



EMISSÕES DE CO E CH₄ DURANTE INCÊNDIOS EXTREMOS NO PANTANAL

Emissions of CO and CH₄ during Extreme Wildfires in the Pantanal

Emisiones de CO y CH₄ durante Incendios Extremos en el Pantanal

João Batista Ferreira Neto  

Universidade de São Paulo - USP

joao.geo@usp.br

Rosa Helena da Silva  

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

rosa.helena@ufms.br

Gabriel Pereira  

Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ

pereira@ufs.edu.br

Geraldo Damasceno Junior  

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

geraldodamasceno@gmail.com

Resumo: O bioma do Pantanal, que representa a maior área alagada contínua do mundo, enfrentou uma seca prolongada que teve início em 2019 e atingiu seu ápice em 2020. Essa condição propiciou a ocorrência de desastres naturais, culminando na crise de incêndios no Pantanal em 2020. Os incêndios emitem grandes quantidades de gases e partículas, sendo essas emissões reconhecidas como influentes na composição química da atmosfera e no sistema climático global. Portanto, este estudo, empregando técnicas de sensoriamento remoto, investiga de maneira qualitativa e quantitativa a distribuição espacial e a tendência de monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄) antes, durante e após os eventos de incêndio no Parque Estadual Pantanal do Rio Negro, localizado no estado de Mato Grosso do Sul, bioma Pantanal. Os resultados destacaram um aumento significativo na concentração desses gases na atmosfera, além de revelar informações sobre sua distribuição espacial e os padrões de queima observados na região.

Palavras-chave: Impacto ambiental. Mudanças climáticas. Sentinel 5-P. TROPOMI. GEE.

Abstract The Pantanal biome, representing the world's largest continuous floodplain, experienced a prolonged drought commencing in 2019 and intensifying in 2020. This condition led to natural disasters, culminating in the Pantanal wildfire crisis in 2020. Wildfires emit large quantities of gases and particles, with these emissions recognized as influential in the chemical composition of the atmosphere and the global climate system. Therefore, this study, employing remote sensing techniques, qualitatively and quantitatively investigates the spatial distribution and trends of carbon monoxide (CO) and methane (CH₄) before, during, and after wildfire events in the Pantanal do Rio Negro State Park, located in the state of Mato Grosso do Sul, Pantanal biome. The results highlighted a significant increase in the concentration of these gases in the atmosphere, as well as providing insights into their spatial distribution and pyrogeographic patterns in the region.

Keywords: Environmental impact. Climate change. Sentinel-5P. TROPOMI. Greenhouse gas emissions.

Resumen: El bioma del Pantanal, que representa la mayor área inundada continua del mundo, enfrentó una sequía prolongada que comenzó en 2019 y alcanzó su punto máximo en 2020. Esta condición propició la ocurrencia de desastres naturales, culminando en la crisis de incendios en el Pantanal en 2020. Los incendios emiten grandes cantidades de gases y partículas, siendo estas emisiones reconocidas como influyentes en la composición química de la atmósfera y en el sistema climático global. Por lo tanto, este estudio, empleando técnicas de teledetección, investiga de manera cualitativa y cuantitativa la distribución espacial y la tendencia del monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄) antes, durante y después de los eventos de incendio en el Parque Estatal Pantanal del Río Negro, ubicado en el estado de Mato Grosso del Sur, bioma Pantanal. Los resultados destacaron un aumento significativo en la concentración de estos gases en la atmósfera, además de revelar información sobre su distribución espacial y los patrones de quema observados en la región.

Palabras clave: Impacto ambiental. Cambio climático. Sentinel-5P. TROPOMI. Gases de efecto invernadero.

Submetido em: 10/02/2024

Aceito para publicação em: 10/07/2024

Publicado em: 19/07/2024

1. INTRODUÇÃO

O Pantanal, situado no centro da América do Sul, destaca-se como a maior área alagada tropical do mundo. O Pantanal é dividido em várias sub-regiões¹, cada uma com características ecológicas, hidrológicas e geográficas distintas. Essas sub-regiões têm regimes de inundações diferentes, dependendo da localização, topografia e dos rios que as alimentam. Por exemplo, a sub-região de Cáceres, localizada no noroeste do Pantanal, próximo à cidade de Cáceres, é conhecida por suas áreas alagadas permanentes. Já a sub-região da Nhecolândia tem o período de cheias geralmente entre os meses de novembro e março, coincidindo com a estação chuvosa (SILVA; ABDON, 1998). Reconhecidas como hotspots de biodiversidade, essas áreas alagadas, desempenham um papel crucial na oferta de serviços ecossistêmicos essenciais para a manutenção da paisagem natural ou construída. No entanto, sua vulnerabilidade às perturbações causadas pela atividade humana e às mudanças climáticas representa uma ameaça crescente (KEDDY et al., 2009).

Influenciado pela Monção de Verão da América do Sul, o Pantanal enfrentou desde o início de 2019 uma prolongada escassez de chuvas, intensificada em 2020, contrariando seu ciclo sazonal de inundação e seca. Em 2020 a precipitação anual estimada no Pantanal foi a mais baixa desde a década de 1980, resultando em uma superfície de água 34% menor que a média (Mataveliet al., al. 2021).

Nesse mesmo período foi observado uma associação entre essa escassez de chuva com a presença de intensas ondas de calor marinhas no nordeste do Oceano Pacífico (FERREIRA BARBOSA et al., 2022). Essa condição resultou na formação de um ambiente mais seco, aumentando a disponibilidade de material combustível e, conseqüentemente, elevando o potencial de ocorrência de incêndios.

Aproximadamente 40.000 km² de vegetação natural foram afetados durante os incêndios de 2020 (LIBONATI et al., 2020), incluindo áreas de conservação e terras indígenas (MATAVELI et al., 2021). 17 milhões de vertebrados foram mortos diretamente por esses incêndios (TOMAS et al., 2021). O custo estimado para a restauração pós-incêndio das áreas queimadas foi de cerca de 123 milhões de dólares (MARTINS et al., 2022).

¹ O Pantanal é subdividido em 11 sub-regiões principais: Cáceres, Poconé, Barão de Melgaço, Paraguai, Paiaguás, Nhecolândia, Abobral, Aquidauana, Miranda, Nabileque e Porto Murinho.

Os incêndios também geram preocupação quanto à emissão dos gases de efeito estufa e aerossóis que influenciam significativamente o clima (TOSCA et al., 2013). Como o Dióxido de Carbono (CO₂) é essencial no processo respiratório das plantas e amplamente armazenado nelas, durante os incêndios, a biomassa queimada acaba liberando esse carbono previamente armazenado nas plantas. As emissões oriundas da queima de biomassa têm sido estimadas convencionalmente usando conhecimentos sobre área queimada, carga de combustível, coeficiente de combustão e fatores de emissão desde a década de 1980 (Seiler and Crutzen 1980, VAN DER WERF et al., 2017, SILVA et al., 2023).

Quando ocorre um incêndio, o monóxido de carbono (CO) e o metano (CH₄) são liberados na atmosfera como subprodutos da combustão incompleta de materiais orgânicos. O CO é formado devido à falta de oxigênio durante a queima, enquanto o metano é liberado quando a matéria orgânica rica em carbono, como plantas e resíduos animais, se decompõe e é aquecida (VIDOT et al., 2012).

Já o metano é liberado através da decomposição térmica de materiais orgânicos ricos em carbono, como plantas, resíduos vegetais e turfa, durante a combustão. O calor intenso do fogo quebra as moléculas de matéria orgânica, liberando metano armazenado nos tecidos vegetais e no solo. Além disso, a queima incompleta de biomassa durante o incêndio também pode resultar na formação de metano como um subproduto da combustão, contribuindo para a emissão desse potente gás de efeito estufa na atmosfera (VIDOT et al., 2012).

Tanto o CO e o CH₄ possuem uma banda de absorção específica na região do Infravermelho de Onda Curta (SWIR), entre 2.305 μm e 2.385 μm. O SWIR está situado entre o infravermelho próximo e o infravermelho médio, especificamente entre 1,4 μm e 3 μm. Portanto, ao medir a quantidade de radiação nessa faixa espectral, é possível inferir a presença e a densidade do CO e CH₄ na atmosfera (VIDOT et al., 2012).

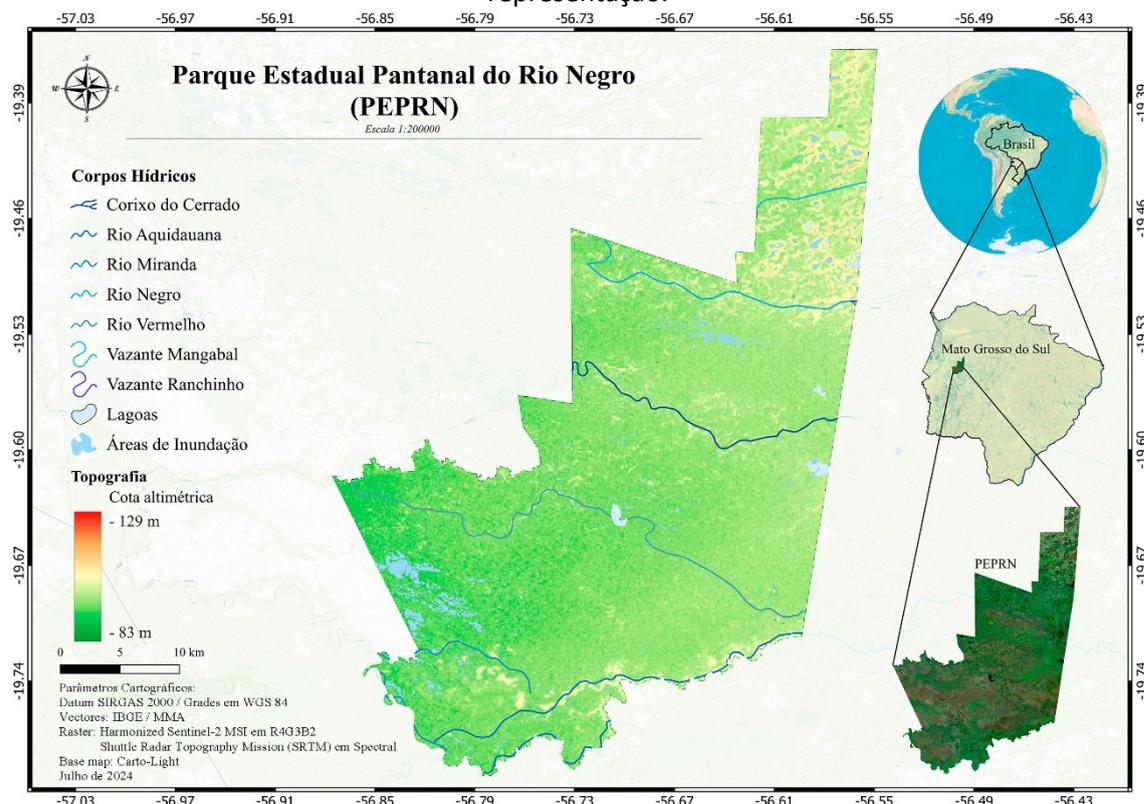
Com base no exposto, o objetivo deste trabalho é quantificar e comparar a quantidade de CO e CH₄ liberados durante os incêndios recordes que ocorreram durante o ano de 2020 no Parque Estadual Pantanal do Rio Negro (PEPRN), localizado no Bioma Pantanal.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

O Parque Estadual Pantanal do Rio Negro (PEPRN) está localizado no centro-sul do Pantanal, abrangendo os municípios de Corumbá e Aquidauana (Figura 1). Essa sub-região do Pantanal é a Nhecolândia, conhecida por suas vastas lagoas de água doce e salobra, chamadas de "salinas". As salinas são características marcantes da Nhecolândia, formadas pela evaporação da água durante a estação seca, resultando em altas concentrações de sal. Além disso, a Nhecolândia é composta por extensas pastagens naturais e uma rica biodiversidade, tornando-se uma área de grande importância ecológica e econômica.

Figura 1 - A localização do Parque Estadual Pantanal do Rio Negro está representada usando um mapa-base derivado dos produtos dos sensores MSI do Harmonized Sentinel-2 e da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM30). A composição de cores R6G2B1 para o ano de 2023 e uma rampa de cores espectrais para a topografia foram utilizadas para esta representação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Criado em 2000 pelo Decreto Estadual N° 9.941, sua área foi atualizada em 2020 para 76.802,62 hectares pelo Decreto Estadual nº 15.554. O principal objetivo do parque é

preservar ecossistemas pantaneiros, flora, fauna e o regime hidrológico, além de promover pesquisa científica e turismo sustentável.

A paisagem do PEPRN é caracterizada por baías, corixos e campos limpos, abrigando uma diversidade de plantas aquáticas e gramíneas nativas. Entre vazantes e áreas mais elevadas, a vegetação varia de cerrado a bordas de cordilheiras e capões, proporcionando refúgio para a fauna silvestre durante a cheia do Pantanal. As cordilheiras e capões apresentam árvores como aroeira, ipê-roxo, angico vermelho e manduvi (IMASUL, 2008). Na foto da Figura 2, podemos observar uma salina com vegetação de cordilheiras ao seu redor e campo.

Figura 2 - Vista aérea do Parque Estadual Pantanal do Rio Negro capturada pelo autor usando um drone em junho de 2024. A imagem mostra uma salina cercada por vegetação de cordilheiras e campos abertos.



Fonte: Acervo Pessoal (2024).

O parque abriga uma rica diversidade biológica, com 772 espécies de plantas, 117 de peixes, 18 de anuros, 27 de répteis, 164 de aves e 26 de mamíferos. É habitat para espécies como a onça-pintada, veado, jacarés, bugio e sagui (IMASUL,2008).

2.2. Dados

O Sentinel-5 Precursor (S5p) é um sistema de satélites em órbita baixa da Terra que provê informações sobre a qualidade do ar, clima e camada de ozônio, como parte do programa de monitoramento global do meio ambiente e segurança (GMES/COPERNICUS). Magroet al., al. (2021) destaca a importância e a consistência dos dados do S5p para rastrear padrões e colunas de CO, e como pode fornecer um amplo conhecimento sobre o mapeamento de eventos de incêndios florestais.

O sistema consiste em um ônibus satelital, com o instrumento de monitoramento TROPOspheric (TROPOMI), e um sistema terrestre. Este estudo utilizou os dados espectrais obtidos pelo sensor TROPOMI. O sensor cobre uma ampla gama de comprimentos de onda (tabela1), desde o infravermelho de ondas curtas (SWIR) até o infravermelho curto (NIR). Os dados já se encontram geolocalizados, com as radiâncias terrestres e de topo da atmosfera corrigidos, assim como a irradiância.

Tabela 1 - Resumo das bandas espectrais NIR e SWIR do TROPOMI e suas principais características.

Spectrometer	NIR		SWIR	
	5	6	7	8
Band ID	5	6	7	8
Spectral range (nm)	661–725	725–786	2300–2343	2343–2389
Spectral resolution FWHM (nm)	0.34–0.35	0.34–0.35	0,227	0,225
Spectral sampling (nm)	0,126	0,126	0,094	0,094
Spatial sampling (km ²)	7.1×3.6	7.1×3.6	7.1×7.5	7.1×7.5
Detector binning factor	2	2	1	1

Fonte: Rozemeijer and Kleipool, 2020.

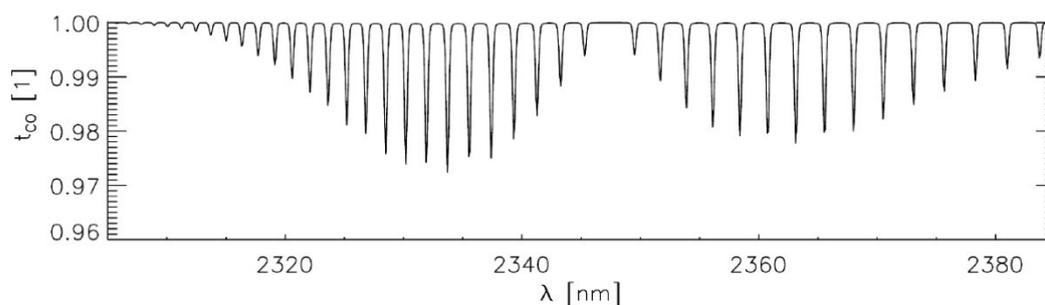
2.3. Estimativa de Carbono e CH₄

O CO é um gás de traço atmosférico emitido principalmente por processos de combustão incompleta. Relativamente raro na atmosfera, ele é geralmente encontrado em concentrações muito baixas, medidas em partes por milhão (ppm) ou partes por bilhão (ppb) (The Royal Society, 2008).

Sua vida útil de cerca de 1 a 2 meses permite que ele seja usado como um indicador de transporte de poluição a longa distância. O CO desempenha um papel central na química troposférica agindo como precursor do ozônio troposférico (The Royal Society, 2008).

Quando a luz passa por uma amostra de ar contendo CO, algumas dessas frequências de luz são absorvidas pela molécula de CO, resultando em uma redução na intensidade da luz que emerge da amostra (Figura 3). Isso permite que os instrumentos de sensoriamento remoto, como o TROPOMI, detectem e quantifiquem a presença de CO na atmosfera com base na absorção dessas frequências específicas no espectro SWIR (Perrin, Sari-Zizi, & Demaison, 2006).

Figura 3 - Transmitância individual do CO no espectro do SWIR.



Fonte: adaptado de Landgraf et al. (2018).

Nos últimos anos, foi desenvolvido para o processamento operacional dos dados do TROPOMI um algoritmo que quantifica o CO obtido ao analisar o SWIR. Os detalhes que descrevem a base teórica do algoritmo, e como utilizá-lo são descritos detalhadamente em Landgraf et al. (2018).

Com o objetivo de explorar de forma ideal as medições, o algoritmo aplica uma correção para inferir parâmetros efetivos de nuvens, juntamente com colunas de gases traço, como o metano, que também é sensível nessa faixa. Assim, obtém-se os valores separados de CO e CH₄ (LANDGRAF et al., 2018).

O espectro de radiação da Terra na região do SWIR acaba sendo afetado principalmente pelo espalhamento atmosférico causado por aerossóis e nuvens. O espalhamento de Rayleigh, embora presente, contribui com menos de 0,15% para o espectro nessa faixa espectral (GLOUDEMANS et al., 2008).

Para anular a interferência do espalhamento de luz por aerossóis e nuvens se adota um modelo de transferência radiativa que descreva o espalhamento de luz múltipla, conforme discutido por Chandrasekhar (1960) e Liou (2002).

O modelo de transferência radiativa altamente simplificado, adota uma abordagem com uma superfície lambertiana elevada para simular os efeitos de nuvens e aerossóis nas medições, proporcionando uma resposta mais eficiente e adequada para tais aplicações, ao mesmo tempo mantendo uma representação razoável dos efeitos atmosféricos dominantes na região do SWIR.

Os dados, são expressos em mol/m², assim, foram convertidos para ppm utilizando a equação (1) proposta, adotando os valores padrões recomendados para o CO, conforme definidos por Coxet al., al. (1984):

$$\text{ppm} = \frac{\text{mol/m}^2 \times \text{MM}}{\text{Mar}(\text{g/m}^3) \times 10^{-6}}$$

MM é a massa molar do CO;

Mar: Mar representa a massa da substância no ar.

No entanto, dada a intensa demanda computacional, é crucial buscar métodos mais rápidos e simplificados para aplicações práticas de processamento de dados. Considerando os benefícios do processamento em nuvem e a disponibilidade dos dados diretos do S5p, o processamento foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE).

As imagens resultantes foram transformadas em mapas utilizando o software de código aberto QGIS, versão 3.30.1.

2.4. Distribuição temporal

Considerando que os grandes incêndios no Pantanal ocorreram em 2020 e que foram os recordes nos últimos 40 anos (SHIMABUKURO et al., 2023), para esse estudo foram utilizados os dados do Fire Information for Resource Management System (FIRMS) para identificar o período e o local em específico em que os incêndios ocorreram na área de estudo durante o ano de 2020.

Os produtos do FIRMS contêm informações sobre a detecção de incêndios de forma rasterizada. As localizações de incêndios ativos em tempo quase real são processadas

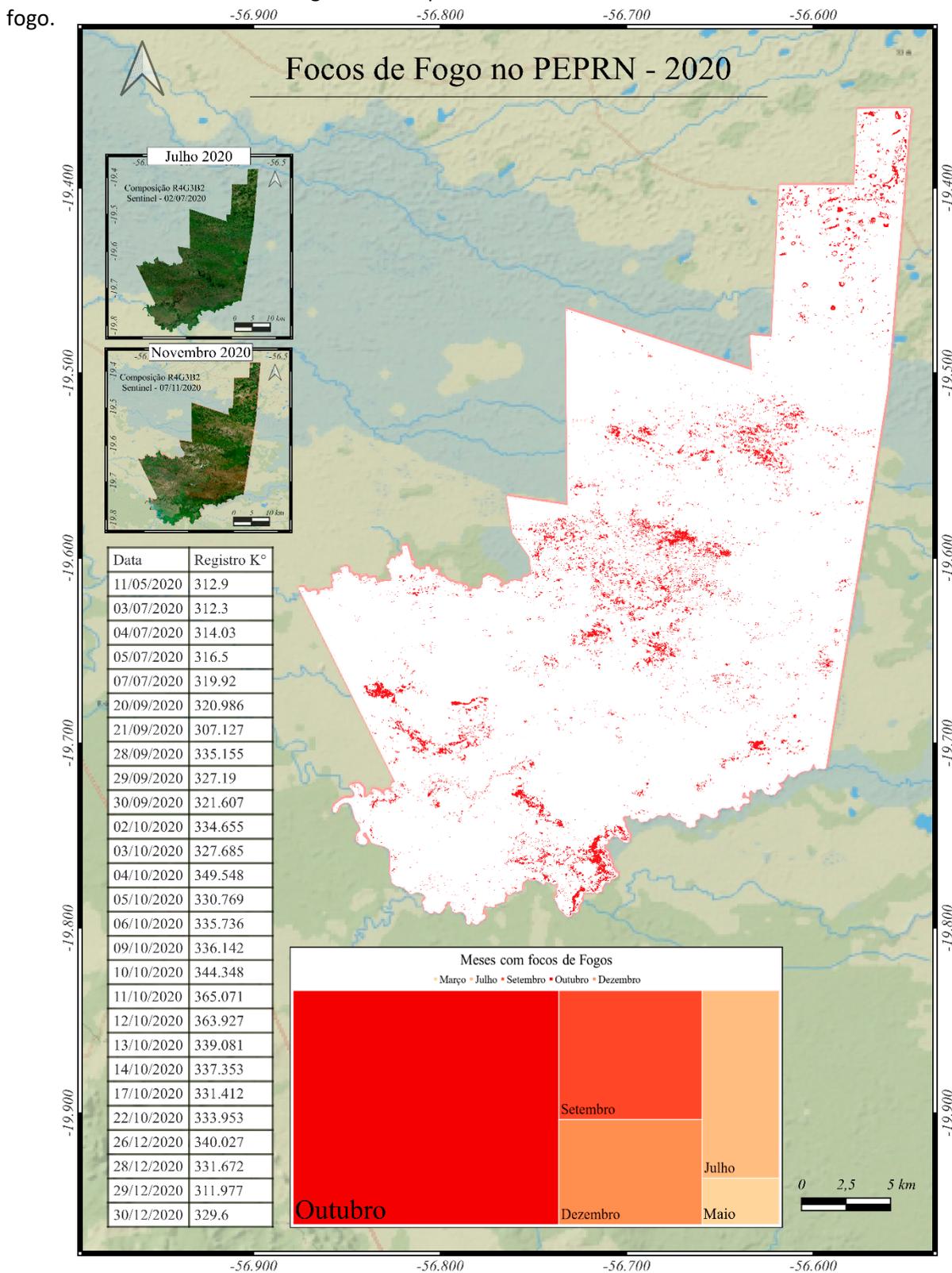
utilizando o produto de Anomalias Térmicas oriundas dos satélites MODIS e VIIRS. Cada localização de incêndio ativo representa o centróide de um pixel de 1 km que é marcado pelo algoritmo como contendo um ou mais incêndios dentro do pixel (GIGLIO et al., 2016).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Distribuição dos focos de fogo no PEPRN

A identificação dos dias em que ocorreram os focos de fogo e sua distribuição espacial estão demonstrados na Figura 4 abaixo. É observável que o mês de outubro registrou o maior pico, seguido por setembro, dezembro e julho. Devido à seca, muitas lagoas se esgotaram, e o material rico em biomassa seca foi queimado, resultando em áreas queimadas com formato redondo, semelhante ao das lagoas.

Figura 4 - O Parque Estadual Pantanal do Rio Negro está representado em: composição R4G3B2 para o mês anterior aos incêndios (julho), após os incêndios (novembro), através dos dados do Copernicus. O basemap utilizado foi o Esri National Geographic e os produtos do FIRMS na tabela, gráfico e mapa com total de focos de fogo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Nos mapas de julho e novembro, é possível observar claramente a transformação da paisagem devido às queimadas. Em julho, apesar do período de estiagem, a vegetação ainda aparece exuberante e verde nas imagens de satélite, refletindo a condição antes da intensificação dos incêndios. No entanto, julho marcou o início do aumento significativo de focos de incêndio, com a seca progressiva ao longo do mês levando ao acúmulo de biomassa seca. Esse material serviu como combustível para as queimadas, resultando em uma mancha marrom evidente em novembro, que mostra as áreas queimadas e a eliminação de vastas extensões de vegetação. O contraste entre a vegetação verde no início de julho e as áreas queimadas em novembro evidencia a rápida transformação da paisagem devido aos incêndios florestais.

Em outubro, os períodos de incêndio, que já haviam começado desde o dia 20 de setembro, embora de forma intermitente, persistiram continuamente do dia 02 até o dia 22 de outubro. Os focos registrados em maio, julho e dezembro não evoluíram para incêndios, sendo que em maio houve apenas 1 foco, possivelmente originado de uma fonte específica, como descargas elétricas atmosféricas.

O mês de julho já é caracterizado como um período seco normalmente, e a região do Pantanal já vinha sofrendo com uma estiagem e calor desde 2019 (SHIMABUKURO et al., 2023). O calor intenso na superfície terrestre aquece o ar em contato com ela. O ar quente é menos denso e tende a subir, criando correntes ascendentes, favorecendo o desenvolvimento de tempestades elétricas, o que justificaria focos isolados ou inícios de focos que evoluíram para incêndios.

Após análise das imagens, constatou-se que dos 76.802 hectares totais da área em estudo, 41.081 hectares foram impactados pela seca e incêndios, representando aproximadamente 53,45% da área total. Dentre esses hectares, 2.736 (aproximadamente 3,56%) foram áreas em que o fogo teve um impacto direto, alterando 100% da paisagem.

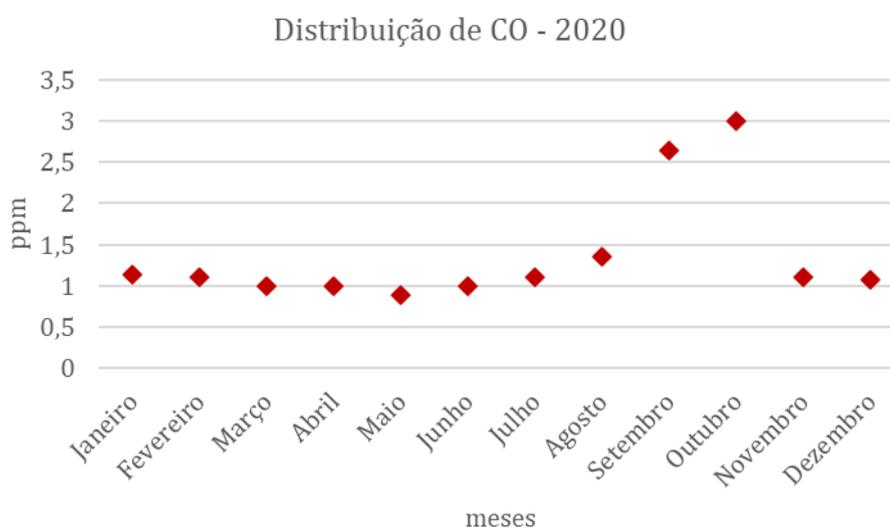
3.2. Emissões de CO e CH₄

Os valores apresentados na figura 5 representam os níveis de concentração de CO na atmosfera ao longo dos meses do ano de 2020. Observa-se uma variação significativa nos valores de CO ao longo do período analisado.

Os meses de setembro e outubro, que registraram as concentrações mais elevadas de CO, com 2,642 ppm e 2,999ppm, respectivamente, como já esperado, coincidem com os meses históricos de incêndios na área de estudo. Por outro lado, o mês de maio, apresentou a concentração mais baixa de CO, com 0,356 ppm.

Adicionalmente, ao comparar as concentrações de CO entre o mês de menor e maior emissão, uma discrepância considerável é evidenciada, um aumento de 236%. Esta análise ressalta a magnitude na concentração de CO devidos queimadas que ocorreram.

Figura 5 - Gráfico com a concentração de CO na atmosfera emitida durante os meses de 2020 no PEPRN.



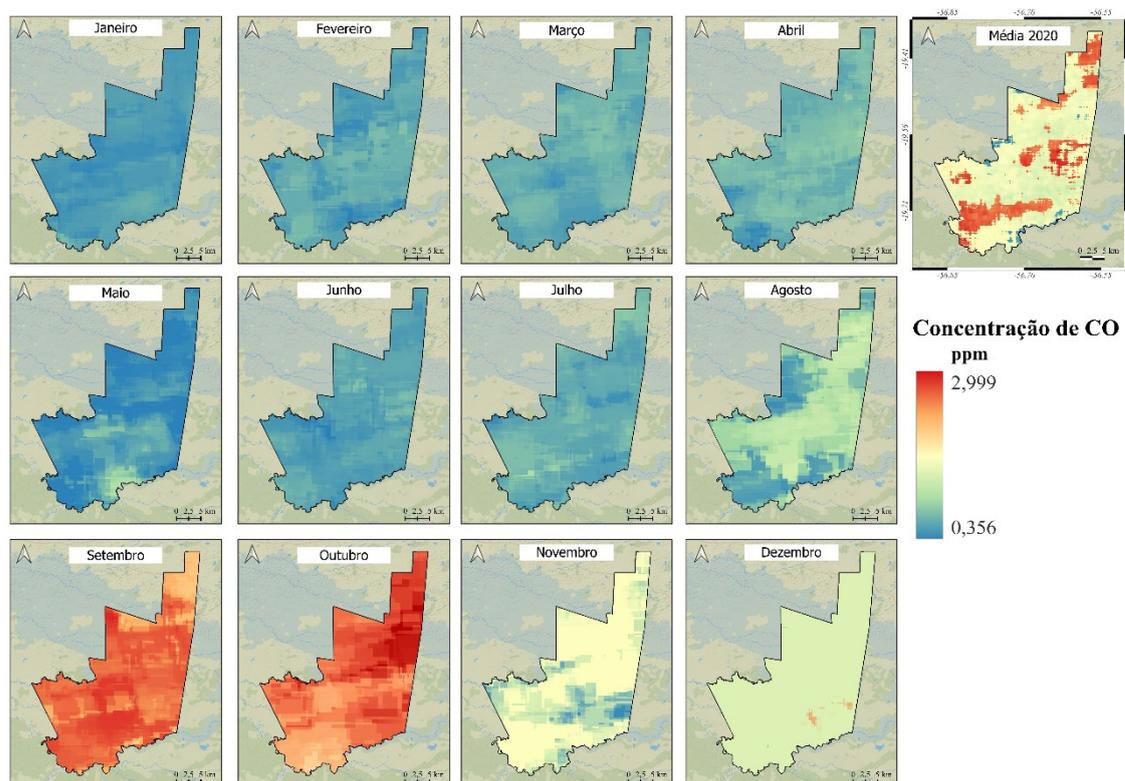
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir da análise espacial desses dados (conforme demonstrado na Figura 6), tornou-se possível identificar os pontos com as maiores e menores taxas de emissão de CO.

Observa-se uma concentração significativa de emissões ao longo da porção mais setentrional do Parque, na sua região central, bem como uma área extensa que se estende do sudoeste ao sudeste. Digno de nota é o padrão sazonal observado: em setembro, áreas com elevadas emissões de CO apresentaram uma diminuição em outubro, enquanto que, inversamente, ocorreu um aumento das emissões em outubro em comparação com setembro.

Conforme a biomassa é consumida pelo fogo em uma determinada região, a carga de combustível disponível diminui, resultando na extinção gradual do fogo. Portanto, a diminuição subsequente nas emissões de CO coincide com esse padrão, refletindo a redução da disponibilidade de biomassa para queima.

Figura 6 - O mapa exibe a distribuição espacial da concentração de CO na atmosfera, com foco nos meses de 2020, bem como uma média anual para o mesmo período no PEPRN.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

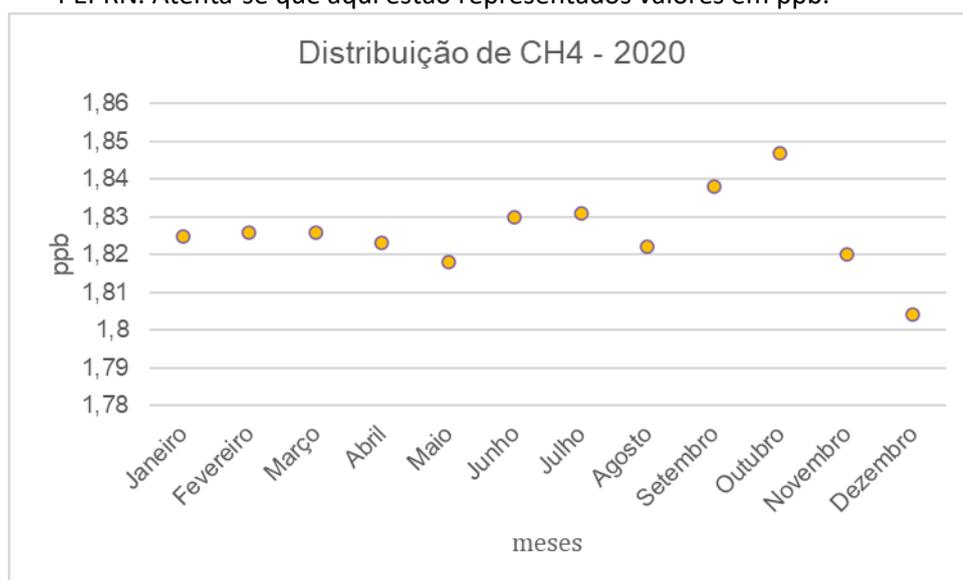
Conforme mencionado nos materiais e métodos, o CH₄ também é um gás altamente sensível nessa faixa analisada do espectro eletromagnético. Sua presença não está restrita apenas aos episódios de queima de biomassa, mas também é observada durante processos de decomposição anaeróbica de matéria orgânica, como em pântanos, áreas alagadas e aterros sanitários. Além disso, o CH₄ é liberado como subproduto da combustão de combustíveis fósseis em veículos automotores, assim como durante a digestão entérica de animais, especialmente de ruminantes, como vacas e ovelhas.

No gráfico da figura 7 estão representados os níveis de concentração de CH₄ na atmosfera ao longo dos meses do ano de 2020. Nota-se que o metano também teve seu pico

de emissão durante os períodos de incêndios, e o mês com a menor emissão foi também maio.

Ao comparar as concentrações de CH₄ entre a média dos meses anteriores aos incêndios com o valor máximo registrado para outubro, houve um aumento de 1,6%.

Figura 7 - Gráfico com a concentração de CH₄ na atmosfera emitida durante os meses de 2020 no PEPRN. Atenta-se que aqui estão representados valores em ppb.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O CH₄ na atmosfera nos momentos pré e pós-incêndio foi ligeiramente menor em comparação com as emissões de CO. As variações de CO e CH₄ durante incêndios florestais são complexas devido à diversidade de materiais queimados, como madeira, folhas de grama e árvores, que influenciam o perfil de combustão.

Esses materiais apresentam características únicas que afetam a quantidade e o tipo de gases emitidos, como densidade, umidade e composição química. Além disso, a diversidade vegetal em uma área pode resultar em padrões distintos de liberação de gases, conforme diferentes tipos de cobertura florestal queimam de maneira única, contribuindo para a complexidade.

Os incêndios florestais podem ser amplamente categorizados em dois tipos: combustão lenta (heterogênea) e combustão rápida (homogênea). Ambos são significativos e, apesar de suas diferenças fundamentais, um pode transitar para o outro. A combustão

lenta é caracterizada por uma queima mais prolongada e irregular, enquanto a combustão rápida envolve uma queima mais rápida e uniforme. Esses tipos distintos de combustão variam em suas taxas de propagação, liberação de calor e emissões de gases (SANTOSO et al., 2019).

Especificamente, as emissões de CO e CH₄ durante um incêndio florestal variam dependendo de fatores como o tipo e quantidade de combustível consumido, umidade do combustível, padrão de ignição, vento, temperatura, entre outros. A combustão rápida ocorre devido à rápida oxidação em temperaturas elevadas com oxigênio abundante, resultando na liberação de dióxido de carbono e vapor d'água. Já a combustão lenta é uma forma não rápida caracterizada pela produção abundante de fumaça com uma quantidade substancial de material particulado (principalmente carbono) e monóxido de carbono (Santoso et al., 2019).

O CO é frequentemente emitido em grandes quantidades durante a combustão incompleta de materiais orgânicos, como madeira, grama e folhas, comuns em incêndios, devido à falta de oxigênio suficiente para uma queima completa. Esses materiais tendem a produzir altas concentrações de CO devido à presença de carbono em sua composição (Ward D. 2001).

Por outro lado, o CH₄, originário da queima de biomassa, também é liberado na queima de materiais como madeira e outros materiais vegetais. No entanto, materiais que queimam mais rapidamente e em temperaturas mais altas podem não liberar tanto CH₄ quanto CO, pois o CH₄ pode ser consumido mais rapidamente durante a combustão completa (Ward D. 2001).

Portanto, com base nessas informações, é possível inferir que as características dos incêndios em questão favoreceram uma maior emissão de CO em comparação com o CH₄.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados realizada neste estudo capturou efetivamente a dinâmica das emissões de CO e CH₄ antes, durante e após os eventos de incêndios florestais na região do Parque Estadual Pantanal do Rio Negro, Pantanal, na sub-região da Nhecolândia.

Os padrões observados estão alinhados com a literatura existente, destacando a influência significativa dos incêndios florestais na composição atmosférica e no sistema climático global. Além disso, enfatiza-se a importância de pesquisas adicionais focadas no monitoramento das quantidades de aerossóis, comportamentos das plumas e na dispersão de gases, especialmente o CO, com sua vida útil na atmosfera de até 3 meses.

Adicionalmente, estudos destinados a interpretar o tipo de materiais presentes na área queimada são cruciais para uma compreensão abrangente dos impactos dos incêndios florestais.

Ao aproveitar técnicas de sensoriamento remoto e dados de satélite, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a dinâmica dos incêndios florestais e suas consequências ambientais. Principalmente na área de estudo em questão que necessita de maiores entendimentos.

Tais *insights* são inestimáveis para informar estratégias futuras de manejo de incêndios florestais e aprimorar nossa capacidade de mitigar os efeitos adversos desses eventos naturais nos ecossistemas e na saúde humana.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Núcleo de Estudos do Fogo em Áreas Úmidas (NEFAU) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e à Fundação de Apoio da UFMG (Fundep) por viabilizarem a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, G. M. M. **Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado por meio de dados Aviris e Hyperion.** In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003. Anais... São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1037-1044.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F. **Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 20, n. 1, 2002.

CHANDRASEKHAR, S. **Radiative Transfer.** Dover Publications, 1960.

COX, J. D.; WAGMAN, D. D.; MEDVEDEV, V. A. **CODATA Key Values for Thermodynamics**. Hemisphere Publishing Corp., New York, 1984.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Sentinel-5P Level 1b Product Readme File**. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Level-1b-Product-Readme-File>>. Acesso em: 15 jul. 2024.

FERREIRA BARBOSA, M. L.; HADDAD, I.; DA SILVA NASCIMENTO, A. L.; MÁXIMO DA SILVA, G.; MOURA DA VEIGA, R.; HOFFMANN, T. B.; ROSANE DE SOUZA, A.; DALAGNOL, R.; SUSIN STREHER, A.; SOUZA PEREIRA, F. R. **Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal**. *Global Ecology and Biogeography*, v. 31, p. 1960-1975, 2022.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. **Discriminação de variedades de cana-de-açúcar com dados hiperespectrais do sensor Hyperion/Eo-1**. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 57, 2005.

GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; JUSTICE, C. O. **The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products**. *Remote Sensing of Environment*, v. 178, p. 31-41, 2016. doi: 10.1016/j.rse.2016.02.054.

GLOUDEMANS, A. M. S.; ABEN, I.; HASEKAMP, O. P. **Improving the interpretation of SCIAMACHY limb observations of ozone with trajectory mapping**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 8, n. 11, p. 3025-3036, 2008.

IMASUL (Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul). **Plano de Manejo Parque Estadual do Pantanal do Rio Negro**. Campo Grande: IMASUL, 2008. Disponível em: <<https://www.imasul.ms.gov.br/gestao-de-unidades-de-conservacao/unidades-de-conservacao-estaduais/parque-estadual-pantanal-do-rio-negro/>>. Acesso em: 03 fev. 2024.

KEDDY, P. A.; FRASER, L. H.; SOLOMESHCH, A. I.; JUNK, W. J.; CAMPBELL, D. R.; ARROYO, M. T. K.; ALHO, C. J. R. **Wet and wonderful: the world's largest wetlands are conservation priorities**. *Bioscience*, v. 59, p. 39-51, 2009.

LANDGRAF, J.; DE BRUGH, J. A.; SCHEEPMAKER, R.; BORSDORFF, T.; HOUWELING, S.; HASEKAMP, O. **Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor: Carbon Monoxide Total Column Retrieval**. 2018. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/sentinel-5p-tropomi-atbd-carbon-monoxide-total-column-retrieval>. Acesso em: 10 jan. 2019.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C. C.; PERES, L. F.; SANDER DE CARVALHO, L. A.; GARCIA, L. C. **Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands**. *Nature*, v. 588, p. 217-219, 2020. doi: 10.1038/d41586-020-03464-7.

MAGRO, C.; NUNES, L.; GONÇALVES, O. C.; NENG, N. R.; NOGUEIRA, J. M. F.; REGO, F. C.; VIEIRA, P. **Atmospheric trends of CO and CH4 from extreme wildfires in Portugal using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 data**. *Fire*, v. 4, 2021. doi: 10.3390/fire4020025.

MARTINS, P. I.; BELÉM, L. B. C.; SZABO, J. K.; LIBONATI, R.; GARCIA, L. C. **Prioritising areas for wildfire prevention and post-fire restoration in the Brazilian Pantanal.** Ecological Engineering, v. 176, p. 106517, 2022.

MATAVELI, G. A. V.; PEREIRA, G.; DE OLIVEIRA, G.; SEIXAS, H. T.; CARDOZO, F. D. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; KAWAKUBO, F. S.; BRUNSELL, N. A. **Pantanal's widespread fire: short- and long-term implications for biodiversity and conservation.** Biodiversity and Conservation, v. 30, p. 3299-3303, 2021.

MENGATTO JUNIOR, E. A.; VILA DA SILVA, J. S. **Mapeamento da cobertura vegetal do Parque Estadual Pantanal do Rio Negro (PEPRN) MS.** Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campinas, SP, 26 a 30 de outubro de 2009

PERRIN, A.; SARI-ZIZI, N.; DEMAISON, J. **Remote sensing of the atmosphere for environmental security.** Berlin: Springer, 2006. ISBN 1-4020-5089-5.

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. **Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery.** AVIRIS Workshop. Pasadena: JPL/NASA, 2000.

ROTETA, E.; BASTARRIKA, A.; FRANQUESA, M.; CHUVIECO, E. **Landsat and Sentinel-2 based burned area mapping tools in Google Earth Engine.** Remote Sensing, v. 13, p. 816, 2021.

ROZEMEIJER, N.; KLEIPOOL, Q. **S5P Mission Performance Centre Level 1b Readme Report S5P-MPC-KNMI-PRF-L1B.** De Bilt: KNMI, 2018. Disponível em: <<http://www.tropomi.eu/documents/level-0-1b>>. Acesso em: 15 Julho. 2024.

SANTOSO, M. A.; CHRISTENSEN, E. G.; YANG, J.; REIN, G. **Review of the transition from smouldering to flaming combustion in wildfires.** Frontiers in Mechanical Engineering, 2019.

SEILER, W.; CRUTZEN, P. **Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning.** Climatic Change, v. 2, p. 207-247, 1980.

SHIMABUKURO, Y. E.; DE OLIVEIRA, G.; PEREIRA, G.; ARAI, E.; CARDOZO, F.; DUTRA, A. C.; MATAVELI, G. **Assessment of burned areas during the Pantanal fire crisis in 2020 using Sentinel-2 images.** Fire, v. 6, 2023. doi: 10.3390/fire6070277.

SILVA, S. C. P. D.; BAPTISTA, G. M. D. M. **Análises espectrais da vegetação com dados Hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO2 em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 21, n. 2, p. 354-370, 2015. doi: 10.1590/S1982-21702015000200020.

SILVA, J. dos S. V.; ABDON, M. de M. **Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 33, Número Especial, p. 1703-1711, out. 1998.

SCHRAMM, V. F.; VIBRANS, A. C. **Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na Bacia do Itajaí.** Dynamics Revista Tecno-Científica, v. 13, n. 1, p. 59-69, 2007.

SOUZA, A. A. **Estudo de fitofisionomias de cerrado com dados de sensor Hyperion/Eo-1**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2009.

THE ROYAL SOCIETY. **Ground-Level Ozone in the 21st Century: Future Trends, Impacts and Policy Implications**. Science Policy Report 15/08, 2008.

TOMAS, W. M.; BERLINCK, C. N.; CHIARAVALLI, R. M.; FAGGIONI, G. P.; STRUSSMANN, C.; LIBONATI, R.; ABRAHAO, C. R.; DO VALLE ALVARENGA, G.; DE FARIA BACELLAR, A. E.; DE QUEIROZ BATISTA, F. R. **Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil**. Scientific Reports, v. 11, p. 23547, 2021.

TOSCA, M. G.; RANDERSON, J. T.; ZENDER, C. S. **Global impact of smoke aerosols from landscape fires on climate and the Hadley circulation**. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 13, p. 5227-5241, 2013.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; VAN LEEUWEN, T. T.; CHEN, Y.; ROGERS, B. M.; MU, M.; VAN MARLE, M. J. E.; MORTON, D. C.; COLLATZ, G. J.; YOKELSON, R. J.; KASIBHATLA, P. S. **Global fire emissions estimates during 1997–2016**. Earth System Science Data, v. 9, p. 697-720, 2017. doi: 10.5194/essd-9-697-2017.

VIDOT, J.; LANDGRAF, J.; HASEKAMP, O.; BUTZ, A.; GALLI, A. **Carbon monoxide from shortwave infrared reflectance measurements: a new retrieval approach for clear sky and partially cloudy atmospheres**. Remote Sensing of Environment, v. 120, p. 255-266, 2012.

WARD, D. **Combustion Chemistry and Smoke**. In: Forest Fires; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, p. 55-77, 2001.