

Detecção e caracterização de focos de incêndio no Pantanal com o uso de imagens de satélite

Fire and Hot Spot Characterization and Detection in the Pantanal using satellite images

Renata Ribeiro do Valle Gonçalves*, João Victor Gomes Carneiro**, Felipe de Lorenzi***

* Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - Cepagri, Unicamp, renata@cpa.unicamp.br,

** Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - Cepagri, Unicamp, j239738@dac.unicamp.br

*** Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - Cepagri, Unicamp, florenzi@unicamp.br

<https://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99553>

Resumo

O Pantanal, maior planície alagada do mundo, possui uma grande parte de sua área propensa ao fogo, apresentando grandes impactos na distribuição e sobrevivência das espécies da fauna e da flora. Nos últimos anos a seca no Pantanal tem sido mais intensa aumentando a ocorrência dos incêndios sazonais no Bioma. O objetivo desse trabalho foi detectar possíveis focos de incêndio e avaliar as áreas de queimadas no Pantanal por meio do poder radiativo do fogo, em junho e julho de 2020 e em junho e julho de 2024, utilizando imagens de satélite meteorológico GOES-16. Para a detecção e monitoramento dos focos de incêndio em tempo real, utilizou-se o produto de caracterização de focos de incêndio (FCDC) por meio de bandas espectrais do visível e do infravermelho. Foram extraídos os valores do poder radiativo do fogo e área queimada dos focos de incêndios para avaliar a intensidade do incêndio nos anos de 2020 e 2024. Os focos de incêndio selecionados foram apenas os que apresentavam alta possibilidade para fogo, os quais apresentaram em 2020 a área total queimada de 582.664m² com o poder radiativo médio de 43,41MW, e em 2024 a área total queimada de 636.724m² com o poder radiativo médio de 56,17MW. Os dados do satélite GOES-16 são capazes de monitorar a progressão e a propagação do incêndio da vegetação, auxiliando a orientar as tomadas de decisões para a implantação de sistemas de alertas, fornecendo informações de alta qualidade como a localização exata dos focos e a intensidade de um incêndio.

Palavras-chave:

Área queimada, Poder radiativo, Monitoramento, GOES-16.

Abstract

The Pantanal, the world's largest floodplain, is area prone to fire, presenting major impacts on the distribution and survival of fauna and flora species. The recent drought in the Pantanal has been more intense, increasing the occurrence of seasonal fires in the Biome. The objective of this paper is to detect possible fire foci and evaluate the burned areas considering the radiative power of fire

in June-July 2020 and in June-July 2024, using images from the GOES-16 meteorological satellite. For the detection and monitoring fire hot spots in real time, the Fire Detection and Characterization (FCDC) product was used, considering the visible and infrared spectral bands. The values of the radiative power of the fire and the burned area of the fire hot spot were extracted to assess the intensity of the fire in the years 2020 and 2024. The selected fire hot spots were only those which presented a high chance of fire. In 2020 the total burned area was 582,664 m² with an average radiative power of 43.41 MW and in 2024 a total burned area of 636,724 m² and an average radiative power of 56.17 MW. Data from the GOES-16 satellite can monitor the progression and spread of vegetation fires. It helps to guide the decision-making for the implementation of warning systems, providing high-quality information, such as the exact location of the outbreaks and the intensity of a fire.

Keywords:

Burned area, Radiative power, Monitoring, GOES-16.

I. INTRODUÇÃO

Ainda que processos naturais possam ocasionalmente causar queimadas, a prevalência atual de incêndios no Pantanal nos últimos anos, está fortemente ligada às atividades humanas, que são responsáveis pela modificação dos regimes climáticos e do uso e cobertura da terra, e às condições ambientais que exacerbam sua ocorrência e intensidade (Marques et al., 2021). O uso do fogo como ferramenta de gestão da terra no Pantanal e em outros lugares no mundo, é uma prática tradicional, especialmente entre pecuaristas, que remonta a mais de dois séculos. Historicamente, o fogo tem sido empregado como uma ferramenta para remover pragas e doenças, regenerar terras e remover acúmulo indesejado de vegetação (Pelissari et al., 2023; Bayne et al., 2019). No entanto, práticas inadequadas e condições climáticas adversas podem transformar essas queimadas controladas em incêndios de grandes proporções, causando danos significativos ao ecossistema (Libonati et al., 2020).

Em 2020, o Pantanal sofreu sua pior temporada de incêndios registrada, com cerca de 30% do bioma queimado. Esses incêndios chamaram a atenção mundial pelo seu impacto e degradação ambiental, com milhões de animais selvagens mortos e uma vasta área afetada. Aproximadamente quatro milhões de hectares de floresta e savana foram queimados (Libonati et al., 2020; Tomas, 2021; Da Silva Junior et al., 2020). Em 2024, a área queimada no primeiro semestre aumentou 529% em relação à média dos anos anteriores. Junho desse ano concentrou 79% dessa área, sendo a maior já observada no bioma no período (MAPBIOMAS, 2024).

Pesquisadores associaram a intensificação desses eventos as recentes mudanças do clima, como por exemplo, a combinação das ações humanas com seca severa, alta temperatura, perda de umidade do solo e da vegetação. Segundo Lovejoy e Nobre (2018), o desmatamento e o uso generalizado do fogo na Amazônia, estão

alterando o ciclo hidrológico e reduzindo as chuvas em partes da bacia do Prata, afetando assim todo o Pantanal. De acordo com Marengo et al. (2021), o transporte reduzido de ar quente e úmido de verão da Amazônia desde 2019 resultou em uma seca prolongada e severa no Pantanal, consequentemente favorecendo uma extensa ocorrência de incêndios em tal região. Libonati et al. (2022) mostraram que as interações terra-atmosfera, caracterizadas por forte aquecimento atmosférico e grande evaporação, elevaram a temperatura média acima das condições normais e aumentaram o risco de incêndio.

Os incêndios florestais podem destruir vastas extensões de terra, liberando toneladas de aerossóis e gases na atmosfera. A fumaça pode aumentar o risco de doenças respiratórias, afetando populações rurais, indígenas e tradicionais locais. Em 2020, esses incêndios podem ter afetado pelo menos 65 milhões de vertebrados nativos e 4 bilhões de invertebrados, com base nas densidades de espécies conhecidas (Berlinck et al., 2022).

O monitoramento de incêndios é necessário para o planejamento e o manejo do fogo, além de ser essencial para a elaboração de políticas públicas que possam, ao menos, minimizar as causas, os efeitos e as consequências de grandes incêndios como os ocorridos nos últimos anos. Segundo Pelissari et al. (2023) é possível mitigar os incêndios no Pantanal e as mudanças na paisagem do bioma. Somadas às mudanças climáticas, essas ações demandam maior atenção e sensibilidade dos governos brasileiros, bem como novas abordagens de combate a incêndios para garantir a segurança ambiental do bioma. Registrar e monitorar incêndios a partir de observações terrestres é um processo trabalhoso e caro. A detecção de incêndios por meio de imagens de satélite é uma prática essencial no monitoramento ambiental, com baixo custo, permitindo a identificação rápida de focos de calor e a avaliação da extensão das áreas afetadas, mesmo quando os incêndios representam uma pequena fração do pixel do satélite.

Pesquisas de sensoriamento remoto sobre dinâmica de incêndios ativos têm contribuído para a compreensão de incêndios florestais, apesar de geralmente aplicarem dados de baixa resolução espacial. Higa et al. (2022) propuseram uma abordagem baseada em métodos de detecção de objetos para mapear incêndios ativos no Pantanal utilizando imagens do satélite CBERS 4. Shimabukuro et al. (2023) mapearam a extensão da área queimada durante esta crise na porção brasileira do bioma Pantanal usando imagens Sentinel-2 MSI. Li et al. (2020) apresentam que a probabilidade de detecção e caracterização de incêndio utilizando imagens do satélite meteorológico GOES-16 está relacionada ao tamanho do incêndio e ao período temporal. O GOES-16 fornece informações sobre a localização, duração, tamanho, temperatura e potência radiativa de incêndios. É possível usar essas informações para rastrear incêndios em tempo real, fornecendo dados para modelagem da

qualidade do ar e para ajudar a separar o impacto dos incêndios de outras fontes de poluição (Schmidt et al., 2020).

Dados do satélite GOES-16, como produtos provenientes das bandas espectrais do visível e do infravermelho, permitem localizar e recuperar características de incêndios. Esses produtos podem ser utilizados para monitorar incêndios florestais e, mais importante, mudanças rápidas de incêndios individuais, além de serem usados como parte de um arsenal de ferramentas de previsão destinadas a ajudar nos esforços de combate a incêndios. Nesse contexto, objetivo do trabalho foi detectar possíveis focos de incêndio e avaliar as áreas de queimadas no Pantanal por meio do poder radiativo do fogo, em junho e julho de 2020 e em junho e julho de 2024, utilizando imagens de satélite meteorológico GOES-16.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo do trabalho foi o Bioma Pantanal (Figura 1), considerado a maior área úmida tropical do mundo, localizado na porção central da América do Sul e com mais de 84% do seu território atualmente preservado (Libonati et al., 2020). Para fazer o monitoramento das áreas queimadas foram selecionados os anos de 2020 e 2024, anos que mais ocorreram incêndios de grandes extensões no Bioma. De acordo com o Programa de Queimadas do INPE foram 22.116 focos de incêndio em 2020 e 14.498 focos de incêndio em 2024. Foram selecionados os meses de junho e julho de 2020 e junho e julho de 2024 por apresentarem grandes quantidades de focos de incêndio no início da temporada de incêndio no Pantanal.

As imagens utilizadas neste trabalho foram do satélite meteorológico GOES-16, disponíveis no banco de dados do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (Cepagri) da Unicamp. O sensor Advanced Baseline Imager (ABI), a bordo do satélite GOES-16, mede energia em diferentes comprimentos de onda, refletida (visível ao infravermelho próximo, de 0,47 μ m a 2,25 μ m) ou emitida (infravermelho, de 3,9 μ m a 13,3 μ m) da superfície terrestre, é composto por 16 bandas espectrais diferentes, incluindo dois canais visíveis, quatro canais de infravermelho próximo e dez canais de infravermelho. Esses diferentes canais (comprimentos de onda) são usados por modelos e ferramentas para indicar vários elementos na superfície da Terra ou na atmosfera, como, água, nuvens, umidade, fumaça, entre outros. A resolução espacial varia de 0,5 km para o canal do visível a 1km e 2km para os canais do Infravermelho próximo e Infravermelho (>2 μ m), respectivamente.

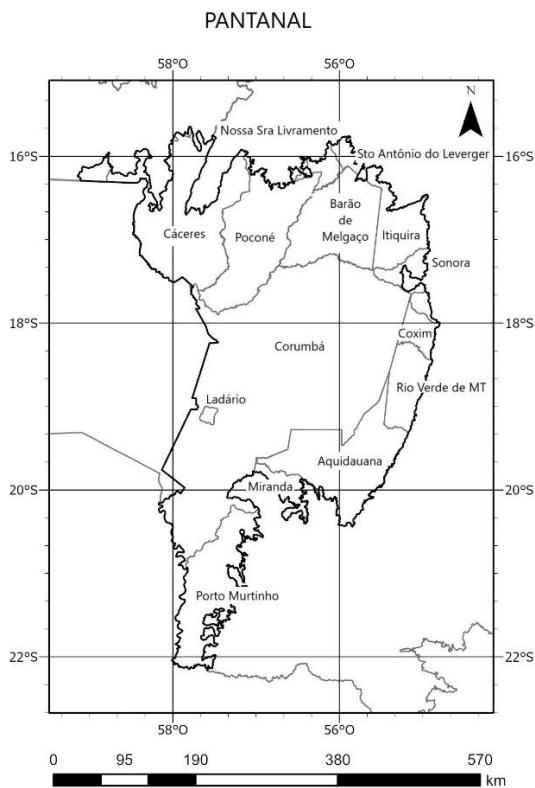


Figura 1 – Área de estudo: Pantanal. Elaboração: os autores (2025).

O satélite GOES-16 fornece um produto de caracterização de incêndio que usa bandas espectrais do visível e do infravermelho para localizar incêndios e recuperar características de incêndio, esse produto é o Fire Detection and Characterization (FDCF), que fornece informações a cada uma hora da localização de focos de incêndio, da área de fogo (m^2) e do poder radiativo de fogo (megawatts - MW), com uma resolução espacial de 2 km pela composição das bandas 2, 7, 13, 14 e 15. Ele é capaz de detectar assinaturas de calor com resolução de tempo e espaço aprimorada, incluindo incêndios menores, em comparação com o imageador GOES anterior. As propriedades dos incêndios podem ser medidas de três maneiras: tamanho (área queimada), temperatura e poder radiativo do fogo.

O FDCF é um produto já processado e disponibilizado pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Esse produto é obtido por um algoritmo, descrito por Schmidt et al. (2020), contextual dinâmico, multiespectral e de limiar que usa a onda curta de 0,64 μm (Canal 2 do ABI, quando disponível durante o dia) e as bandas de 3,9 μm e 11,2 μm (Canais 7 e 14 do ABI) para localizar incêndios e recuperar características de incêndio de subpixel. O Canal 13 (10,3 μm) é usado junto com o Canal 14 quando a temperatura do plano focal do ABI excede um limite definido. O canal 15 (12,3 μm) é usado junto com as bandas mencionadas anteriormente para ajudar a identificar nuvens opacas, mas não é necessário para a execução do algoritmo.

Apenas os canais 7 e 14 são necessários para o algoritmo de incêndios em condições normais. O código usa uma abordagem de duas etapas para identificar e caracterizar incêndios de subpixel. A primeira etapa percorre todos os pixels e identifica pixels de incêndio em potencial, bem como zonas de bloqueio devido à reflexão solar e seleciona tipos de superfície. Esta passagem inicial também caracteriza possíveis pixels de incêndio quando eles atendem a certos critérios. Para cada pixel quente, o algoritmo incorpora dados auxiliares para rastrear alarmes falsos, corrigir a atenuação do vapor de água, emissividade da superfície, refletividade solar e nuvens semitransparentes. O desempenho do produto FDCF é mais forte e complementar em relação ao Landsat, por exemplo, pois detecta mais pixels de fogo com baixas taxas de alarmes falsos (Hall et al., 2023).

As propriedades do fogo calculadas pelo algoritmo (Schmidt et al., 2020) são acopladas entre si, não sendo possível calcular o tamanho instantâneo do fogo sem estimar a temperatura e poder radiativo do fogo, que são em função do tamanho e da temperatura. Os incêndios do produto FDCF se dividem em seis categorias: saturado, processado, nublado, alta possibilidade, média possibilidade e baixa possibilidade. Para o monitoramento dos focos de incêndio nesse trabalho foram selecionados somente as categorias "processado" e "alta possibilidade". As demais categorias apresentaram taxas bastante altas de alarmes falsos para detecção de incêndios (Hall et al., 2023).

O algoritmo utiliza a técnica Dozier para calcular estimativas de subpixel de tamanho e temperatura de incêndio instantâneos (Dozier, 1981; Matson; Dozier, 1981). Os incêndios são tratados como uma única entidade de subpixel de um determinado tamanho, temperatura e potência radiativa, uma aproximação que deve ser feita dadas as limitações fundamentais de recuperação de propriedades de subpixel. A segunda etapa faz um loop sobre todos os pixels de incêndio possíveis identificados na primeira etapa. Limites adicionais são aplicados e detecções de incêndio anteriores são usadas para filtrar alarmes falsos, trocando a detecção precoce por maior confiança de que um incêndio foi detectado.

A partir do produto FDCF, foram extraídos os valores de área (em m²) e poder radiativo (em MW) para cada ponto com foco de incêndio, nas categorias "processado" e "alta possibilidade". Os dados obtidos foram analisados por meio de métodos de estatística básica, incluindo medidas de tendência central (média e mediana), de dispersão (desvio padrão), além da construção de histogramas e gráficos para melhor compreensão da distribuição e variabilidade dos dados.

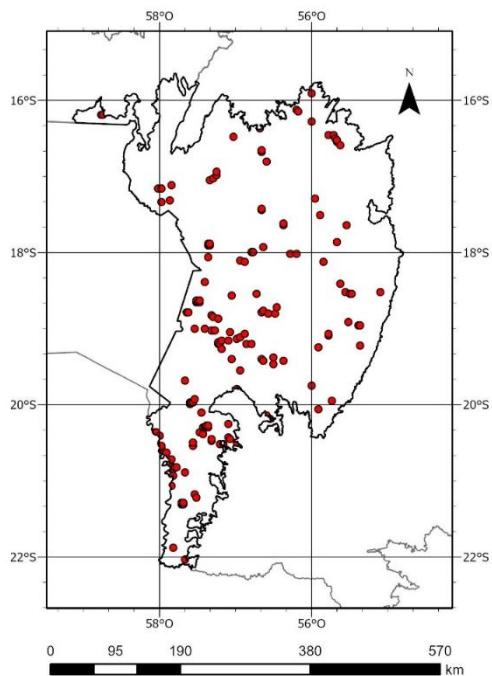
III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meio das imagens do satélite GOES-16 evidenciaram a gravidade dos incêndios que atingiram o Pantanal nos anos de 2020 e 2024. A análise espacial e temporal dos focos de calor, do poder radiativo do fogo e da área queimada permitiu não apenas quantificar a extensão dos impactos, mas também identificar tendências preocupantes que vêm se intensificando ao longo da última década.

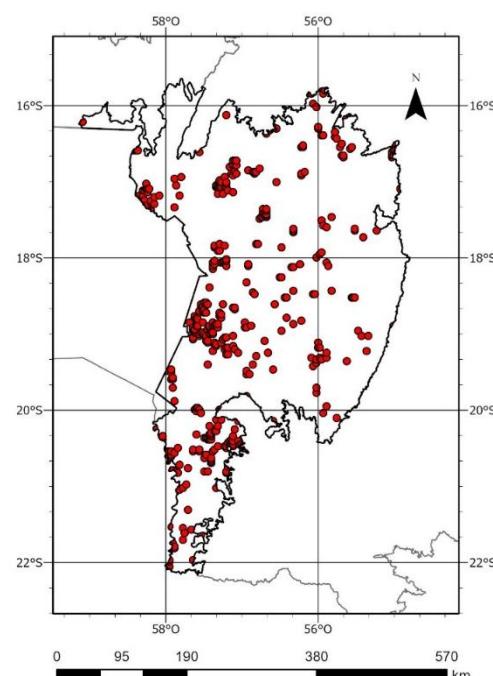
A Figura 2 mostra os focos de incêndio obtidos pelo produto FDCF do GOES-16, com a seleção das categorias processados e alta possibilidade. Essas duas categorias apresentam maior probabilidade para fogo (Hall et al., 2023). Foram utilizadas bandas espectrais do visível e infravermelho (IR) para localizar, detectar os focos de incêndio e recuperar características do incêndio. Os incêndios produzem um sinal mais forte em bandas de infravermelho de onda média (cerca de 4 μm) do que em bandas de infravermelho de onda longa (como 11 μm). A banda 7 (3,9 μm) foi particularmente útil para detecção de incêndio. Seu comprimento de onda mais curto é sensível à parte mais quente de um pixel de incêndio.

A Figura 2 mostra os focos de incêndio acumulados em todo o Bioma Pantanal para os meses de junho (Figura 2A) e julho (Figura 2B) de 2020 e junho (Figura 2C) e julho (Figura 2D) de 2024. Em junho e julho de 2020 foram detectados 1277 focos de incêndio, sendo que em junho e julho de 2024 esse número foi de 995 focos de incêndio. As Figuras 2A, 2B, 2C e 2D mostram essa diferença do número de focos de incêndio acumulado entre 2020 e 2024, anos em que foram registradas grandes áreas queimadas, inclusive em formações florestais, comprometendo a recuperação dos ecossistemas, e deixando-os mais vulneráveis a novos incêndios (MAPBIOMAS, 2024).

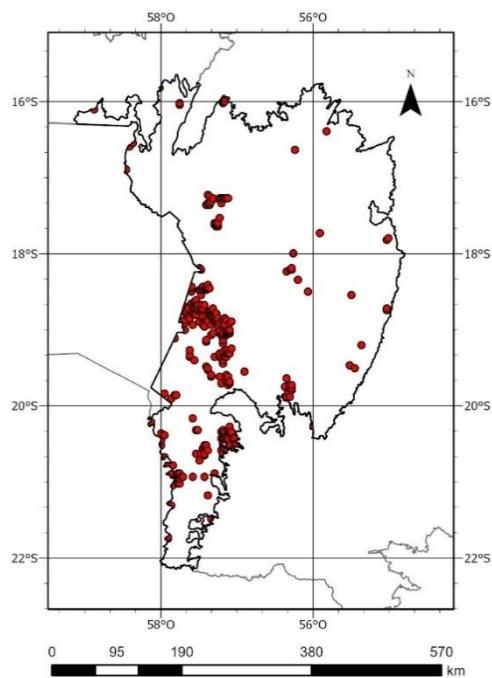
Esses focos de incêndio ilustrados na Figura 2 são de extrema importância para orientar o manejo apropriado do fogo no Bioma e prever a atividade futura de fogo. Segundo Correa et al. (2022) monitorar os focos de incêndio é um primeiro passo para desvendar o papel de fatores antropogênicos, ou seja, mudanças em áreas de uso e ocupação do solo, na formação do regime de fogo no Pantanal. Os incêndios no Pantanal nas últimas duas décadas tenderam a ocorrer com mais frequência em pastagens do que em outros tipos de cobertura vegetal, mas os incêndios de 2020 queimaram preferencialmente regiões florestais. Grandes manchas de fogo são mais frequentes em florestas e pastagens; em contraste, as terras agrícolas apresentam pequenas manchas.



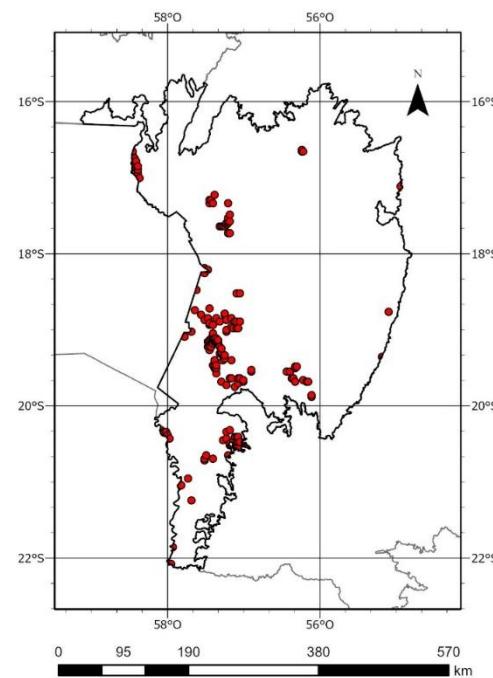
(A) Junho 2020



(B) Julho 2020



(C) Junho de 2024



(D) Julho de 2024

● fdcf

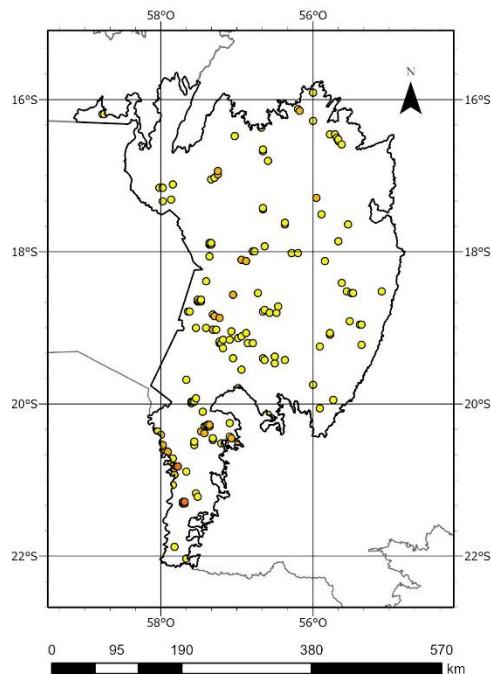
Figura 2 – Pontos de incêndio no Pantanal para os meses de junho e julho de 2020 e 2024. Elaboração: os autores (2025).

Pelissari et al. (2023) analisaram a recuperação da vegetação utilizando a razão de queima normalizada diferenciada no Pantanal brasileiro entre 2001 e 2022; e identificaram áreas prioritárias, onde ocorreram as maiores intensidades de focos de incêndio, a fim de orientar políticas públicas no Brasil para manter a conservação local. O grande incêndio em 2020 está correlacionado com a baixa precipitação em 2019 e as áreas mais vulneráveis a incêndios severos foram os municípios de Cáceres, Poconé e Corumbá. Na Figura 2 é possível identificar grande quantidade os focos de incêndio nesses municípios.

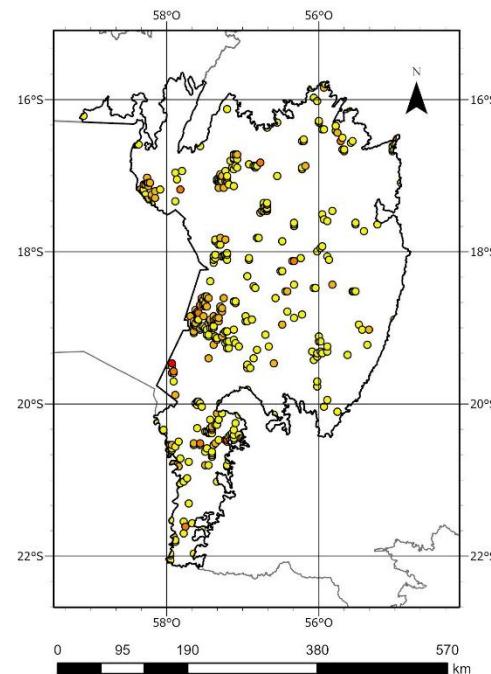
A Figura 3 ilustra o poder radiativo (em megawatts - MW) dos focos de incêndio obtidos pelo produto FDCF do GOES-16 em todo o Bioma Pantanal para os meses de junho (Figura 3A) e julho (Figura 3B) de 2020 e junho (Figura 3C) e julho (Figura 3D) de 2024. O poder radiativo do fogo é uma medida da energia térmica emitida pelo incêndio na forma de radiação eletromagnética, especialmente na faixa do infravermelho em que o satélite consegue captar. Ele representa a taxa instantânea de liberação de energia pelo fogo. Esse dado fornecido pelo satélite, permite calcular a energia total liberada e avaliar o impacto ambiental dos incêndios. Essa abordagem é essencial para a modelagem e mitigação de incêndios, fornecendo informações precisas sobre sua intensidade e propagação do fogo.

Usar e analisar esses dados de poder radiativo é de extrema importância para o monitoramento de incêndios, pois é possível obter a estimativa de emissões, nesse caso o poder radiativo é utilizado para calcular a quantidade de biomassa queimada e as emissões de gases e partículas na atmosfera, como dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO). Pelissari et al. (2023) avaliaram a relação entre focos de incêndio e absorção de carbono; precipitação e fluxo de dióxido de carbono (CO_2); Nobrega e Correia (2025) analisaram as emissões de partículas e gases de incêndios florestais na Amazônia Meridional, de 2020 a 2022, a partir de recuperações de energia radiativa de fogo do GOES-16. Os resultados obtidos aumentaram a compreensão dos incêndios florestais na Amazônia, seus fluxos de emissão e implicações ambientais, contribuindo com insights valiosos para o complexo ecossistema da Bacia Amazônica.

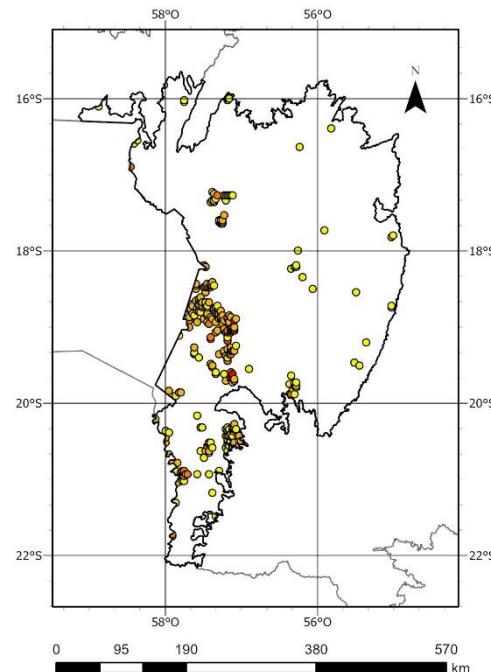
Segundo Monteiro dos Santos et al. (2024) a temporada de incêndios sem precedentes de 2020 no Pantanal, resultou em impactos locais bem relatados no ecossistema, na economia e na saúde. O estudo mostrou os riscos em cascata de perigos associados aos eventos de incêndios vinculando o transporte de fumaça, a piora da qualidade do ar e os impactos à saúde no estado de São Paulo, na região Sudeste do Brasil e na maior megacidade da África do Sul localizada a aproximadamente 1.500 km do Pantanal. Integrando modelos, dados observacionais e baseados em satélite foi possível identificar que episódios de poluição do ar induzida pela fumaça coincidiram com ondas de calor generalizadas, amplificando os riscos à saúde.



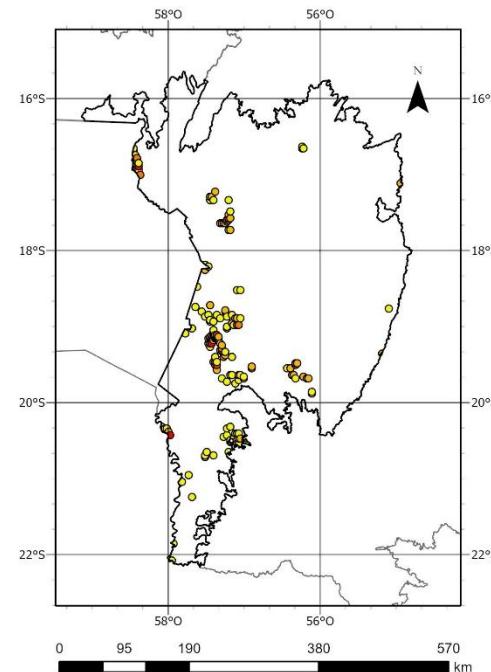
(A) Poder radiativo – Junho 2020



(B) Poder radiativo – Julho de 2020



(C) Poder radiativo – Junho 2024



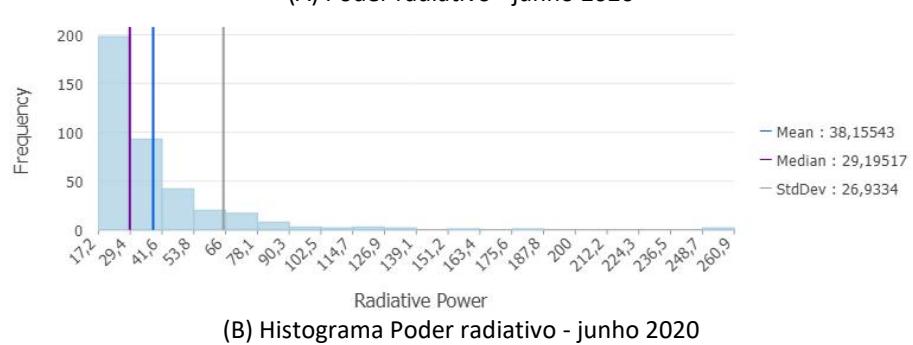
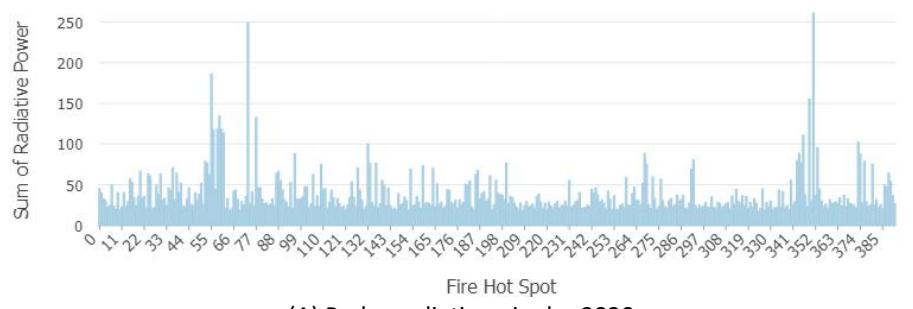
(D) Poder radiativo – Julho de 2024

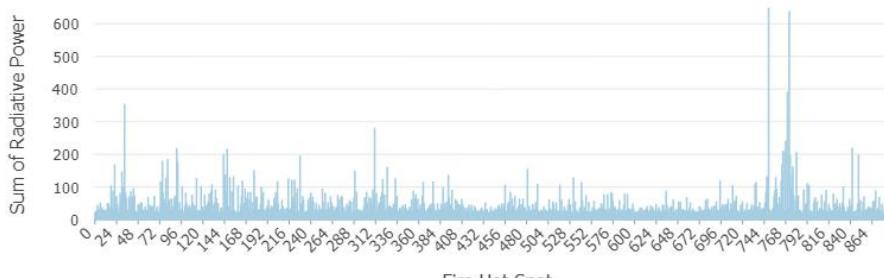
● 17.00 - 50,00 ● 50,00 - 100,00 ● 100,00- 150,00 ● 150,00 - 200,00 ● 200,00 - 650,00

Figura 3 – Poder radiativo (MW) do fogo no Pantanal para os meses de junho e julho de 2020 e 2024. Elaboração: os autores (2025).

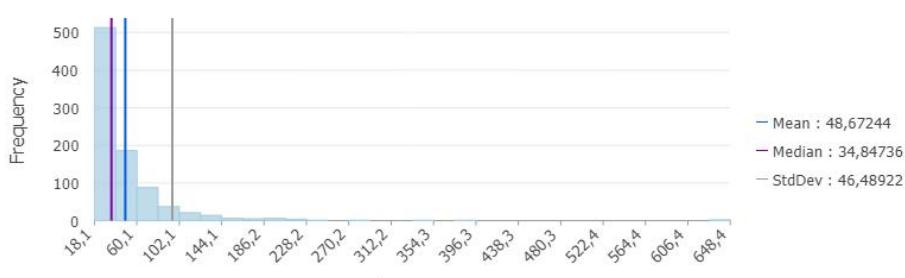
Pereira et al. (2010) utilizaram a energia radiativa do fogo provenientes do sensor MODIS e do GOES para estimar as emissões de monóxido de carbono (CO) e de material particulado com diâmetro menor que 2,5 μm para o período de queimadas de 2002 na América do Sul. Essa estimativa das emissões dos gases do efeito estufa provenientes da queima de biomassa é necessária para inventários anuais e sua estimativa a partir de dados derivados dos satélites ambientais é de fundamental importância para a modelagem do tempo e clima.

A Figura 4 mostra a distribuição dos valores e os histogramas de poder radiativo do fogo no Pantanal para os meses de junho (Figura 4A e B) e julho (Figura 4C e D) de 2020 e junho (Figura 4E e F) e julho (Figura 4G e H) de 2024. Os resultados mostraram um poder radiativo médio por foco de incêndio de 38,15MW em junho de 2020, 48,67MW em julho de 2020, 57,57MW em junho de 2024 e 54,77MW em julho de 2024. Os resultados mostraram um poder radiativo máximo por foco de incêndio de 260,90MW em junho de 2020, 648,40MW em julho de 2020, 561,90MW em junho de 2024 e 395,60MW em julho de 2024. Classificar a Intensidade do Incêndio é primordial para entender a severidade dos incêndios. Incêndios com valores elevados de poder radiativo indicam eventos mais severos e de rápida propagação. A Tabela 1 mostra o poder radiativo do fogo para os municípios mais atingido pelo fogo nos meses de junho e julho de 2020 e 2024.

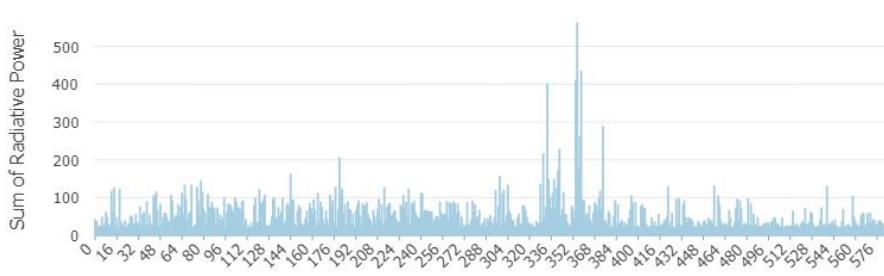




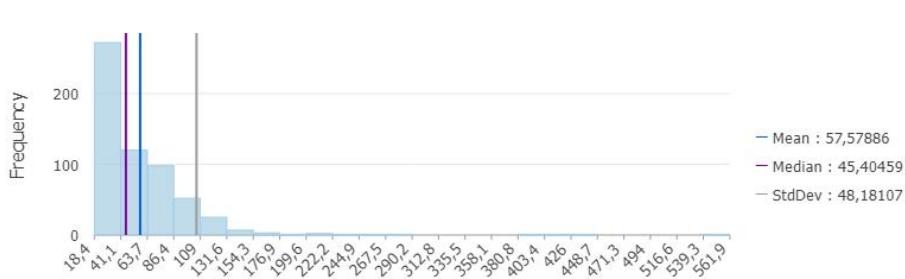
(C) Poder radiativo - julho 2020



(D) Histograma Poder radiativo - julho 2020



(E) Poder radiativo - junho 2024



(F) Histograma Poder radiativo - junho 2024

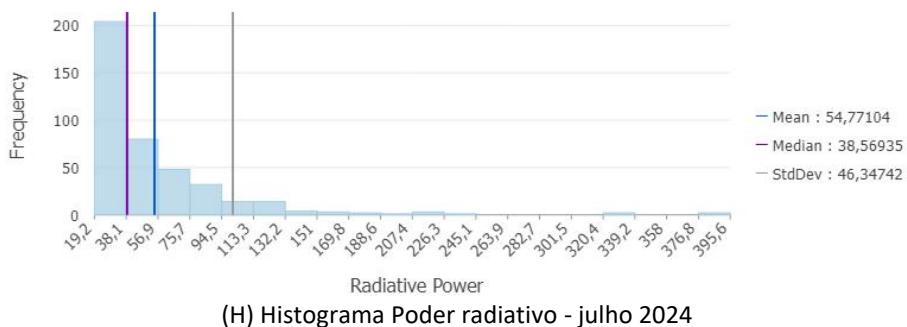
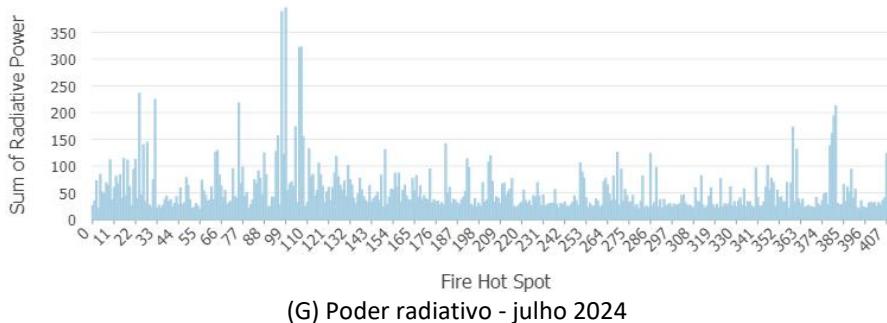
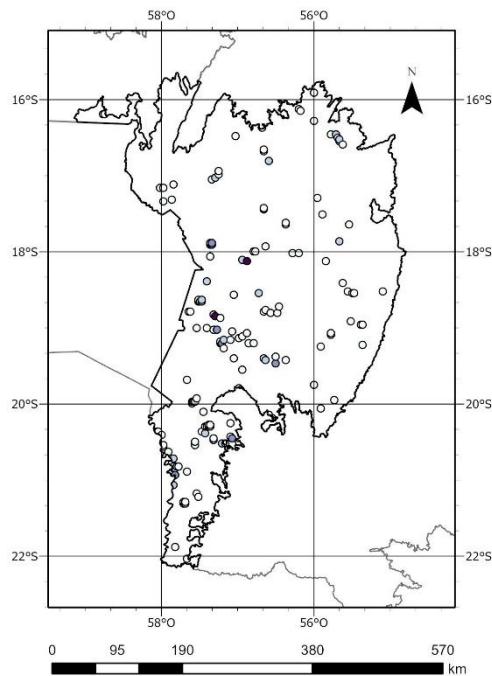


Figura 4 – Distribuição dos valores e histogramas do poder radiativo (MW) do fogo no Pantanal para os meses de junho e julho de 2020 e 2024.
 Elaboração: os autores (2025).

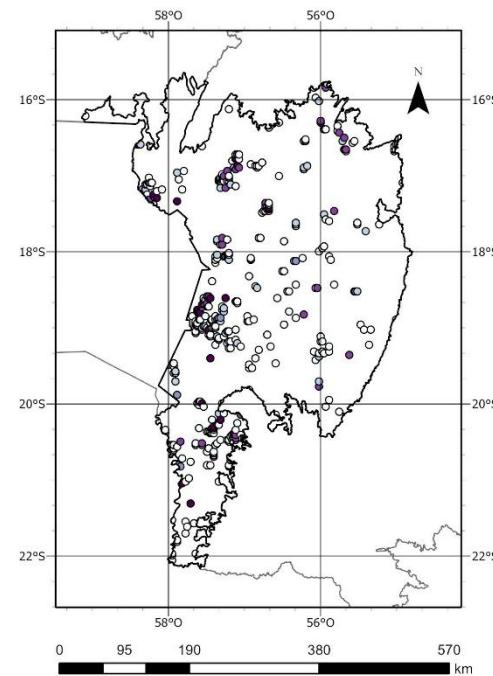
Tabela 1 – Poder radiativo (MW) do fogo dos municípios.

| Município | Poder Radiativo jun/20 | Poder Radiativo jul/20 | Poder Radiativo jun/24 | Poder Radiativo jul/24 |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Cáceres | 27,05 | 68,76 | 44,82 | 70,41 |
| Corumbá | 38,56 | 48,75 | 79,93 | 75,90 |
| Poconé | 36,37 | 51,75 | 51,58 | 62,07 |
| Porto Murtinho | 56,11 | 44,60 | 52,58 | 36,70 |

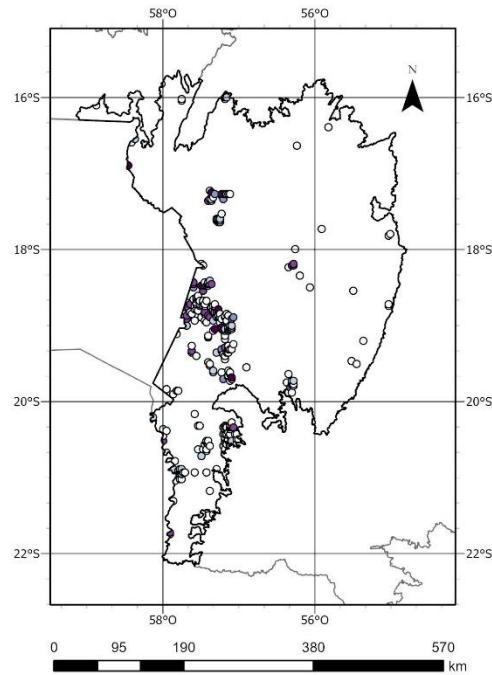
A Figura 5 apresenta a área (em m²) dos focos de incêndio obtidos pelo produto FDCF do GOES-16 em todo o Bioma Pantanal para os meses de junho (Figura 5A) e julho (Figura 5B) de 2020 e junho (Figura 5C) e julho (Figura 5D) de 2024. Os incêndios florestais geralmente queimam muito intensamente e podem durar de vários dias a meses, sendo importante mapear e quantificar a área total queimada. Os dados do GOES-16 têm um ótimo desempenho na quantificação da área atingida pelos incêndios e fornece informações críticas sobre incêndios para supressão e evacuação de incêndios ativos globalmente, detectando operacionalmente incêndios em todos os continentes da América com uma resolução espaço-temporal sem precedentes (Li et al., 2020).



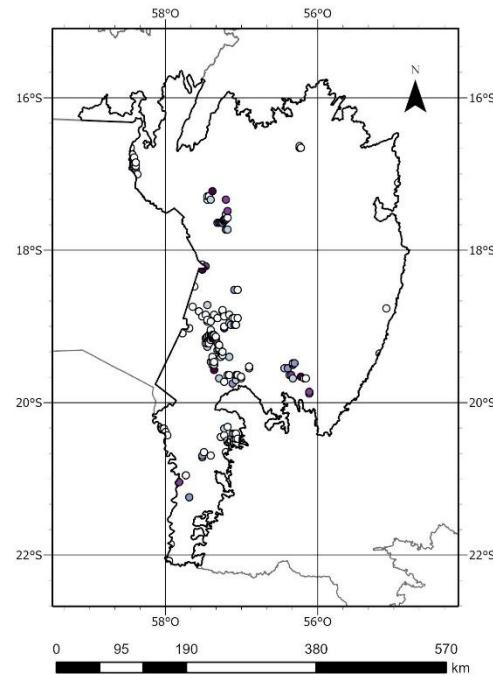
(A) Área – Junho 2020



(B) Área – Julho de 2020



(C) Área – Junho 2024

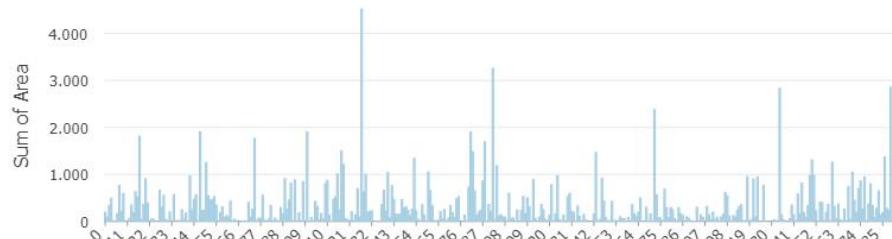


(D) Área – Julho de 2024

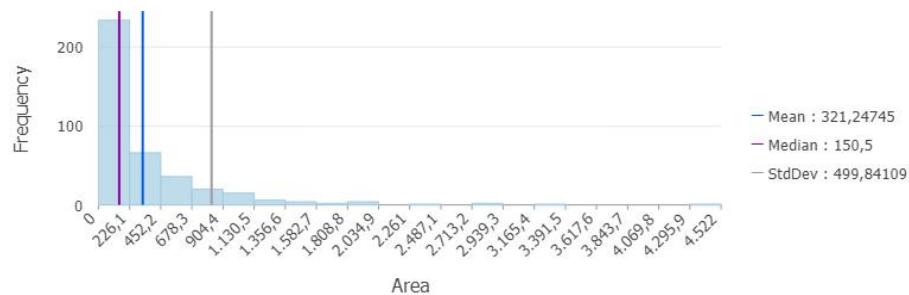
○ 0 - 500 ○ 501 - 1000 ○ 1001 - 1500 ● 1501 - 3000 ● 3001 - 6000

Figura 5 – Área (m²) do fogo no Pantanal para os meses de junho e julho de 2020 e 2024. Elaboração: os autores (2025).

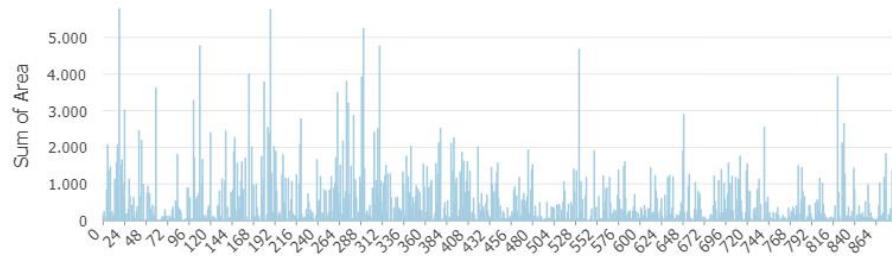
A Figura 6 mostra a distribuição dos valores e os histogramas de área do fogo no Pantanal para os meses de junho (Figura 6A e B) e julho (Figura 6C e D) de 2020 e junho (Figura 6E e F) e julho (Figura 6G e H) de 2024. Os resultados mostraram uma área média por foco de incêndio de 231,24m² em junho de 2020, 515,50m² em julho de 2020, 622,92m² em junho de 2024 e 661,14m² em julho de 2024. Mostraram valores de área máxima por foco de incêndio de 4.522m² em junho de 2020, 5.777m² em julho de 2020, 5.363m² em junho de 2024 e 6.060m² em julho de 2024. O total de área queimada foi 125.929m² em junho de 2020, 456.735m² em julho de 2020, 365.654m² em junho de 2024 e 271.070m² em julho de 2024. A Tabela 2 mostra as áreas de queimada para os municípios mais atingidos pelo fogo nos meses de junho e julho de 2020 e 2024.



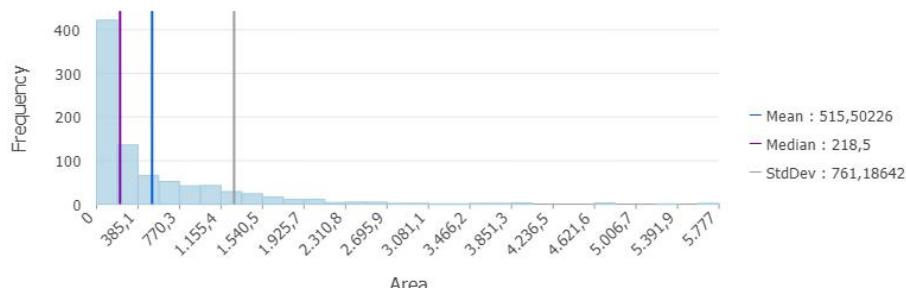
(A) Área - junho 2020



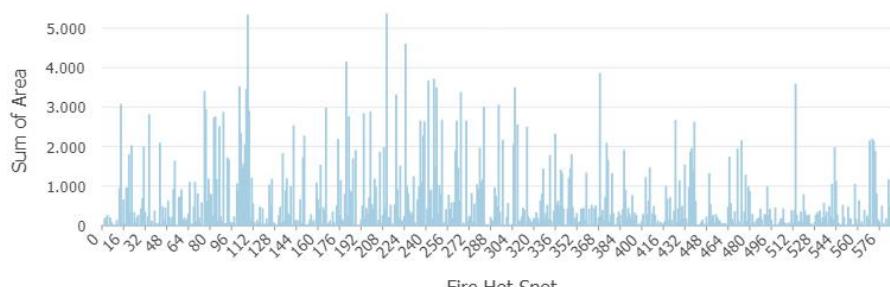
(B) Histograma área - junho 2020



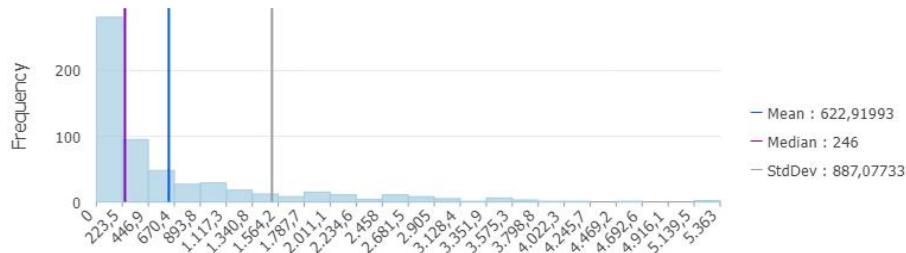
(C) Área - julho 2020



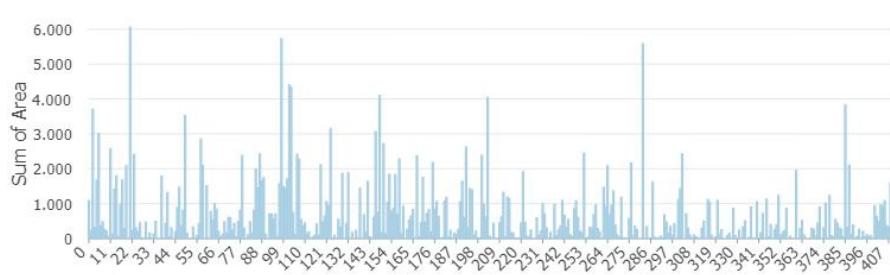
(D) Histograma área - julho 2020



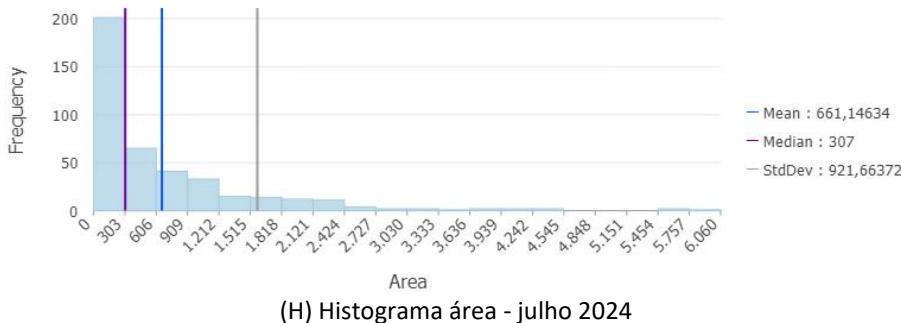
(E) Área - junho 2024



(F) Histograma área - junho 2024



(G) Área - julho 2024



(H) Histograma área - julho 2024

Figura 6 – Distribuição dos valores de área (m^2) do fogo no Pantanal para os meses de junho e julho de 2020 e 2024. Elaboração: os autores (2025).

Tabela 2 – Área (m^2) queimada dos municípios.

| Município | Área jun/20 | Área jul/20 | Área jun/24 | Área jul/24 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cáceres | 1.758 | 29.981 | 31.080 | 29.773 |
| Corumbá | 43.186 | 180.139 | 191.794 | 92.247 |
| Poconé | 4.386 | 53.939 | 31.527 | 32.785 |
| Porto Murtinho | 11.157 | 36.821 | 37.766 | 33.634 |

De acordo com Feron et al. (2024), a América do Sul está sofrendo impactos severos das mudanças climáticas, embora o aquecimento do subcontinente siga de perto a trajetória global, o aumento das temperaturas, seca e alto risco de incêndio tem sido mais pronunciado em algumas regiões, incluindo o norte da Amazônia e parte do Pantanal. A temperatura da superfície do Oceano Pacífico tropical modula a variabilidade interanual de compostos secos na América do Sul. Enquanto o El Niño aumenta o risco de incêndio no norte da Amazônia, os extremos secos no Pantanal parecem ser mais responsivos ao La Niña. Thielen et al. (2020) e Thielen et al. (2021) também mostraram que eventos de seca severa e prolongada estão se tornando mais frequentes no Pantanal e nas áreas vizinhas, como o Cerrado e a Amazônia, levando à intensificação do risco de incêndio e à extensão das áreas propensas a incêndios do Pantanal para áreas historicamente inundadas.

A seca severa no Pantanal está ocorrendo desde 2018, e foi o bioma que mais secou ao longo da série histórica do MapBiomas Água (2024), que cobre o período entre 1985 e 2023. A superfície de água anual (pelo menos 6 meses com água) em 2023 foi de 382 mil hectares – 61% abaixo da média histórica. Somente 2,6% do bioma estava coberto por água e foi 50% mais seco que 2018, que foi a última grande cheia no bioma. Isso explica a maior intensidade do fogo no Pantanal em 2024 com uma área total queimada de 636.724m² com o poder radiativo médio de 56,17MW contra uma área total de 582.664m² com o poder radiativo médio de

43,41MW em 2020. O município de Corumbá foi o mais atingido em 2024, em junho teve 191.794m² de sua área queimada com poder radiativo de 79,93MW.

IV. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a eficácia da utilização do satélite meteorológico GOES-16 no monitoramento e caracterização de incêndios no Bioma Pantanal. A análise dos meses de junho e julho dos anos de 2020 e 2024 mostrou não apenas a localização exata dos focos de calor, mas também permitiu mensurar o poder radiativo do fogo e a área queimada com alto grau de precisão e detalhamento. Em 2024, observou-se um aumento considerável na severidade dos incêndios, refletido tanto no poder radiativo médio (56,17 MW contra 43,41 MW em 2020) quanto na área total queimada (636.724 m² frente a 582.664 m² em 2020).

Esses dados demonstram que os incêndios de 2024 foram mais intensos e potencialmente mais destrutivos, resultado de uma combinação de fatores como a persistente seca, alterações climáticas, e práticas humanas inadequadas no manejo do fogo. A utilização do produto FDCF derivado do GOES-16 mostrou-se essencial para a detecção precoce, acompanhamento em tempo real e análise detalhada da dinâmica dos incêndios, subsidiando ações de resposta e formulação de políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos ambientais e sociais.

Dessa forma, reforça-se a importância de sistemas de alerta baseados em sensoriamento remoto como ferramenta estratégica para gestão de riscos e conservação do Pantanal, especialmente diante do agravamento das mudanças climáticas e da crescente vulnerabilidade do bioma a eventos extremos de fogo.

Agradecimentos

Pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho, agradeço ao Brazilian Institute of Data Science (BIOS).

V. REFERÊNCIAS

- BAYNE, K. M. et al. Fire as a land management tool: rural sector perceptions of burn-off practice in New Zealand. *Rangeland Ecology & Management*, v. 72, n. 3, p. 523–532, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2018.12.001>.
- BERLINCK, C. N. et al. The Pantanal is on fire and only a sustainable agenda can save the largest wetland in the world. *Brazilian Journal of Biology*, v. 82, e244200, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.244200>.
- CORREA, D. B. et al. Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. *Science of The Total Environment*, v. 835, 155386, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155386>.

DA SILVA JUNIOR, C. A. et al. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. *Scientific Reports*, v. 10, 16246, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>.

DOZIER, J. A method for satellite identification of surface temperature fields in subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, v. 11, p. 221–229, 1981.

FERON, S. et al. South America is becoming warmer, drier, and more flammable. *Communications Earth & Environment*, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01654-7>.

HALL, J. V. et al. Geostationary active fire products validation: GOES-17 ABI, GOES-16 ABI, and Himawari AHI. *International Journal of Remote Sensing*, v. 44, n. 10, p. 3174–3193, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2217983>.

HIGA, L. et al. Active fire mapping on Brazilian Pantanal based on deep learning and CBERS 04A imagery. *Remote Sensing*, v. 14, n. 3, 688, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14030688>.

LI, F. et al. A preliminary evaluation of GOES-16 active fire product using Landsat-8 and VIIRS active fire data, and ground-based prescribed fire records. *Remote Sensing of Environment*, v. 237, 111600, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111600>.

LIBONATI, R. et al. Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands. *Nature*, v. 588, n. 7837, p. 217–219, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03464-1>.

LIBONATI, R. et al. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point. *Science Advances*, v. 4, n. 2, p. eaat2340, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>.

MAPBIOMAS ÁGUAS. Coleção 3: Panorama da superfície de água do Brasil 1985–2023. 2024.

MAPBIOMAS. Nota técnica: contexto hídrico no Pantanal e impactos nos incêndios de 2024. 2024.

MARENGO, J. A. et al. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>.

MARQUES, J. F. et al. Fires dynamics in the Pantanal: impacts of anthropogenic activities and climate change. *Journal of Environmental Management*, v. 299, 113586, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113586>.

MATSON, M.; DOZIER, J. Identification of subresolution high temperature sources using the thermal IR. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 47, p. 1311–1318, 1981.

MONTEIRO DOS SANTOS, D. et al. Compound dry-hot-fire events connecting Central and Southeastern South America: an unapparent and deadly ripple effect. *npj Natural Hazards*, v. 1, p. 32, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00031-w>.

NETO, J. B. F. et al. Bioclimatic zoning of the Pantanal. *RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 61, n. 1, p. 173–191, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v61i1.97357>.

NÓBREGA, T. F.; CORREIA, A. L. Emissões de partículas e gases de incêndios florestais na Amazônia Meridional, de 2020 a 2022, a partir de recuperações de energia radiativa de fogo do GOES-16. *ACS ES&T Air*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00209>.

PELISSARI, T. D. et al. Dynamics of major environmental disasters involving fire in the Brazilian Pantanal. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 1–18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49154-6>.

PEREIRA, G. et al. O uso da energia radiativa do fogo para estimar as emissões de queimadas para a América do Sul. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, n. 2, p. 155–164, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000200001>.

SCHMIDT, C. C. et al. GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) algorithm theoretical basis document for fire / hot spot characterization. NOAA NESDIS Center for Satellite Applications and Research, p. 73, 2020.

SHIMABUKURO, Y. E. et al. Assessment of burned areas during the Pantanal fire crisis in 2020 using Sentinel-2 images. *Fire*, v. 6, n. 7, 277, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6070277>.

THIELEN, D. et al. The Pantanal under siege—On the origin, dynamics and forecast of the megadrought severely affecting the largest wetland in the world. *Water*, v. 13, 3034, 2021.

THIELEN, D. et al. Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. *PLoS ONE*, v. 15, e0227437, 2020.

TOMAS, W. M.; BERLINCK, C. N.; CHIARAVALLOTTI, R. M. et al. Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. *Scientific Reports*, v. 11, 23547, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02844-5>.