas queimadas nas imagens (Figura 2A). Na sequência, a imagem de refletância da banda 8 do Sentinel-2, correspondendo ao comprimento de onda do infravermelho apresentando valores contínuos (valor mínimo= 0,1321 e valor máximo= 0,9585) foi classificada automaticamente em cinco classes. Verificou-se que a menor classe de valores, com intervalo entre 0,132100001 e 0,285137043, sobrepôs perfeitamente os polígonos correspondentes as áreas queimadas observadas na imagem RGB (Figura 2B). No passo seguinte essa imagem foi submetida a operação de reclassificação para excluir as classes não desejáveis para a análise, criando-se uma nova imagem (formato raster) com apenas a classe de interesse onde todos os pixels receberam o valor 1 (Figura 2C). Na sequência essa imagem foi convertida para o formato vetorial (*shapefile*) de polígonos e foi submetida a operações de edição para a retirada de ruídos indesejáveis resultantes da operação de reclassificação (Figura 2D). Por exemplo, nessa faixa do espectro eletromagnético muitas áreas representando, rios, lagos e açudes foram confundidas com áreas queimadas, precisando, portanto, serem excluídas do arquivo vetorial.

Figura 2: Passos para o registro de áreas queimadas. Detecção de queimadas na imagem sentinel-2 com auxílio de dados de campo e focos de calor (A). Classificação da imagem da banda 8 (infravermelho) (B) com separação da classe desejável (C) e vetorização da classe desejada.



Fonte: imagens Sentinel-2 de 21 de março de 2023 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

ANÁLISE DE QUEIMADAS CONSIDERANDO OS FOCOS DE CALOR

Para melhor avaliar e interpretar as ocorrências de queimadas, registradas nas imagens Sentinel-2 de 21 de março de 2023, 162 pontos de focos de calor observados na área de estudo no período entre 01 de janeiro de 2023 a 20 de março de 2023 foram submetidos a operações de criação de “buffer” (faixa) considerando um raio de 1.000 metros a partir de cada ponto. O raio escolhido se justifica considerando a resolução espacial dos pixels do sensor de referência do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), AQUA_M-T (sensor MODIS, passagem no início da tarde), que varia de 1 km, no centro da imagem, a 4 km na borda da imagem (SISAM, 2013). Com essa operação foi criado um arquivo vetorial (*shapefile*) de polígonos e, para remover linhas de sobreposição em locais com distâncias menores que 2 km entre dois ou mais pontos, o arquivo gerado foi submetido a operação de “dissolve”. Na sequência esse novo arquivo foi cruzado (*intersect*) com as classes de uso da terra (floresta, não-floresta, desmatamento e área queimada) constantes na área estudada e os resultados foram separados pelas áreas dos municípios.

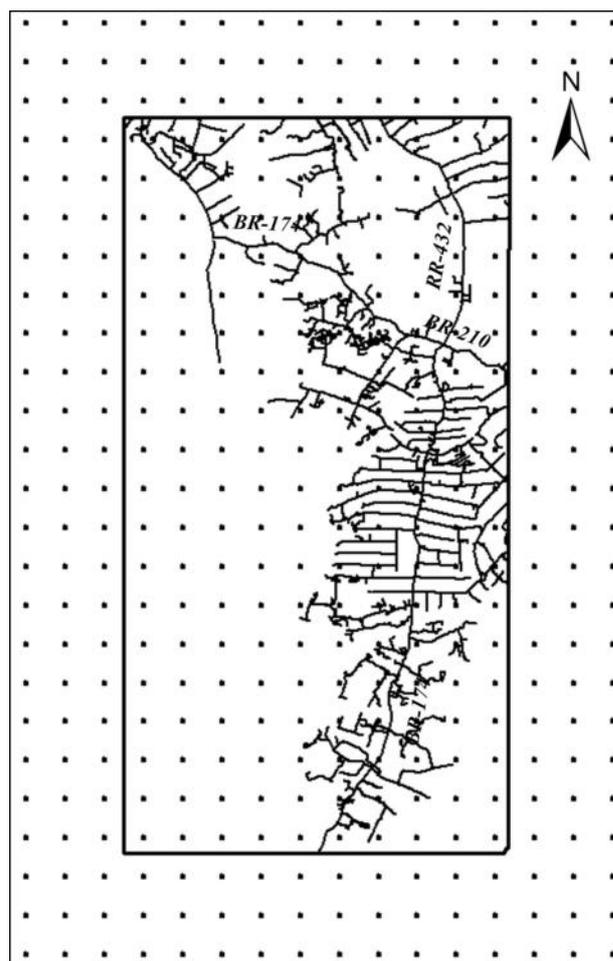
ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO

Dados de precipitação de 1998 a 2018 (n=21), sobrepondo a área de estudo, foram adquiridos de Barni et al., (2020). Esses autores trabalharam com dados de precipitação distribuídos em uma grade de pontos de ~28 km (0,25°) de distância um do outro gerados pelo satélite tropical de medição de precipitações (TRMM na sigla em Inglês), produzido pela Administração Nacional Aeronáutica e Espacial (NASA, EUA) em parceria com a Agência Espacial Japonesa (JAXA) para estudos da precipitação nos trópicos (p. ex., PASSOW, 2010; MACRITCHIE, 2015). O mapeamento foi realizado a partir da técnica de interpolação (geoestatística) pelo método da krigagem ordinária (e.g. BARNI et al., 2016; 2020), obtendo-se um mapa de precipitação média de cada mês para toda a área de Roraima com 500 m de resolução espacial ou 25 hectares (ha).

Dados de precipitação mensal após essa data (2019 a 2023) foram adquiridos diretamente do sítio na internet da NASA (<https://gpm.nasa.gov/data/directory>) em mapas com ~11 km (0,1°) de resolução espacial em formato *raster* ou de grade de células em

uma janela de 874,7 km (-66° O a -58° L) por 873,6 km (6° N a -2° S) abrangendo o Estado de Roraima e seus arredores. Todos os mapas mensais foram transformados para arquivos vetoriais (*shapefile*) de pontos. Os mapas dos meses dos anos de 2010 a 2023 foram recortados para a nossa área de estudo (+ 33 km em volta para minimizar o efeito de borda) para verificar a precipitação ocorrida nesse período e poder comparar com a série de dados de focos de calor (Figura 3). Essa coleta de dados de precipitação para a área de estudo foi realizada diretamente da tabela de atributos dos arquivos vetoriais abertos em planilhas do *software* Excell (<https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>). A modelagem da precipitação dos meses de janeiro, fevereiro e de 01 a 20 de março de 2023 foi realizada por Krigagem Ordinária considerando os valores de precipitação dos cinco pontos vizinhos mais próximos de um local a ser estimado (p. ex., BARNI et al., 2016; 2020).

Figura 3: Dados de precipitação sobrepondo a área de estudo e uma faixa de ~30 km no entorno.



Fonte: NASA, Global Precipitation Measurements: <https://gpm.nasa.gov/data/directory>.

DENSIDADE DE KERNEL

Para a espacialização dos dados de focos de calor e estradas na área estudada foi utilizada a Densidade de Kernel (DK) em ambiente computacional do *software* Quantum Gis (QGis) Desktop 3.4 Madeira (<https://timdocs.qgis.org/en/site/forusers/download.html>). A dedução do “raio de busca” (distância em m), parâmetro utilizado para a suavização e melhor representação dos índices de queimadas ($n \text{ km}^{-2}$) e estradas (km km^{-2}) nos mapas de DK foi obtida com o *default* ou padrão da máquina (opção automatizada do *software*). Ressalta-se que nesta abordagem cada uma das observações é ponderada pela distância em relação a um ponto (foco de calor) / linha (estrada). Ou seja, um estimador de densidade de kernel é um estimador cujos parâmetros básicos são: (a) um raio de influência que define a vizinhança do ponto / linha a ser considerado e; (b) uma função de estimação com propriedades “convenientes” de suavização do fenômeno ao longo da superfície (CAMARGO, FUCKS, CÂMARA, 2004). O mapa produzido por esse método é de representação matricial (raster) ou de grade de células (pixel) e apresenta valores contínuos de densidade crescente / decrescentes em torno de regiões de maior / menor ocorrência do fenômeno estudado. Neste caso o mapa produzido apresenta padrões representados em níveis de cinza. Para melhor entendimento desses padrões de representação e o seu significado à luz dos nossos objetivos, os mapas foram classificados automaticamente em cinco classes de densidade (Jenks natural breaks: DENT et al., 1990; SLOCUM, 1999) e, na sequência, as três classes de maior densidade foram agrupadas em apenas uma classe.

ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ESPACIAL

A análise de correlação espacial consistiu de cruzamentos sucessivos entre os mapas resultantes do agrupamento das classes com os outros mapas de interesse da área de estudo. Esse procedimento foi realizado na calculadora *raster* do *software* em operação matemática de multiplicação de valores. Nesse caso todos os mapas tinham o valor “1” e a mesma resolução espacial. Na sequência obteve-se a fração das áreas resultantes do cruzamento entre os mapas em relação às suas áreas originais através de operação simples de divisão em planilha do *software* Excell. Essas frações resultantes foram consideradas como grau de correlação entre os mapas, semelhante

à correlação de Pearson (DANCEY; REIDY, 2006; FIGUEIREDO-FILHO; SILVA JR., 2009). Neste caso, frações com valor de $r \geq 0,5$ foram consideradas como representando forte associação entre os mapas (COHEN, 1988).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística compreendeu testes de normalidade (Lilliefors), teste “t” e Testes de Regressão Linear Simples (TRLS) no nível de 95% de confiança estatística (Erro tipo I: $\alpha = 0,05$). O teste de normalidade verificou se os dados eram normais, ou seja, se obedeciam a curva padrão de distribuição. Os outros testes serviram para analisar os valores das variáveis dos municípios de Caracará e Rorainópolis. Essa decisão foi tomada em função de que o desmatamento somado nos dois municípios correspondem a 93,6% da área total desmatada na área de estudo. Para responder a segunda pergunta científica aplicou-se o TRLS onde a variável independente (x) ou explicativas foi área desmatada e a variável dependente (y) ou variável explicada foi a área queimada em cada município. Os valores das variáveis foram tomados dentro de *buffers* de 1.000 m de raio a partir dos pontos de focos de calor observados na área de estudo. As análises foram executadas no *software* livre R 3.6 (R CORE TEAM, 2023), no nível de 95% de confiança estatística (erro tipo I: $\alpha=0,05$).

RESULTADOS

DESMATAMENTO E QUEIMADAS

O desmatamento acumulado somou 2.485,6 km^2 , representando 10,8% de toda área de estudo e 16,0% da área originalmente florestada nas duas cenas (15.492,5 km^2 ; 67,2%), sendo a área restante (7.545,7 km^2 ; 32,8%) composta por não-floresta (7.520,0 km^2) e por hidrografia (25,6 km^2) (Tabela 1). As áreas queimadas somaram 136,3 km^2 representando 5,5% da área desmatada até 21 de março de 2023. Considerando apenas queimadas por desmatamento da floresta (queima da biomassa florestal) a área somou 59,7 km^2 , representando 43,8% das queimadas e as queimadas em áreas previamente desmatadas somaram 76,6 km^2 , representando 56,2% de áreas queimadas para o manejo de pastagens e roças.

A maior área queimada por desmatamento foi

registrada no município de Rorainópolis com 42,9 km², representando 71,9% do total desmatado. Caracarái concentrou 23,2% (13,9 km²) do desmatamento e Cantá (0,792 km²; 1,3%) e São Luiz (2,1 km²; 3,5%) concentraram 2,9 km² (4,8%) de área desmatada e registradas em 21 de março de 2023 na área estudada.

Considerando as áreas de florestas originais (sem desmatamento) distribuídas nos municípios de Caracarái (5.985,0 km²; 38,6%) e de Rorainópolis (9.045,3 km²; 58,4%) era esperado que os percentuais de desmatamento fossem semelhantes, ou seja, preservando a mesma proporção observada na distribuição de florestas. No entanto se observou que Rorainópolis desmatou 13,5% a mais do que seria esperado comparando-se com Caracarái (71,9% menos 58,4%). Por outro lado, esse “desbalanço” não foi observado entre os números de focos de calor registrados em Caracarái (73; 45,1%) e em Rorainópolis (75; 46,3%) no período de 01 de janeiro de 2023 a 20 de março de 2023. Pelo contrário, seria esperado que Caracarái tivesse um menor registro de focos de calor no período, considerando o seu menor percentual de área desmatada acumulada de 33,9% em relação a Rorainópolis (59,7%). Considerando esse último quesito seria esperado que Rorainópolis registrasse muito mais focos de calor do que realmente registrou.

Essa tendência de desbalanço também foi observada entre os PA's de Caracarái e de Rorainópolis (Tabela 1; Figura 4). Enquanto 38 (39,2%) focos de calor foram registrados dentro dos PA's de Caracarái, nos PA's de Rorainópolis o registro foi de 47 focos, representando 48,5% das ocorrências dentro de PA's (97 focos). Esses 97 focos representaram 59,9% enquanto os outros 40,1% foram registrados fora das áreas de PA's dentro dos municípios da área de estudo. A T.I. Pirititi, localizada no município de Rorainópolis, surpreendentemente, registrou 4,8 km² de desmatamento acumulado, dos quais 3,7 km² (77,1%) ocorreram de 2017 a 2022. Por outro lado, a T.I. Waimiri Atroari não registrou desmatamento em seu interior.

Considerando as Unidades de Conservação (UC's) foram registrados apenas 560 hectares de desmatamento acumulado no período da análise: sendo 423 ha (0,423 km²) na Floresta Nacional (FLONA) Anauá, em Rorainópolis e 137 ha (0,137

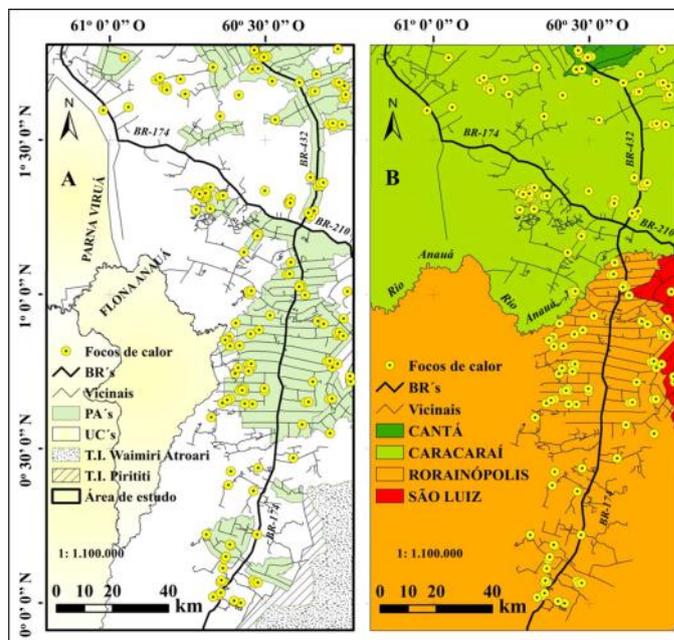
km²) no Parque Nacional (PARNA) do Viruá, em Caracarái. As UC's não registraram focos de calor e nem queimadas no seu interior. Por outro lado, apesar de não registrarem focos de calor, a T.I. Waimiri-Atroari registrou 37 ha (0,037 km²) de queimadas e a T.I. Pirititi registrou três ha de queimadas a partir da detecção na imagem de 21 de março de 2023.

Tabela 1: Distribuição das classes de uso (atributos) das duas cenas Sentinel-2 nos quatro municípios da área de estudo: Cantá, Caracarái, Rorainópolis e São Luiz em 2023.

Fonte: Os autores, 2023.

CLASSE DE USO	Cantá (km ²)	%	Caracarái (km ²)	%	Rorainópolis (km ²)	%	São Luiz (km ²)	%	ÁREA (km ²)	%
Floresta	102,1	0,8	5.142,6	39,5	7.562,0	58,1	199,2	1,5	13.006,9	56,5
Não-Floresta	72,7	1,0	3.263,5	43,4	4.183,6	55,6	0,0	0,0	7.520,0	32,6
Desmatamento	26,8	1,1	842,5	33,9	1.483,3	59,7	132,9	5,3	2.485,6	10,8
Hidrografia	0,0	0,0	20,6	80,5	5,0	19,5	0,0	0,0	25,6	0,1
Queimadas	2,4	1,7	47,7	35,0	82,6	60,6	3,6	2,7	136,3	5,5
Focos de calor	9	5,6	73	45,1	75	46,3	5	3,1	162	100,0
Área de estudo	201,6	0,9	9.269,2	40,2	13.234,0	57,4	332,2	1,4	23.038,2	100,0
Floresta	102,2	4,3	102,9	43,6	115,5	49,0	7,4	3,1	235,9	57,9
Não-Floresta buf	2,1	7,1	26,0	87,0	1,8	5,9	0,0	0,0	29,9	7,3
Desmatamento buf	7,3	5,2	44,6	31,5	80,1	56,6	9,6	6,8	141,6	34,8
Queimadas buf	0,8	3,1	8,8	32,1	17,5	63,5	0,4	1,3	27,5	6,7
Desmatamento	0,792	1,3	13,9	23,2	42,9	71,9	2,1	3,5	59,7	43,8
Buffer focos	19,7	4,8	173,4	42,6	197,3	48,4	17,0	4,2	407,4	100,0
Estradas secundárias	35,1	1,3	1.147,0	41,6	1.471,2	53,4	102,8	3,7	2.756,2	87,9
BR-174	0,0	0,0	130,3	47,3	145,0	52,7	0,0	0,0	275,3	8,8
BR-210	0,0	0,0	24,6	93,6	0,0	0,0	1,7	6,4	26,3	0,8
RR-070	11,6	15,1	65,5	84,9	0,0	0,0	0,0	0,0	77,1	2,5
Total estradas	46,8	1,5	1.367,4	43,6	1.616,1	51,6	104,5	3,3	3.134,8	100,0
PA's	200,4	4,6	1.555,1	35,9	2.492,9	57,5	84,8	2,0	4.333,2	18,8
Focos de calor	9	9,3	38	39,2	47	48,5	3	3,1	97	59,9
Desmatamento	26,8	1,8	343,6	22,5	1.113,3	72,9	43,3	2,8	1.526,9	100,0
Queimadas	2,4	2,8	20,4	24,0	61,4	72,3	0,8	0,9	84,9	100,0
TI Waimiri-Atroari	0,0	0,0	0,0	0,0	872,0	72,6	0,0	0,0	872,0	3,8
Desmatamento	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Queimadas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,037	0,0	0,0	0,0	0,037	100,0
TI Pirititi	0,0	0,0	0,0	0,0	328,8	27,4	0,0	0,0	328,8	1,4
Desmatamento	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	100,0	0,0	0,0	4,8	100,0
Queimadas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,003	100,0	0,0	0,0	0,003	100,0
UC's	0,0	0,0	1.535,7	22,8	5.192,0	77,2	0,0	0,0	6.727,7	29,2
Desmatamento	0,0	0,0	0,2	29,5	0,4	70,5	0,0	0,0	0,6	100,0

Figura 4: Focos de calor entre 01/01 a 20/03/2023, BR's, estradas vicinais, Projetos de Assentamentos (PA's), Unidades de Conservação (UC's) e a Terras Indígenas (TI) Aimiri Atroari e Pirititi, em (A). Focos de calor, BR's, estradas vicinais e municípios, em (B).



Fonte: Projetos de Assentamentos (https://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py); Terras Indígenas e Unidades de Conservação (<http://terrabrasil.dpi.inpe.br/downloads/>) e; estradas e municípios (BRASIL-INPE, (2023).

OCORRÊNCIA DE FOCOS DE CALOR DE 2010 A 2022

Embora nossa área de estudo (23.038,2 km²) represente apenas 10,3% da área total do estado (223.644,530 km²; BRASIL-IBGE, 2023), entre 01/01/2010 e 31/12/2022, foram registrados 6.121 focos de calor (Tabela 2). Este número representou 22,0% das 27.879 ocorrências de focos de calor observadas em todo o estado no mesmo período. Ou seja, nossa área de estudo recebeu 113,1% a mais de focos de calor do que seria esperado considerando o tamanho de sua área física. A grande área desmatada até 2022 (2.485,6 km²), representando 10,8% da área de estudo e a imensa rede de estradas principais e secundárias (3.134,8 km) explicam, pelo menos parcialmente, essa grande ocorrência de focos de calor nessa região do estado.

Considerando apenas os focos de calor em nossa área de estudo os anos de 2016 (1.065 focos e 17,4%) e 2019 (1.569 focos e 25,6%) concentraram as maiores ocorrências. Os municípios de Caracará (2.937 focos e 48,0%) e Rorainópolis (2.919 focos e 47,7%) concentraram 95,7% das ocorrências no período da análise (Tabela 2; Figura 5). Nesse caso a representatividade das áreas de Rorainópolis e de Caracará explicam a grande quantidade de ocorrências.

É importante destacar que os anos de 2016 e 2019 foram anos de prevalência do fenômeno climático El Niño na região (FONSECA et al., 2017; BARNI et al., 2020, 2021). O ano de 2016 foi marcado por ocorrências de incêndios florestais de grandes proporções e severidade, em termos de perda de biomassa, principalmente em áreas de Extração Seletiva de Madeira (ESM) (BARNI et al., 2021). Por outro lado, embora o ano de 2019 tenha registrado o maior número de focos de calor no período da análise (1.569 focos), representando 25,6% das ocorrências, foram registradas áreas bem menores de incêndios florestais do que em 2016. Nesse sentido, há relatos fidedignos que atestam a recorrência de incêndios florestais de sub-bosque dentro Parque Nacional do Viruá e nas proximidades da sede municipal de Rorainópolis (dados não publicados).

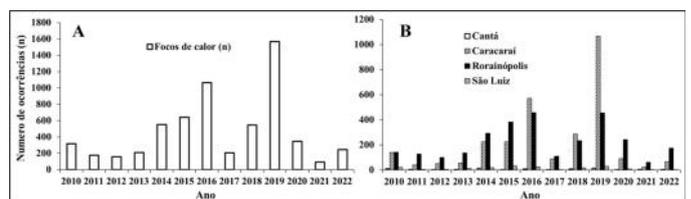
Tabela 2: Focos de calor entre 2010 a 2022 nos quatro municípios que englobam a área de estudo.

*Nome dos municípios: CARACA=Caracará; RORAIN=Rorainópolis; S. Luiz=São Luiz.

ANO	CANTÁ	%	*CARACA	%	*RORAIN	%	*S. LUIZ	%	TOTAL	%
2010	10	3,2	141	44,6	143	45,3	22	7,0	316	5,2
2011	5	2,8	40	22,5	128	71,9	5	2,8	178	2,9
2012	2	1,3	51	32,7	99	63,5	4	2,6	156	2,5
2013	4	1,9	55	26,4	137	65,9	12	5,8	208	3,4
2014	14	2,5	226	40,9	293	53,0	20	3,6	553	9,0
2015	2	0,3	225	35,1	383	59,8	31	4,8	641	10,5
2016	9	0,8	573	53,8	457	42,9	26	2,4	1.065	17,4
2017	3	1,5	89	43,4	111	54,1	2	1,0	205	3,3
2018	8	1,5	287	52,6	234	42,9	17	3,1	546	8,9
2019	14	0,9	1.069	68,1	456	29,1	30	1,9	1.569	25,6
2020	3	0,9	92	26,6	242	69,9	9	2,6	346	5,7
2021	5	5,4	23	25,0	61	66,3	3	3,3	92	1,5
2022	4	1,6	66	26,8	175	71,1	1	0,4	246	4,0
TTL (n) / MÉDIA (%)	83	1,9	2.937	38,3	2.919	56,6	182	3,2	6.121	100,0

Fonte: Os autores, 2023.

Figura 5: Número total anual de ocorrências de focos de calor (A) e anual por município (B).



Fonte: Os autores, 2023.

PRECIPITAÇÃO E FOCOS DE CALOR

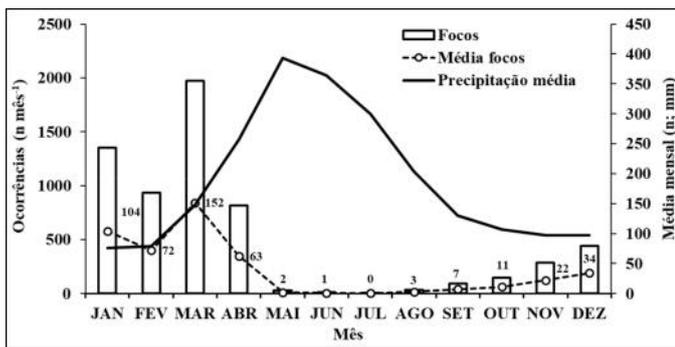
A precipitação média anual estimada para a área de estudo foi de 2.252,1 mm para o período de 1998 a 2022. Os meses de maio, junho e julho apresentaram as maiores médias mensais de precipitação (393,5 mm, 364,8 mm e 299,8 mm, respectivamente) desse período. Considerando os focos de calor esses meses apresentaram as menores ocorrências médias (maio 2,1 ocorrências, junho 0,8 ocorrências e julho 0,5 ocorrências) demonstrando um comportamento inverso ao da precipitação. Por outro lado, somente o mês de março concentrou 32,2% (1.971 focos) das ocorrências de focos de calor do período (Tabela 3; Figura 6).

Tabela 3: Ocorrência de focos de calor observada na área de estudo observando-se os meses do ano no período de 2010 a 2022.

Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TTL
2010	94	70	133				2	7	7		3		316
2011	18	8	54	14		1	3	1	9	40	29		178
2012	24	26	13	2	2	2	1	7	25	37	17		156
2013	80	15	29	12		2		3	16	18	33		208
2014	109	108	166	17	7		1	13	1	24	107		553
2015	78	187	41	74	1	2	1	20	25	74	138		641
2016	705	74	222	20	8	5	6	6	5	14			1.065
2017	3	17	79	3	6		3	3	9	48	34		205
2018	138	214	165	8	1		1	7	5	6	1		546
2019	30	138	762	627	2	1	1	2	4	1	1		1.569
2020	18	48	251	18			2	4	1	2	1		346
2021	2	3	39	18			6	2	4	17	1		92
2022	53	27	17	2			9	26	34	14	63		246
TTL-G	1.352	935	1.971	815	27	10	6	36	95	146	286	442	6.121

Fonte: Os autores, 2023.

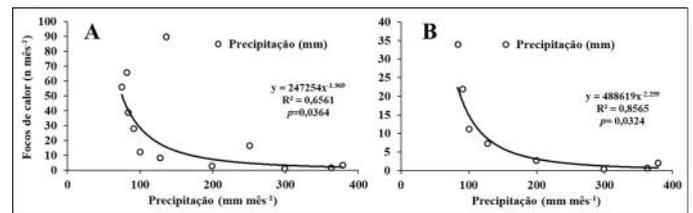
Figura 6: Número de focos de calor distribuídos mensalmente na área de estudo (barras) e média mensal dos focos de calor no período de 2010 a 2022 (linha tracejada) e distribuição da precipitação média mensal (linha sólida) do período de 1998 a 2022 na área de estudo.



Fonte: Os autores, 2023.

A curva de potenciação foi a que melhor se ajustou aos dados e explicou 65,6% da variação inversa entre a precipitação e a ocorrência de focos de calor na área de estudo (Figura 7). No entanto, o resultado da análise de regressão simples mostrado na figura 7A ($R^2 = 0,6561$; $p = 0,0364$) alcançou esse nível de explicação após a retirada dos valores de focos de calor dos anos de 2016 e de 2019, considerados anos anômalos (valores $>$ média + 1DesvPad). Já o resultado da análise de regressão simples, mostrado na figura 7B ($R^2 = 0,8565$; $p = 0,0324$) foi alcançado depois da retirada dos valores de precipitação e de ocorrência de focos de calor dos meses de janeiro, fevereiro, março e abril ($n = 8$). Embora esses meses sejam os de maior ocorrência de focos de calor na região centro sul de Roraima, se caracterizando como os meses de secas na região, normalmente são observadas taxas relativamente altas de precipitação (< 100 x > 50 mm). Vale mencionar que nos meses de secas as chuvas ocorrem, frequentemente, de forma esporádica e não contínua espacialmente. Geralmente apresentam uma baixa intensidade e acontecem em intervalos entre 7 a dez dias, o que permite que os agricultores e fazendeiros façam as suas queimas nesses intervalos sem chuva. Isso é possível devido ao ambiente de prevalência seca (umidade relativa do ar abaixo de 50%) e a densidade do material vegetal morto composto por folhas secas de capins das pastagens e por folhas e galhos secos de vegetação secundária cortada para a limpeza de pastagens e roças que estava em pousio por dois a quatro anos após o abandono.

Figura 7: Curva potencial negativa (A) desconsiderando as ocorrências de focos de calor dos anos de 2016 e 2019. Curva potencial negativa (B) desconsiderando as ocorrências dos meses de janeiro, fevereiro, abril e março ($n = 8$).

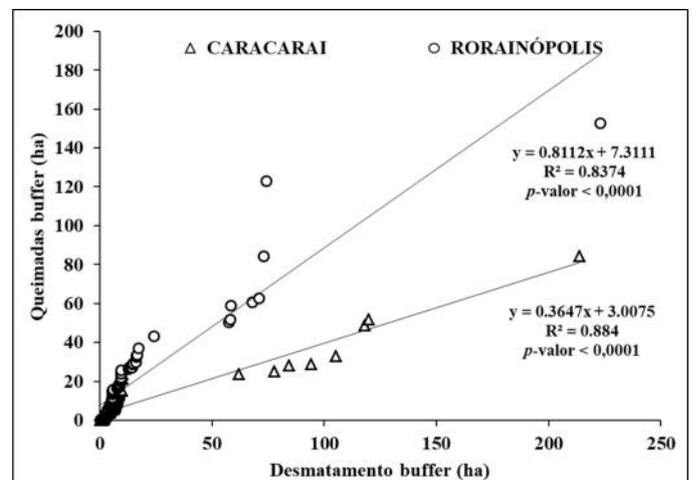


Fonte: Os autores, 2023.

RELAÇÃO ENTRE DESMATAMENTO E QUEIMADAS

A relação entre o desmatamento acumulado até 2022 dentro da faixa de buffer de 1.000 metros e as áreas queimadas detectadas nas imagens Sentinel-2 se apresentou positiva. Os resultados demonstraram que no município de Caracarái o desmatamento acumulado nas faixas explicou 88,4% da variação nas áreas queimadas ($R^2 = 0,884$; $p < 0,0000$). No município de Rorainópolis essa relação foi semelhante, tendo o desmatamento explicado 83,7% ($R^2 = 0,837$; $p < 0,0000$) das ocorrências de áreas queimadas dentro das faixas de 1.000 m (Figura 8).

Figura 8: Relacionamento positivo entre desmatamento acumulado e áreas queimadas na faixa de distância (buffer) de 1000 m em Caroebe e em Rorainópolis.



Fonte: Os autores, 2023.

ANÁLISE ESPACIAL DO DESMATAMENTO E QUEIMADAS

Os mapas de Densidade de Kernel (DK) aplicados aos focos de calor registrados entre 2010 e 2022 apontaram as áreas de maior ocorrência (n km²) em torno do eixo longitudinal das principais estradas. A área do mapa resultante do agrupamento das três maiores classes de densidade (~ 5 a ~ 26 focos por km²) mediu 6.633,3 km² e representou 28,8% da área de estudo. Como esperado, o mapa de densidade de estradas “desenhou” um padrão semelhante ao mapa

anterior, seguindo a distribuição de estradas na área de estudo. As três classes de maior densidade de estradas (0,164 a 0,665 km km²) somaram 8.329,5 km², representando 36,2% da área de estudo. As áreas geradas pela DK de focos de calor e de estradas tiveram uma sobreposição de 5.226,3 km² representando 78,8% da área de focos de calor e 62,7% da área de estradas. Considerando a média desses valores pode-se afirmar que esses mapas tiveram uma correlação de 70,8%. A maior correlação entre as variáveis espaciais foi observada entre a área gerada pelas três maiores classes de densidade de estradas e o desmatamento acumulado. Nesse caso foi observada uma sobreposição / correlação de 91,1% do desmatamento sobre a área de abrangência das três classes de maior densidade de estradas, sendo que apenas 8,9% do desmatamento acumulado ficou de fora dessa faixa. Considerando as áreas queimadas detectadas nas imagens Sentinel-2, a maior sobreposição / correlação ($r= 0,8726$) também foi observada sobre a área que abrangeu as três classes de maior densidade de estradas e a menor sobrepondo as áreas de desmatamento acumulado. Esse comportamento pode ser explicado devido ao registro de 43,8% das áreas queimadas (59,7 km²) se constituírem de novas áreas de desmatamento detectado (Tabela 4; Figura 9).

Tabela 4: Frações representando a correlação ou sobreposição entre as variáveis espaciais. Valores em negrito (km²) na diagonal representam a área de abrangência de cada variável considerada.

	Focos	Desmatamento	Queimadas	Estradas
Focos	6.633,3			
Desmatamento	0,6901	2.485,5		
Queimadas	0,6779	0,5664	136,3	
Estradas	0,7077	0,9109	0,8726	8.329,5

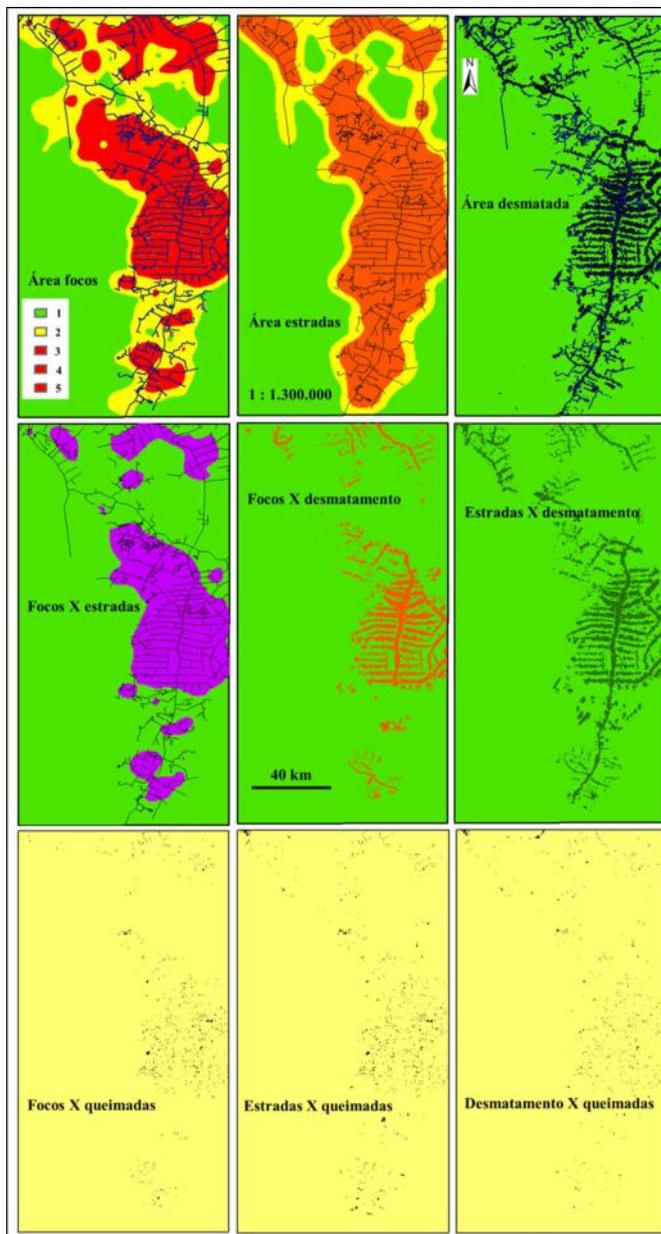
Fonte: Os autores, 2023.

ANÁLISE ESPACIAL CONSIDERANDO AS QUEIMADAS, FOCOS DE CALOR E PRECIPITAÇÃO

A krigagem ordinária da precipitação acumulada dos meses de janeiro (Figura 10A), fevereiro (Figura 10B) e março (20 dias) (Figura 10C) mostra claramente duas porções distintas da área de estudo com graus diferentes de umidade. Enquanto na porção centro norte da área de estudo predomina um ambiente relativamente seco, denotado pelos tons de amarelo-laranja a vermelho intenso, a porção centro sul experimentou um ambiente relativamente de maior umidade, denotado pelos tons de azul claro a azul escuro intenso. Numa tentativa de

capturar esse efeito da umidade sobre as os focos de calor e queimadas a área de estudo foi dividida em duas sub-regiões: (1) região centro-norte, formada pelos municípios de Caracaraí e Cantá e (2) região centro-sul, formada pelos municípios de Rorainópolis e São Luiz.

Figura 9: Análise de correlação espacial entre os mapas.



Fonte: Os autores, 2023.

Os focos de calor, em sua maioria, parece correlacionados com as áreas predominantemente mais secas do mapa, com algumas exceções. Por exemplo, no mapa de janeiro (n= 63; 38,9%) podem ser observadas ocorrências de focos de calor em áreas mais úmidas nas regiões noroeste, centro leste e sul. No mapa de fevereiro (n= 37; 22,8%) poucas ocorrências podem ser vistas na porção centro sul,

mais úmida. O mapa do mês de março (n= 62; 38,3%) apresenta condições atmosféricas de aumento da umidade da sua parte centro-sul em relação ao mês de fevereiro, mas, surpreendentemente, pode ser observada também um aumento nas ocorrências de focos de calor nesta região do mapa em relação ao mês de fevereiro (Figura 10).

Considerando as queimadas e o desmatamento detectados nas imagens Sentinel-2 em 21 de março de 2023 (Figuras 10D; E e; F), não são possíveis determinar as datas exatas das ocorrências devido à baixa correspondência dos focos de calor e as áreas queimadas efetivamente e detectadas em uma única ocasião (Tabela 1). Mas, como demonstrado acima, pudemos verificar sua preferência de ocorrência junto às estradas e bordas do desmatamento acumulado em toda a área de estudo.

Buscando compreender esses fatos comparando-se as ocorrências de áreas queimadas e desmatamento dentro dos municípios de Caracaraí e Cantá, região centro-norte da área de estudo e, aparentemente, mais secas, com as áreas queimadas e o desmatamento que ocorreram na região centro-sul (Rorainópolis e São Luiz) e, aparentemente, mais úmidas, verificamos que houve maior número de áreas queimadas e de desmatamento na região centro-sul (n=1.375 e n=859 polígonos de queimadas e desmatamento, respectivamente) do que na região centro-norte (n=765 e n=384 polígonos de queimadas e desmatamento, respectivamente). No entanto, o tamanho médio das áreas queimadas e desmatadas nestas duas sub-regiões da área de estudo se diferenciaram significativamente, o que não era esperado, supondo uso da terra semelhantes nas duas sub-regiões. Enquanto a área média foi de $4,6 \pm 9,9$ ha de Desvio Padrão (DP) e 0,7 ha de área mínima e 122,4 ha de área máxima queimada na região centro-norte, na região centro-sul a área média queimada foi de $3,1 \pm 4,9$ ha e 0,7 ha de área mínima e 69,0 ha de área queimada máxima (Teste T presumindo variâncias diferentes: $t=1,96$; $p=0,0001$). Comparando o desmatamento nas duas sub-regiões, o polígono médio desmatado na região centro-sul mediu $5,4 \pm 12,6$ ha e 0,7 ha de área mínima e 197,5 ha de área máxima e o polígono médio desmatado na região centro-norte mediu $3,6 \pm 5,4$ ha e 0,7 ha de área mínima e 44,5 ha de área máxima, se diferenciando estatisticamente entre si (Teste T presumindo variâncias diferentes: $t=1,96$; $p=0,0005$)

(Tabela 5).

É importante notar que, em nossa área de estudo como um todo, mesmo em condições atmosféricas não totalmente favoráveis para queimar, é possível fazer a queima de pastagens e roças. Isto pode ser explicado, em parte, por se tratar de material combustível fino, composto por folhas de capim e folhas e ramos finos de vegetação secundária em regeneração de dois a três anos de abandono, em média (p. ex., BARNI et al., 2015a) e que são cortados para o preparo de roças na agricultura familiar. Esses resultados podem ter implicações práticas no desenho de políticas públicas que visem o controle de queimadas e desmatamento ilegal.

Tabela 5: Ocorrência de áreas queimadas e desmatamento considerando as áreas conjuntas dos municípios de Rorainópolis e São Luiz (Rorai_Luiz) e de Caracaraí e Cantá (Cara_Cantá) que intersectam a área de estudo. As letras minúsculas diferentes em negrito e as letras maiúsculas diferentes em negrito denotam diferença significativa no nível de 95% de confiança estatística ($\alpha=0,05$) entre as áreas médias de queimadas e de desmatamento, respectivamente, correspondendo a Rorai_Luiz e a Cara_Cantá, respectivamente.

	Rorai_Luiz		Cara_Cantá		Total	
	Queimadas	Desmatamento	Queimadas	Desmatamento	Queimadas	Desmatamento
Mínimo (ha)	0,7	0,7	0,7	0,7	-	-
Máximo (ha)	69,0	197,5	122,4	44,5	-	-
Média (ha)	3,1a	5,4A	4,6b	3,6B	-	-
D.Pad (ha)	4,9	12,6	9,9	5,4	-	-
Polígonos (n)	1.375	859	765	384	2.140	1.243
Soma (ha)	4.255,1	4.598,6	3.481,9	1.372,8	7.737,0	5.971,4

Fonte: Os autores, 2023.

DISCUSSÃO

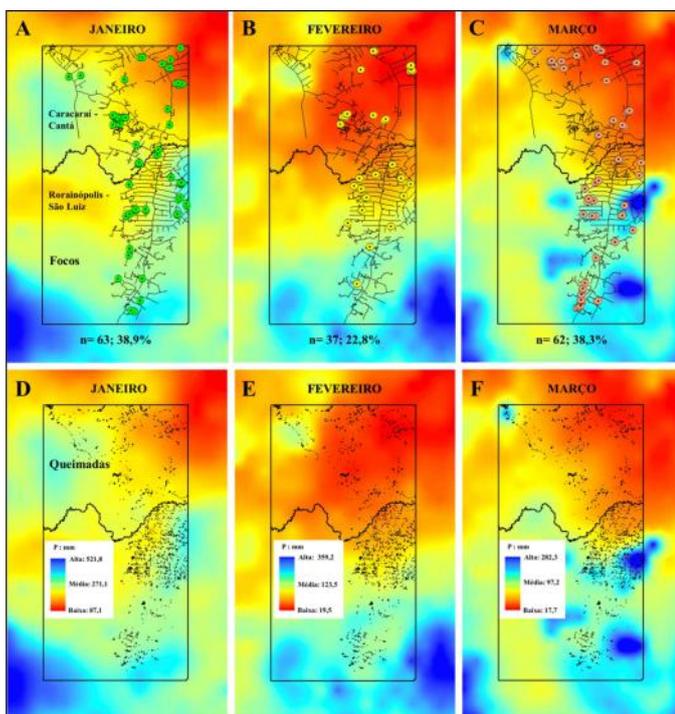
DETECÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS

Ao considerar a simplicidade do método de detecção de queimadas utilizado em nosso trabalho (imagem refletância no canal do infravermelho próximo auxiliado por dados de campo), comparado com outros métodos mais sofisticados, como, por exemplo, o modelo linear de mistura espectral (FERRO et al., 2023; SHIMABUKURO et al., 2020), pode-se afirmar que ele foi efetivo. Por exemplo, enquanto Da Silva et al., (2023) estimaram uma omissão de 30% nas detecções de queimadas no estado do Acre entre 2005 e 2021, considerando focos de calor, os nossos resultados apontam uma omissão em torno de 80%. Isto significa que enquanto o sensor detecta um foco de calor outros quatro estão sendo omitidos.

Esse resultado não considera as sobreposições dos focos de calor detectando uma mesma área de

queimada ou queimadas próximas, dentro do raio de 1 km do centroide do pixel considerado. Este fato foi observado nas ocorrências de focos de calor sobrepondo as duas imagens Sentinel-2 no intervalo entre 26 de janeiro e 20 de março de 2023. Neste caso foram observados pelo menos 36 aglomerados (22,2%) com dois ou mais pontos com distância menor que 1 km entre si. Ou seja, provavelmente, a magnitude de omissão pode ser ainda maior.

Figura 10: Distribuição dos focos de calor (A, B e C) e queimadas para limpeza de pastagens, roças e desmatamento (D, E e F), na área de estudo em função da precipitação pluviométrica acumulada em cada um dos três primeiros meses de 2023. Os mapas foram resultados da krigagem ordinária sobre os dados pontuais de precipitação acumulada do mês considerado. No mês de março foram observados 20 dias de precipitação acumulada.



Fonte: Os autores, 2023.

Outros fatores, como a hora de passagem do satélite e a natureza dos materiais combustíveis podem ajudar a entender essa baixa detecção das queimadas. Por exemplo, o horário de passagem do satélite de referência (AQUA_M-T) em nossa área de estudo no momento das detecções variou entre 17:11 horas às 18:10 horas. Dados estatísticos apontam que o horário de maior intensidade de queimas acontecem nos horários mais quentes do dia, entre as 10:00 horas às 15:00 horas (p. ex., CAMARGO et al., 2015). Devido à natureza do material combustível seco, composto principalmente por folhas mortas de capim e por folhas e galhos finos mortos de vegetação secundária, o fogo consome muito rapidamente esse material sobre o solo e depois de algumas horas o solo

não apresenta temperatura alta o suficiente (>200° C) para sensibilizar os sensores.

DESMATAMENTO E QUEIMADAS

O desmatamento acumulado representa a paisagem sem a floresta onde as classes de uso da terra representam um mosaico predominante por pastagens, roças e floresta secundária (capoeira) em regeneração (p. ex., BARONA et al., 2010). Essas classes de uso são as fontes principais para a ignição dos fogos que penetram as florestas causando incêndios de sub-bosque em anos de secas severas. Esse mecanismo já foi desvendado por pesquisadores (p. ex., ALENCAR et al., 2015; MORTON et al., 2011; ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010; BARNI et al., 2015; FONSECA et al., 2017). No entanto a relativa baixa correlação / sobreposição das áreas queimadas com o desmatamento consolidado (0,5664) até 2022 é explicado pelo fato de que 59,7 km² (43,8%) das queimadas foram referentes a queima de novas áreas de desmatamento da floresta original. Ou seja, essas áreas ainda não faziam parte da paisagem desmatada consolidada, sendo incorporada neste ano de 2023.

É interessante notar que 71,9% (42,9 km²) desse desmatamento foi detectado no município de Rorainópolis. Este município vem apresentando taxas altíssimas e crescentes de desmatamento anual desde 2019, com média anual de 77,4 km² nesses últimos 4 anos, 108,0% superior à média anual de 37,2 km² observada no período de 2008 a 2022 (BRASIL-INPE, 2023). O desmatamento desse período foi tão alto que em 2021 o município foi incluído na lista negra dos municípios que mais desmatam na Amazônia (OLIVEIRA, 2021).

Considerando o desmatamento detectado em Rorainópolis apenas nos primeiros meses de 2023, este foi 15,3% superior à média do desmatamento detectado entre 2008 a 2022 no município. Surpreendentemente, esse desmatamento detectado foi 53,2% maior do que o desmatamento de 28,0 km² detectado pelo Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD) para todo o estado de Roraima no primeiro trimestre de 2023 (G1RR, 2023) e 120,0% superior ao valor de 19,5 km² detectado pelo Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (Deter), para o município de Rorainópolis entre 02 de janeiro a 26 de fevereiro de 2023 (p. ex., G1.COM, 2023; BRASIL-INPE, 2023).

Uma das razões para essa grande discrepância entre as detecções pode ser explicada pela resolução espacial mínima de detecção e pela diversidade de sensores utilizados na tarefa. Por exemplo, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utiliza o limiar de 6,25 ha de área mínima mapeada, independente do instrumento utilizado na detecção (BRASIL-INPE, 2023), enquanto o SAD utiliza a resolução mínima de 1 ha no seu mapeamento do desmatamento, também independente dos sensores utilizados (IMAZON, 2021).

Em nosso estudo utilizamos a resolução espacial de um pixel 10 x 10 m e 0,7 ha (7.000 m²) de área mínima mapeável ou 70 pixels da imagem do Sentinel-2. Essa resolução espacial mínima se justifica pela cultura agrícola praticada por agricultores locais que fazem roças utilizando “linhas” (50 x 50 m) como unidade de medida. Essas roças são, geralmente, abertas em áreas de capoeiras em pousio e áreas de florestas remanescentes e as áreas roçadas / derrubadas variam de uma linha a 4 linhas (2.500 a 10.000 m²), em média (Informação Pessoal).

OCORRÊNCIA E TAMANHO DAS ÁREAS QUEIMADAS / INCENDIADAS NAS IMAGENS

A análise do número de ocorrências de queimadas e de desmatamento e o tamanho das suas respectivas áreas poligonais considerando duas sub-regiões da área de estudo fornecem subsídios importantes para o entendimento da dinâmica de uso da terra nesta importante região produtora de alimentos do estado. A maior área média queimada / incendiada na região centro-norte em relação a região centro-sul pode ser explicada, provavelmente, pela matriz de vegetação aberta, com predominância de ecótonos formados por campina-campinarana, campinarana-floresta ombrófila densa e campinarana-floresta ombrófila aberta (p. ex., BARNI et al., 2016).

Outra explicação para a maior área média queimada na região centro-norte ($4,6 \pm 9,9$ ha) pode ser derivada da predominância de ambientes mais secos observados nos mapas de precipitação referentes aos dias de ocorrência de focos de calor. Esse fato pode ter ocasionado um maior alastramento / escapamento do fogo das áreas desejáveis para a queima para áreas vizinhas / adjacentes, indesejáveis para a queima, se

caracterizando em incêndio. Isto pode ser crível de ter acontecido supondo que as práticas de manejo agrícola sejam semelhantes nas duas sub-regiões, caracterizadas pela forte presença de Projetos de Assentamento do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA (p. ex., BARNI et al., 2012).

Por outro lado, o desmatamento se apresentou de forma contida, tanto em número quanto em área desmatada, em relação a sub-região centro-sul. Provavelmente, a consolidação do desmatamento acumulado nesta região e a relativa pobreza dos solos, em termos nutricionais, denotados pela presença de tipos florestais de dossel mais baixo e abertos (ecótonos) quando comparados com a floresta ombrófila densa, inibiram a abertura de novas áreas para a formação de pastagens e roças por fazendeiros e agricultores familiares assentados nos PA's dessa sub-região.

Embora houvesse uma distribuição rigorosamente igual das ocorrências de focos de calor entre as sub-regiões, sendo 82 focos (50,6%) ocorridos na região centro-norte e 80 focos (49,4%) na região centro-sul, a grande ocorrência de polígonos de queimadas / incêndios e de desmatamento na região centro-sul denotam que esta região apresenta uma fronteira agrícola totalmente ativa e em plena expansão. A explicação para este fato pode ser atribuída a diversos fatores que se entrelaçam e ocorrem simultaneamente no tempo e no espaço.

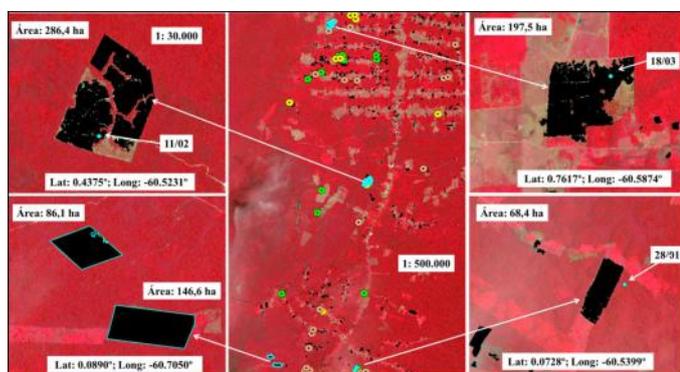
O primeiro fator a ser considerado é o poder de atração de migrantes dessa fronteira. Segundo o último censo, realizado em 2022, o município de Rorainópolis possui 32.647 habitantes (hab.) contra 25.587 hab. em 2010 (BRASIL-IBGE, 2023), projetando uma taxa de crescimento de 2,3% ao ano neste período. Embora o censo não pudesse capturar o movimento migratório dos últimos cinco anos (2018 a 2022) para o município, devido a sua resolução temporal de 10 anos, o fato é que neste período Rorainópolis recebeu uma onda migratória de venezuelanos e, concomitantemente, de migrantes brasileiros vindos, principalmente, de Rondônia para essa região. Neste caso, somente podemos avaliar esse fato por indicadores indiretos, como o aumento do desmatamento, aumento da produção agropecuária, aumento da produção extrativista da

madeira em toras e o aumento da criminalidade praticada na sede municipal (BARNI et al., Submetido). É esperado que todos esses fatores sejam influenciados pelo aumento excessivo da população em um determinado período de tempo (p. ex., BARNI et al., 2015a).

Por exemplo, como já comentado acima, a taxa anual de desmatamento desses últimos cinco anos foi 25,2% acima da taxa histórica observada de 1988 a 2022. Entre 2018 a 2021 o rebanho bovino no município (80.767 cabeças) cresceu 5,73%, semelhante ao crescimento exibido pelo Brasil (5,05%) e 2,4 x maior do que o crescimento de 2,37% registrado para o município de Caracarái (47.766 cabeças) no mesmo período. A Extração Seletiva de Madeira (ESM) em Rorainópolis foi pelo menos 4,2 x (324,7%) maior, em média, no período de 2018 a 2021 (145.235,5 m³) do que no período de 2010 a 2014, que teve uma produção média de 34.200 m³ de madeira em toras (BRASIL-IBGE, 2023). Considerando a sede municipal, o crescimento da criminalidade (10 indicadores) registrado entre 2016 a 2021 (1.444 ocorrências) foi, em média, de 581,1% a mais sobre o período observado (212 ocorrências) entre 2010 a 2015 (BARNI et al., Submetido).

Por fim, talvez, a apresentação dos maiores polígonos individualmente desmatados na área de estudo em 2023 (286,4 ha, 197,5 ha e 146,6 ha) ofereça um indicativo do grau da severidade do desmatamento que é praticado nessa região. Ilustra, também, um pouco da capacidade de destruição da floresta dos atores que estão chegando na região (Figura 11).

Figura 13: Localização dos maiores polígonos desmatados individualmente em 2023 na sub-região centro-sul da área de estudo.



Fonte: Imagem falsa-cor R(8)G(5)B(4) do Sentinel-2 de 21/03/2023.

FOCOS DE CALOR, PRECIPITAÇÃO E DETECÇÃO DE QUEIMADAS

A análise da ocorrência de focos de calor no período de 2010 a 2022 (n=13) foi importante para delimitar as informações referentes às queimadas,

localiza-las no tempo e associar essas informações com a precipitação prevalentes na área em estudo neste período. Embora houvesse dificuldade para a associação em termos matemáticos / estatísticos com a precipitação local, é evidente que as ocorrências de queimadas e, por sua vez, a detecção através das imagens de satélites, são altamente dependentes das condições climáticas. Isso ficou demonstrado nas análises utilizando os mapas de precipitação acumulada nos primeiros três meses de 2023, gerados pela krigagem ordinária e os mapas de precipitação acumulada diariamente nos dias de registro de focos de calor na área de estudo. Estes resultados implicam em melhora nas informações referentes à detecção de queimadas e desmatamento ilegais no estado de Roraima e podem contribuir para o desenho de políticas públicas realistas que buscam mitigar emissões de carbono para a atmosfera.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de detecção de queimadas e desmatamento utilizadas no estudo se mostraram eficientes e de fácil implementação. Isto é importante porque podem ser úteis ao monitoramento da floresta a partir de ferramentas simples de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) sem depender de algoritmos complexos. O estudo apresenta importantes insights para o desenho e a criação de políticas públicas eficientes para o combate e a mitigação do desmatamento e queimadas ilegais na região centro-sul do Estado de Roraima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, A. A.; BRANDO, P. M.; ASNER, G. P.; PUTZ, F. E. Landscape fragmentation, severe drought and the new Amazon forest fire regime. *Ecological Applications*, 25(6): 1493–1505. 2015. <https://doi.org/10.1890/14-1528.1>.
- ALVES, N. O.; HACON, S. S.; GALVÃO, M. F. O.; PEIXOTO, M. S.; ARTAXO, P.; VASCONCELLOS, P. C.; MEDEIROS, S. R. B. Genetic damage of organic matter in the Brazilian Amazon: A comparative study between intense and moderate biomass burning. *Environmental Research*, v. 130, p. 51-58. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.12.011>.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. *Science*, v. 328, n. 5983, 1275-1278. 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1186925>.

- BARONA, E.; RAMANKUTTY, N.; HYMAN, G.; COOMES, O. T. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 5, 024002. 2010. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/5/2/024002/pdf>.
- BARNI, P. E.; FEARNSTIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A. Desmatamento no Sul do Estado de Roraima: padrões de distribuição em função de Projetos de Assentamento do INCRA e da distância das principais rodovias (BR-174 e BR-210). *Acta Amazonica*, 42(2), 183-192. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672012000200003>.
- BARNI, P. E.; FEARNSTIDE, P. M.; GRAÇA P. M. L. A. Simulating deforestation and carbon loss in Amazonia: impacts in Brazil's Roraima state from reconstructing Highway BR-319 (Manaus-Porto Velho). *Environmental Management*, v. 55, n. 2, p. 259-278. 2015a. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-014-0408-6>.
- BARNI, P. E.; PEREIRA, V. B.; MANZI, A. O.; BARBOSA, R. I. Deforestation and forest fires in Roraima and their relationship with phytoclimatic regions in the Northern Brazilian Amazon. *Environmental Management*, 55, 1124–1138, 2015b. <http://rd.springer.com/article/10.1007%2Fs00267-015-0447-7>.
- BARNI, P. E.; MANZI, A. O.; CONDÉ, T. M.; BARBOSA, R. I.; FEARNSTIDE, P. M. Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. *Forest Ecology and Management*, v. 377, p. 170–181. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.010>.
- BARNI P. E.; BARBOSA R. I.; XAUD H. A. M.; XAUD M. R.; FEARNSTIDE P. M. Precipitação no extremo norte da Amazônia: distribuição espacial no estado de Roraima, Brasil. *Sociedade & Natureza*, [S. l.], v. 32, p. 439–456. 2020. <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/52769>.
- BARNI, P. E.; REGO, A. C. M.; SILVA, F. C. F.; LOPES, R. A. S.; XAUD, H. A. M.; XAUD, M. R.; BARBOSA R. I.; FEARNSTIDE, P. M. Logging Amazon forest increased the severity and spread of fires during the 2015-2016 El Niño. *Forest Ecology and Management*, 500, 119652. 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721007428>.
- BRASIL-IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. Disponível em: <<https://ibge.gov.br/cidades-e-estados/rr/>>. Acesso em: 03 jul. 2023.
- BRASIL-INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2023. Plataforma TerraBrasilis: Banco de dados de desmatamento por municípios. Disponível em: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rate. Acesso em: 19 mai. 2023.
- CAMARGOS, V. L.; RIBEIRO, G. A.; DA SILVA, A. F.; MARTINS, S. V.; CARMO, F. M. S. Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta Estacional semidecídua no município de viçosa, minas gerais. *Ciência Florestal*, v. 25, n. 3, p. 537-545. 2015. <https://doi.org/10.5902/1980509819605>.
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies por Geoestatística Linear. In: Druck, S.; Carvalho, M. S.; Câmara, G.; Monteiro, A. V. M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6). 37 p. 2004. <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>.
- COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale, NJ, USA: Erlbaum. Disponível em: <<http://www.utstat.toronto.edu/~brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2023. 1988.
- DA SILVA, S. S.; FEARNSTIDE, P. M.; ANDERSON, L. O.; DE MELO, A. W. F.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; BROWN I. F.; MORELLI, F. Análise de focos de calor e área queimada no estado do Acre. XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2 a 5 de abril de 2023, Florianópolis, SC, Vol. 20: 2979-2982. Art. 156367. Eds. D.F.M. Gherardi, I. Del'Arco Sanchez & L.E.O.C. de Aragão. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP. 2023. <https://proceedings.science/p/164826?lang=pt-br>.
- DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre; Artmed; 3. Ed. 608 p. 2006. ISBN: 9788536306889.
- DENT, B. D.; TORGUSON, J.; HODLER, T.

- Cartography: Thematic Map Design, Second edition. William C. Brown, Dubuque, IA, p. 448. 1990.
- FERNANDES, T. ; HACON, S. S.; NOVAIS, J. W. Z. Mudanças climáticas, poluição do ar e repercussões na saúde humana: revisão sistemática. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 28, p. 111-137, 2021. <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14343/7695>.
- FERRO, P. D.; MEDEIROS, T. P.; DUTRA, D. J.; MATAVELI, G.; ANDERSON, L. O.; PESSÔA, A. C. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARCANJO, J. S. Detecção de áreas queimadas baseado no modelo linear de mistura espectral aplicado em cubo de dados CBERS-4 e CBERS-4a no Oeste de Rondônia, Brasil. XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR). 2 a 5 de abril de 2023, Florianópolis, SC, Eds. D.F.M. Gherardi, I. Del'Arco Sanchez & L.E.O.C. de Aragão Vol. 20: 672-675, art. 155668. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP. 2023. <https://proceedings.science/p/164242?lang=pt-br>.
- FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, v. 18, n. 1. p. 115-146. 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politicohoje/article/view/3852/3156>. Acesso em: 04 jul. 2023.
- FONSECA, M. G.; ANDERSON, L. O.; ARAI, E.; SHIMABUKURO, Y. E.; XAUD, H. A. M.; XAUD, M. R.; MADANI, N.; WAGNER, F. H.; ARAGÃO, L. E. O. C. Climatic and anthropogenic drivers of northern Amazon fires during the 2015-2016 El Niño event. *Ecological Applications*, v. 27, n. 8, p. 2514-2527. 2017. <https://doi.org/10.1002/eap.1628>.
- GALVÃO, M. F. O.; OLIVEIRA A. N.; FERREIRA, P. A.; CAUMO, S.; CASTRO V. P.; ARTAXO, P.; HACON, S. S.; ROUBICEK, D. A.; MEDEIROS, B. S. R. Biomass burning particles in the Brazilian Amazon region: Mutagenic effects of nitro and oxy-PAHs and assessment of health risks. *Environmental Pollution*, v. 233, p. 960-970, 2018. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29031407/>.
- G1RR – RORAIMA. Roraima é o 4º estado que mais desmatou a Amazônia no primeiro trimestre de 2023, aponta Imazon. Disponível em: <https://g1.globo.com/rr/roraima/noticia/2023/04/20/roraima-e-o-4o-estado-que-mais-desmatou-a-amazonia-no-primeiro-trimestre-de-2023-aponta-imazon.ghtml>. Acesso em: 04 jul. 2023. 2023.
- G1.COM. Alertas de desmatamento na Amazônia têm pior fevereiro da série histórica, aponta Inpe. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2023/03/10/alertas-de-desmatamento-na-amazonia-tem-pior-fevereiro-da-serie-historica-aponta-inpe.ghtml>. Acesso em: 04 jul. 2023. 2023.
- IMAZON – Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. Entenda o Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD). Disponível em: <https://amazon.org.br/publicacoes/faq-sad/>. Acesso em: 04 jul. 2023. 2023.
- LAPOLA, D. M.; PINHO, P.; BARLOW, J.; ARAGÃO, L. E. O. C.; BERENQUER, E.; et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*. 2023 Jan 27;379(6630):eabp8622. doi: 10.1126/science.abp8622. Epub 2023 Jan 27. PMID: 36701452.
- MACRITCHIE, K. README: Document for the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) Version 007. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 69p. 2015.
- MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; NAGOL, J.; SOUZA JR., C. M.; KASISCHKE, E. S.; HURTT, G. C.; DUBAYAH, R. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, V. 115, n. 7, p. 1706-1720. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.002>.
- OLIVEIRA, S. Rorainópolis, em RR, entra na lista de municípios com prioridade no controle ao desmatamento na Amazônia. G1, 13 Janeiro de 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/rr/roraima/noticia/2021/01/13/rorainopolis-em-rr-entra-na-listade-municipios-com-prioridade-no-controle-ao-desmatamento-na-amazonia.ghtml>. Acesso em: 07 Jun. 2023. 2021.
- PASSOW M. J. TRMM Tropical rainfall measuring mission: Bringing remote sensing of precipitation into your classroom. TRMM: Trazendo o sensoriamento remoto de precipitação para sua sala de aula. *Terra Didática*, 6(1):03-08. 2010. <https://doi.org/10.20396/td.v6i1.8637477>.
- PEREIRA A. A.; PEREIRA, J. A. A.; MORELLI, F.; BARROS, D. A.; ACERBI JR., F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Validação de focos de calor utilizados no monitoramento orbital de queimadas por meio de imagens TM. *Cerne*, v. 18, 335–343, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000200019>.

QGIS. Quantum Gis. A Free and Open Source Geographic Information System. Disponível em: <<https://timdocs.qgis.org/en/site/forusers/download.html>>. Acesso em: 20 de Mai. de 2023. 2023.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<http://www.R-project.org>>. 2023.

SHIMABUKURO, Y. E.; DUTRA, A. C.; ARAI, E.; DUARTE, V.; CASSOL, H. L. G.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S. Mapping Burned Areas of Mato Grosso State Brazilian Amazon Using Multisensor Datasets. Remote Sensing, v. 12, p. 3827, 2020. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/22/3827>.

SISAM – Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde. Ficha técnica. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/sisam/v2/static/site/files/ficha_tecnica_focos_queima_vegetacao.pdf>. Acesso em: 15 mai de 2023. 2013.

SLOCUM, T. A. Thematic Cartography and Visualization. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 1999.