

# Análise exploratória do uso da modelagem atmosférica sobre os incêndios florestais no Pantanal

## Exploratory analysis of atmospheric modelling use over Pantanal wildfires

Flavio Tiago Couto<sup>\*</sup>, Filipe Lemos Maia Santos<sup>\*\*</sup>, Cátia Campos<sup>\*\*\*</sup>, Carolina Purificação<sup>\*\*\*\*</sup>, Nuno Andrade<sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
Juan Manuel López-Vega<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Matthieu Lacroix<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia – CREATE, Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, fcouto@uevora.pt

<sup>\*\*</sup> Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia – CREATE, Instituto de Investigação e Formação Avançada—IIFA, Universidade de Évora, filipe.santos@uevora.pt

<sup>\*\*\*</sup> Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia – CREATE, Instituto de Investigação e Formação Avançada—IIFA, Universidade de Évora, catia.campos@uevora.pt

<sup>\*\*\*\*</sup> Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia – CREATE, Instituto de Investigação e Formação Avançada—IIFA, Universidade de Évora, carolina.purificacao.20@gmail.com

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Programa de Doctorado en Turismo, Universidad de Extremadura, npintoan@alumnos.unex.es

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Micrometeorology Group, University of Bayreuth, Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth, Germany. Juan.Lopez-Vega@uni-bayreuth.de

<sup>\*\*\*\*\*</sup> École Doctorale ED 483 Sciences Sociales, Université Lumière Lyon 2, UMR 5600 EVS-IRG, 5 Avenue Pierre Mendès, 69500 Bron, France. matthieu.lacroix@univ-lyon2.fr

<https://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99952>

### Resumo

O estudo discute de forma exploratória as condições atmosféricas favoráveis à evolução dos incêndios florestais no Pantanal em 12 de novembro de 2023. Esses episódios foram marcados por dois períodos de rápida expansão do fogo, primeiro no início da tarde e outro à noite. O estudo usa um conjunto de observações de satélite e estações meteorológicas, as quais ajudaram a identificar o fogo e algumas condições meteorológicas na superfície. Além disso, o *Fire Weather Index* (FWI) no Pantanal foi analisado para um período de 44 anos. No entanto, esse conjunto de dados não foi suficiente para explicar completamente o comportamento do fogo naquele dia. Nesse contexto, a modelagem atmosférica foi aplicada para encontrar as possíveis causas do comportamento do fogo em dois períodos. O modelo Meso-NH foi configurado com dois domínios aninhados e resoluções horizontais de 2500 m e 500 m. Os resultados mostraram uma tendência positiva do FWI nas últimas décadas, bem como uma clara sazonalidade para os valores máximos no ano de 2023. A simulação indicou condições favoráveis à ignição do fogo, e o campo de rajadas de vento mostrou ventos moderados em ambos os períodos, mas causados por diferentes forçantes. No início da tarde, a circulação em grande escala favoreceu a propagação do fogo, enquanto à noite uma frente de rajada foi observada. O estudo destaca o papel das condições meteorológicas na escala sub-diária, em particular para mudanças repentinas do vento à superfície ao longo do dia. Esse resultado deve ser considerado ao examinar o perigo de fogo e o planejamento das ações de combate aos incêndios na região.

**Palavras-chave:**

Focos de calor, FWI, Modelo Meso-NH, Frentes de rajadas, Meteorologia dos incêndios.

**Abstract**

The study discusses in an exploratory way the atmospheric conditions leading to several fires in the Pantanal on November 12, 2023. These episodes were marked by two periods of maximum fire expansion, first in the early afternoon and another in the evening. The study is based on a set of observations from satellites and weather stations, which helped to identify these fires and some meteorological conditions at the surface. In addition, the Fire Weather Index (FWI) in the Pantanal was analyzed for a 44-year period. However, this dataset was not enough to completely explain the fire behavior on that day. In this context, atmospheric modeling was applied to find the possible causes of fire behavior in these two periods. The Meso-NH model was run with two nested domains of horizontal resolutions of 2500 m and 500 m. The results showed a positive trend of FWI in the last decades and a clear seasonality for the maximum values in 2023. Also, the simulation indicated favorable weather conditions for fire ignition, given the high temperatures and low relative humidity. However, the wind gust field showed moderate gusty winds in both periods but caused by different forces. In the early afternoon, the larger scale circulation favored fire propagation, whereas in the evening fire spread by a gust front. Furthermore, the findings highlight the role of weather conditions on a sub-daily scale, with sudden changes in surface winds throughout the day, which is strongly recommended to be considered when examining fire danger and firefighting action plans in the region.

**Keywords:**

Active Fire, FWI, Meso-NH model, Gust fronts, Fire meteorology.

**I. INTRODUÇÃO**

No contexto das alterações climáticas, o aumento da ocorrência de incêndios florestais é previsível nas próximas décadas em diferentes partes do mundo. Burton (2024) demonstrou que as alterações climáticas estão causando um aumento nas áreas queimadas na maioria das regiões, particularmente durante as temporadas de pico de incêndios. Vários estudos exploraram a conexão entre as alterações climáticas e regiões específicas. Por exemplo, Senande-Rivera et al. (2025) examinou o seu impacto na taxa de propagação (*Rate Of Spread*, ROS) na Península Ibérica, descobrindo que o norte de Portugal e o sul da Galiza exibem as variações mais significativas em ROS. Abatzoglou e Williams (2016) estimaram que fatores antropogênicos duplicaram a área queimada esperada entre 1984 e 2015 no oeste dos EUA. Da mesma forma, Chang et al. (2024) forneceu evidências de aumento da ocorrência de incêndios na Coreia do Sul. Além disso, pesquisas associaram ondas de calor e secas a intensos períodos de incêndios (por exemplo, Parente et al., 2018). Espera-se também que as alterações climáticas criem condições favoráveis para o aumento de incêndios extremos na Austrália, em particular devido a mudanças na temporada de incêndios associadas ao fenômeno da piro-convecção (Dowdy, 2018; Dowdy et

al., 2019; Di Virgilio et al., 2019), mas a tendência ainda pode ser divergente entre diferentes ecorregiões (Bradstock et al., 2014). O mesmo cenário é esperado para o perigo e ocorrência de incêndios florestais no sul da Europa (Dupuy et al., 2020), onde as alterações climáticas podem também estar a mudar a época de incêndios, conforme indicado por Couto et al. (2022). O estudo investigou o evento incomum de incêndio de inverno em janeiro de 2022 em Portugal, revelando como a variabilidade climática pode levar ao aumento da ocorrência de incêndios mesmo nos meses de inverno.

Além das condições climáticas propícias ao fogo, o comportamento dos incêndios florestais é composto por várias componentes que podem interagir entre si para criar eventos extremos numa escala temporal menor. A atividade do fogo pode aumentar induzida por fatores como o combustível, aspectos topográficos ou condições meteorológicas (por exemplo, Sharples, 2009). Nesse contexto, a geoinformação é importante para explorar aspectos específicos da superfície e do fogo, mas não o suficiente para explicar a dinâmica de alguns eventos. A meteorologia desempenha um papel importante no comportamento do fogo, sendo capaz de suprimir ou intensificar o processo de combustão. Se houver combustível disponível para queimar, o fogo pode levar a uma situação em que o combate se torna perigoso ou muito difícil. Em muitos casos, o desenvolvimento de grandes incêndios pode estar diretamente ligado a configurações meteorológicas de larga escala (por exemplo, Raphael, 2003; Rolinski et al., 2019), que podem influenciar o comportamento do fogo ou levar a condições favoráveis por meio de mudanças na condição de umidade do combustível.

Seguindo a crescente preocupação sobre o impacto das condições meteorológicas na frequência de incêndios extremos, tem havido um esforço considerável no desenvolvimento de ferramentas de previsão de incêndios para ajudar no planejamento e no combate. Os modelos acoplados de fogo-atmosfera são um excelente exemplo das abordagens que podem ajudar os bombeiros (por exemplo, Bakhshaii; Johnson, 2019), principalmente porque alguns incêndios podem estar relacionados a fortes processos convectivos e à formação de nuvens convectivas (PyroCumulus ou PyroCumulonimbus). Estas nuvens podem desempenhar um papel fundamental na evolução da frente de fogo, sendo já possível representar esse ambiente extremo a partir desses modelos acoplados quando configurados em alta resolução temporal e espacial. Por exemplo, o desenvolvimento de uma tempestade gerada pelo fogo durante o incêndio de Pedrógão Grande, Portugal, foi produzido pelo modelo acoplado MesoNH/ForeFire (Couto et al., 2024a), enquanto o modelo ACCESS-Fire simulou nuvens pyroCb em dois eventos extremos de incêndio florestal na Austrália (Peace et al., 2022; Peace et al., 2023). Basicamente, esses estudos destacam como os incêndios florestais influenciam as condições

atmosféricas locais, revelando intensa atividade convectiva e a microfísica de nuvens associada a tais eventos extremos.

O bioma do Pantanal inclui a fronteira do Brasil com o Paraguai e a Bolívia nas latitudes tropicais, sendo considerada a maior área úmida de água doce do mundo com uma planície sazonalmente inundada (Pott; Pott, 2004; Boin et al., 2019; CENTRE/UNESCO, 2025). Os incêndios que ocorreram no Pantanal nos últimos anos levantaram diversas questões sobre as alterações climáticas e a preservação do bioma, principalmente em termos de desenvolvimento sustentável e biodiversidade. O Pantanal é um habitat vital para inúmeras espécies e, em 2020, foi devastado pela ocorrência de grandes incêndios (por exemplo, Libonati et al., 2022; Silva et al., 2024) com uma perda de biodiversidade sem precedentes (Tomas et al., 2021; Mataveli et al., 2021; De Barros et al., 2022). Do ponto de vista do setor turístico, é reconhecido que essas regiões afetadas pelo fogo, com a consequente perda de biodiversidade, sofrem impactos no número de visitantes e na sua imagem ao perder suas atividades atrativas (Kim; Jakus, 2019; Carrillo et al., 2022; Andrade et al., 2023), com riscos também consequentes para as comunidades locais (por exemplo, Silva et al., 2023). Além da redução imediata do número de visitantes, incêndios frequentes e devastadores podem levar a uma mudança estrutural no perfil do turismo no Pantanal. Segundo Thapa et al. (2013), a degradação ambiental pode alterar o comportamento e a motivação do visitante, assim como comprometer certificações internacionais que impulsionam o turismo sustentável na região.

O uso de diferentes fontes de dados é essencial para entender a dinâmica dos incêndios no Pantanal. Por exemplo, a aplicação de sistemas de geoinformação é crucial para o planejamento e/ou gestão, sendo muito útil na identificação das áreas afetadas pelo fogo. Mas, por outro lado, a modelagem atmosférica pode ser uma metodologia valiosa para representar as condições meteorológicas numa escala sub-diária, capturando fenômenos atmosféricos que ocorrem em menores escalas espaciais. Além disso, o fato de que as alterações climáticas podem ter um alto impacto nas condições favoráveis à ocorrência do fogo, explorar o risco meteorológico atual dos incêndios florestais para a região do Pantanal também é relevante para se obter uma perspectiva mais ampla da dinâmica do fogo.

O presente estudo tem como objetivo discutir as principais condições atmosféricas favoráveis à evolução dos incêndios no Pantanal no dia 12 de novembro de 2023. Além disso, o índice meteorológico de perigo de incêndio florestal nas últimas décadas é analisado sobre a região do Pantanal para traçar um panorama do atual estado de perigo de fogo. O manuscrito está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve os dados e a

metodologia, enquanto os resultados são apresentados e discutidos na Seção 3. As considerações finais são apresentadas na Seção 4.

## II. DADOS E METODOLOGIA

Esta seção descreve o conjunto de dados usado neste estudo, que consiste em observações de dados derivados de satélite, dados de estações meteorológicas e a descrição de um experimento numérico de alta resolução.

### Dados de Geoinformação

As informações de focos de calor permitem identificar a localização dos incêndios florestais ativos por meio de sensoriamento remoto por satélite. O sensor *Advanced Baseline Image* (ABI) a bordo do GOES-16, um satélite geoestacionário meteorológico administrado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), fornece informações com alta resolução temporal (cerca de 10 min). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) mantém e dissemina uma plataforma contendo um banco de dados de focos de calor com informações derivadas de vários sensores chamada BDQueimadas disponível online (<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>). Os dados usados neste trabalho foram extraídos deste banco para o dia 12 de novembro de 2023, sobre a região do Pantanal.

### Observações meteorológicas

Os dados horários de duas estações meteorológicas localizadas no estado do Mato Grosso do Sul, nomeadamente as estações Nhumirim (A717) e Aquidauana (A719) (Figura 1), foram usados para validar as saídas do modelo. Os dados estão disponíveis online (INMET, 2025) e foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O estudo concentra-se nas variáveis meteorológicas relacionadas ao perigo meteorológico de incêndio, ou seja, temperatura do ar e umidade relativa a 2 metros, bem como rajadas de vento a 10 metros.

### Dados do Índice Meteorológico de incêndio florestal (FWI)

O '*Canadian Forest Fire Weather Index System*' (CFFWIS), conhecido como '*Fire Weather Index*' (FWI), compreende seis índices que quantificam os efeitos da umidade do combustível e do vento no comportamento do fogo (Wagner, 1987). Os índices são calculados com base nos valores de temperatura e umidade relativa, ambos a 2 m, a intensidade do vento aos 10 m e a precipitação acumulada ao longo de 24 h. Em resumo, o FWI é um indicador meteorológico de risco de incêndio florestal. A análise de dados do FWI foi conduzida em três partes que serão explicadas abaixo.

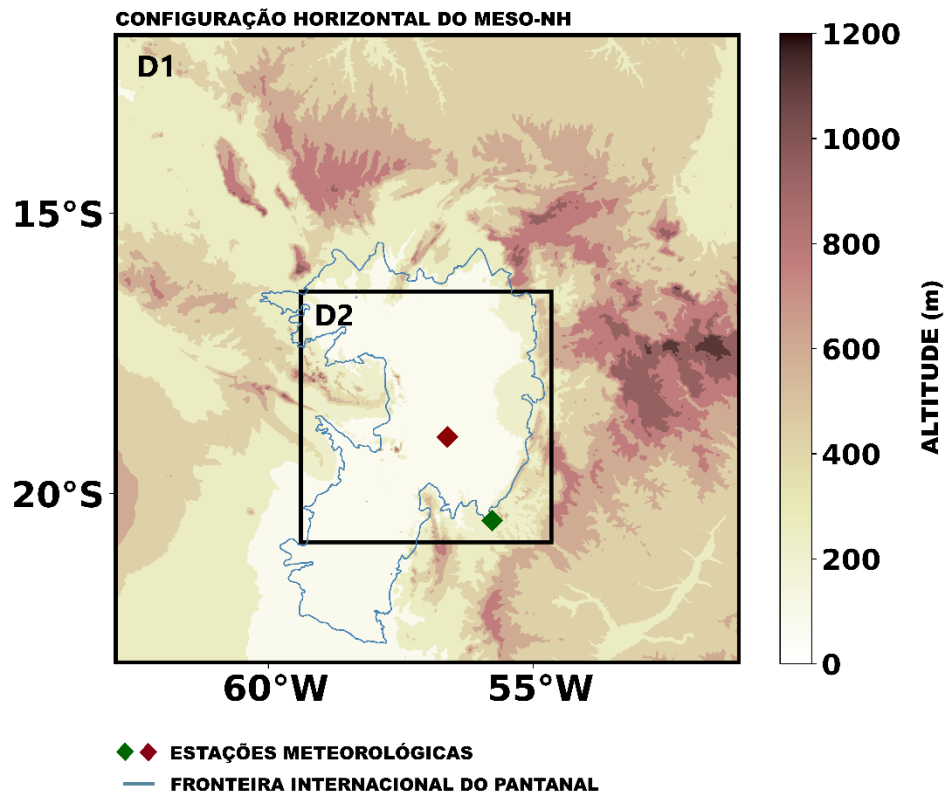


Figura 1 – Configuração do modelo cobrindo o Pantanal. O maior domínio (D1) tem resolução horizontal de 2,5 km e o domínio interno (D2) tem resolução de 0,5 km. A topografia foi obtida no banco de dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). As estações meteorológicas de Nhumirim (A717) e Aquidauana (A719) estão representadas pelos ícones vermelho e verde, respectivamente.

Na primeira parte, foram utilizados dados históricos e, neste contexto, o conjunto de dados é produzido pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF) no seu centro computacional para a previsão de risco de incêndio do “*Copernicus Emergency Management Service - CEMS*” (conjunto de dados FWI - ERA5: <https://doi.org/10.24381/cds.0e89c522>). O conjunto de dados fornece uma reconstrução histórica completa das condições meteorológicas favoráveis à propagação do início e à manutenção dos incêndios. As métricas de risco de incêndio fornecidas fazem parte de um conjunto de dados produzido pelo CEMS para o Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais (EFFIS). O EFFIS incorpora índices de risco de incêndio para três modelos diferentes desenvolvidos no Canadá, Estados Unidos e Austrália. No conjunto de dados, os índices de risco de incêndio são calculados usando previsões meteorológicas de simulações históricas fornecidas pela reanálise do ECMWF ERA5. Aqui, dados do FWI em grade com resolução horizontal de 0,25° x 0,25° são usados, bem como cobertura temporal de 1980 a 2023 (44 anos) com resolução temporal diária. Foram consideradas a variabilidade interanual entre 1980 e 2023, a variabilidade intra-anual durante 2023 e a variabilidade diária de novembro de 2023 do FWI sobre a região do Pantanal.

## Modelagem atmosférica

Este estudo utiliza o modelo Meso-NH (Lac et al., 2018), que é implementado com um pacote de parametrizações bastante completo de processos físicos em escala de subgrade na atmosfera, enquanto as variáveis meteorológicas próximas à superfície são obtidas da plataforma externalizada de modelos de superfície acoplados ao modelo SURFEX (Masson et al., 2013).

Em Portugal, o Meso-NH tem sido usado com sucesso em vários campos de pesquisa, relacionados à precipitação em terrenos complexos (por exemplo, Couto et al., 2016), emissão e transporte de poeira mineral (por exemplo, Couto et al., 2021), tempestades geradas pelo fogo (Couto et al., 2024a), meteorologia de fogo (por exemplo, Couto et al., 2020), entre outros. Por outro lado, Couto et al. (2024b) usaram o modelo para estudar o comportamento inesperado do fogo no Pantanal. Em relação ao estudo de Couto et al. (2024b), a simulação realizada no presente estudo tem uma melhor resolução horizontal. A simulação que permite a convecção ser explicitamente resolvida foi configurada em dois domínios, conforme mostrado na Figura 1. O domínio maior (D1) foi projetado com uma grade de 500 × 500 pontos com resolução de 2,5 km (1250 km × 1250 km). No entanto, um grande domínio interno (D2) foi configurado com resolução de 500 m (1000 × 1000 pontos de grade; 500 km × 500 km). A grade vertical não é igualmente espaçada e foi configurada com 50 níveis sigma, estendendo-se gradualmente de 30 m, perto da superfície, a 900 m, perto do topo. A simulação realizada em modo interativo bidirecional foi inicializada e forçada usando a análise ECMWF atualizada a cada 6 h, com uma resolução espacial de cerca de 9 km (Lang et al., 2023).

A simulação foi configurada com o pacote padrão de parametrização física do modelo, que considera um conjunto de processos físicos que ocorrem na atmosfera, como convecção profunda, convecção rasa, microfísica de nuvens, turbulência, entre outros. A convecção profunda foi assumida como explicitamente resolvida, e a convecção rasa foi parametrizada a partir do esquema Eddy Diffusivity Kain-Fritsch (EDKF) (Pergaud et al., 2009). A parametrização da microfísica de nuvens foi feita usando o esquema ICE3 de um momento (Pinty; Jabouille, 1998), que pode representar seis categorias da substância água na atmosfera (vapor de água, água da nuvem, chuva, graupel, neve e cristais de gelo). O esquema de turbulência baseado em um fechamento de ordem 1,5 é usado (Cuxart et al., 2000), com apenas os fluxos verticais considerados no domínio de 2,5 km, enquanto o esquema de fluxos turbulentos 3D completo foi ativado no domínio de resolução interna de 500 m. A parametrização da radiação é baseada no Modelo de Transferência Radiativa Rápida (Mlawer et al., 1997). Entretanto, os efeitos do fogo não são considerados nesses experimentos.

Além disso, o modelo incorpora diferentes tipos de cobertura do solo, permitindo que ele represente a orografia e as características da paisagem de cada local. A composição do solo é assumida como uniforme em profundidade, mas varia horizontalmente, definida por frações de areia e argila. O experimento usou bancos de dados padrão para cobertura do solo (ecoclimap\_v1.9, Masson et al. (2003) e tipo de solo (*Harmonized World Soil Database*—HWSD v1, global, (Nachtergaele, 2025)), enquanto a orografia foi obtida do banco de dados SRTM (SRTM, 2025).

A integração temporal do modelo começou com o domínio externo (D1) no dia 12 de novembro de 2023 às 0000 UTC, enquanto a simulação com resolução de 500 m (D2) começou às 0600 UTC. As primeiras 6 horas foram consideradas o período de spin-up da simulação. O experimento foi executado até ao dia 13 de novembro de 2023, às 0000 UTC, totalizando 18 horas simuladas com resolução de 500 m num grande domínio e saídas horárias. O número limitado de estações meteorológicas atualmente é insuficiente para validação por meio de índices estatísticos, como o erro médio ou o erro quadrático médio. Portanto, o desempenho do modelo foi avaliado pela comparação entre dados observados de temperatura do ar, umidade relativa e rajadas de vento de duas estações meteorológicas abrangidas pelo domínio interno. A capacidade do modelo representar as variáveis meteorológicas próximas à superfície está presente na Figura 2.

Vale ressaltar que na estação meteorológica A717, o modelo superestima as temperaturas principalmente durante a tarde de 12 de novembro de 2023 (Figura 2a), enquanto a temperatura do ar foi subestimada pelo modelo em A719 até às 1600 UTC de 12 de novembro de 2023 (Figura 2b). Em relação à umidade relativa, a Figura 2c mostra que o modelo subestimou os valores observados em A717 durante todo o período de verificação, exceto entre 1200 e 1400 UTC. Em contraste, houve uma superestimação da umidade relativa do modelo na estação A719, exceto a partir das 1800 UTC de 12 de novembro de 2023 (Figura 2d). Para rajadas de vento, o modelo captura efetivamente o comportamento da variável ao longo do dia (Figura 2e), a qual é ligeiramente subestimada no início da tarde (Figura 2f). A observação das rajadas de vento foi superestimada pelo modelo ao final da simulação em ambas as estações. Vale ressaltar que essas estações meteorológicas estão distantes dos eventos de incêndio. No entanto, apesar de alguma sub ou superestimação, o comportamento das variáveis meteorológicas foi bem capturado pelo modelo ao longo do dia.

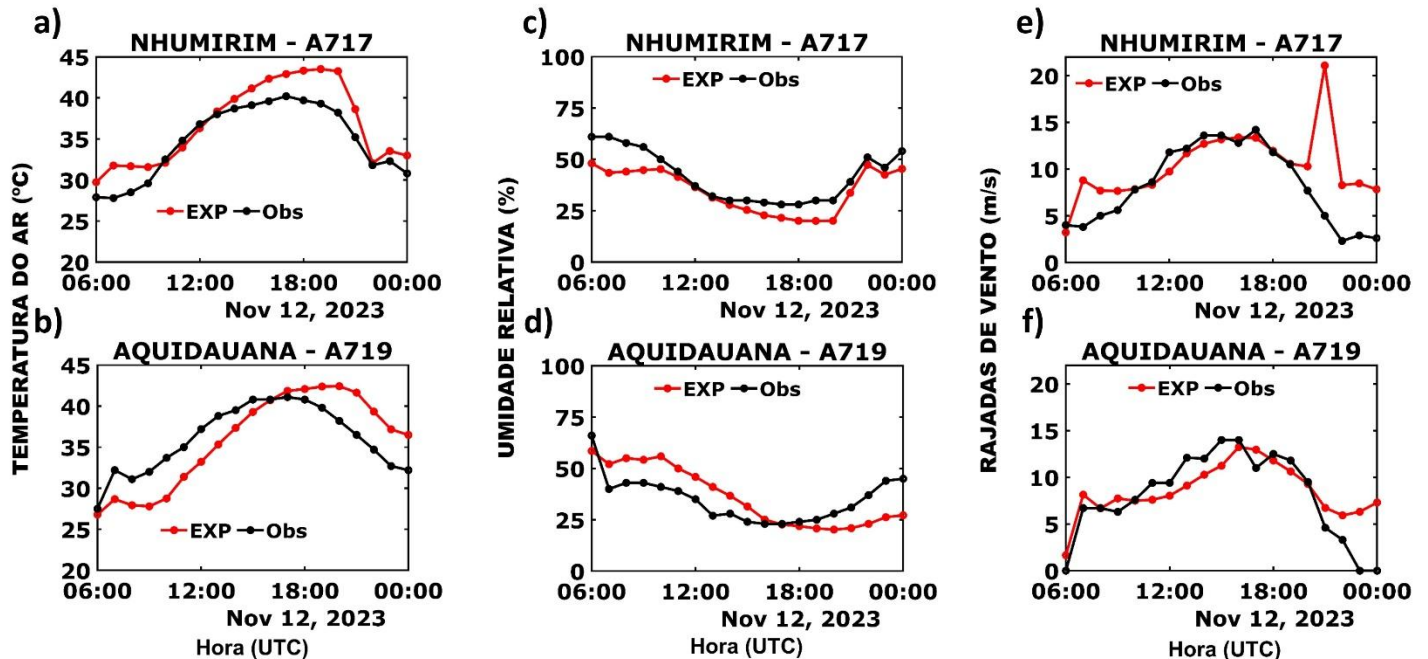


Figura 2 – Comparação entre o modelo com resolução de 500 m e a observação durante as 18 h de simulação: a) – b) temperatura do ar a 2 m, c) – d) umidade relativa a 2 m, e) – f) rajadas de vento a 10 m.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Análise Climatológica do FWI

Esta subseção apresenta uma análise de variabilidade do índice FWI para a região do Pantanal (Figura 3). A Figura 3a apresenta a variabilidade interanual da média anual do FWI entre 1980 e 2023. A região mostra uma tendência positiva, com FWI médio anual indicando um risco crescente de incêndio florestal nas últimas décadas. Nos últimos 40 anos, a tendência do FWI médio passou de 6 para 16. Desde 2000, houve um aumento na frequência de anos com valores maiores de FWI (com valores maiores que 15), sendo que 2020 apresentou o valor máximo.

Por outro lado, ao analisar apenas o ano de 2023, a Figura 3b mostra a variabilidade intra-anual do FWI, revelando um padrão sazonal da intensidade do risco meteorológico de incêndio na região. A mesma figura exhibe um primeiro pico significativo no final de maio e um aumento significativo no FWI a partir de julho, com um máximo em novembro. A Figura 3b também confirma que as estações de inverno e primavera são períodos críticos para a ocorrência de fogo na região e que novembro de 2023 pode ser destacado pelo maior risco meteorológico de incêndio.

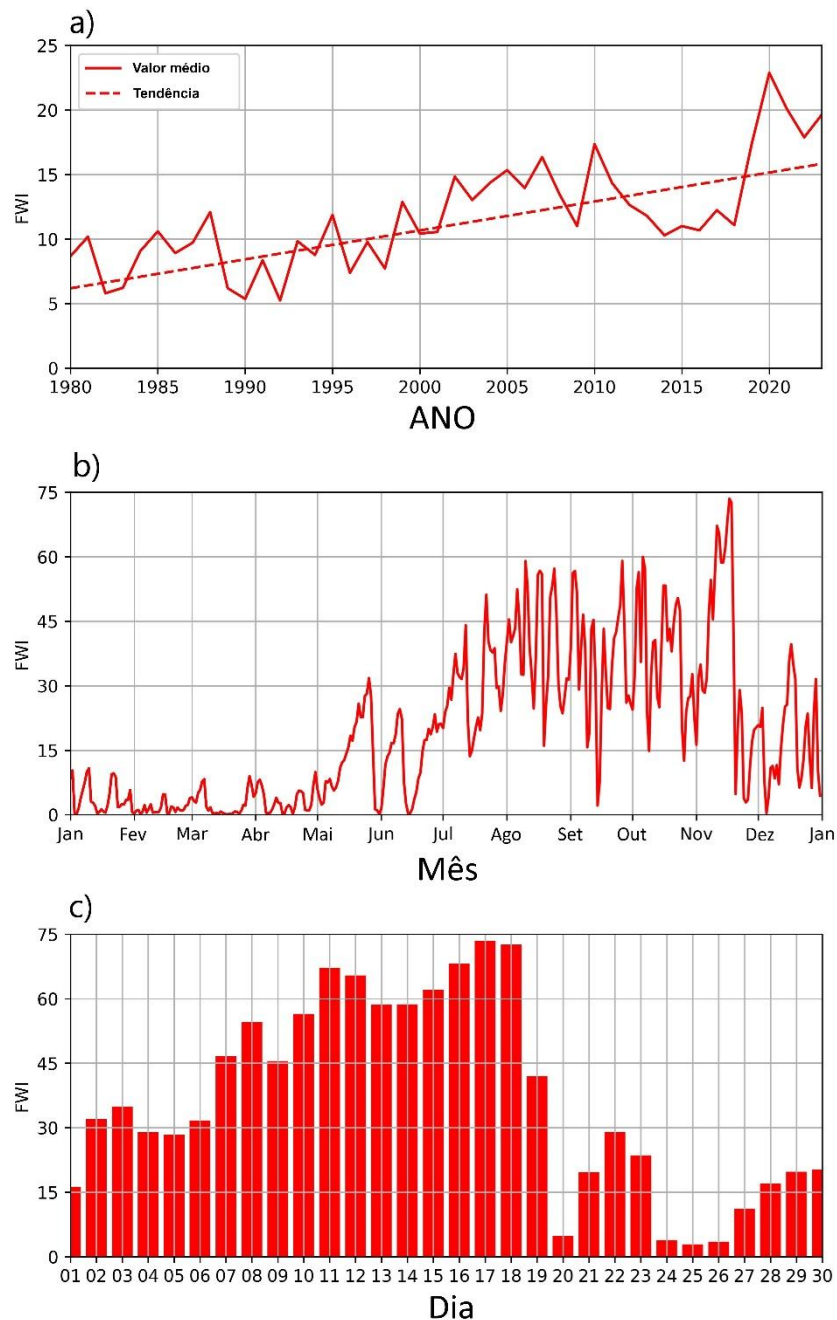


Figura 3 – Índice meteorológico de fogo na região do Pantanal: a) média anual entre 1980 e 2023, b) média mensal durante 2023, e c) média diária durante novembro de 2023.

Ao considerar a média diária do FWI, a Figura 3c indica valores extremos em meados de novembro, com máxima acima de 70 no dia 17. Entretanto, vale destacar que o dia 12 de novembro apresenta uma média diária de FWI acima de 60, estando entre os 6 dias com maior FWI no mês. Este dia também foi precedido por um dia com risco meteorológico de fogo extremo.

## Incêndios no dia 12 de novembro de 2023

A identificação dos incêndios por satélite é apresentada na Figura 4, que ilustra a distribuição espacial dos focos de calor ao longo do dia 12 de novembro de 2023. É possível identificar uma região com alta concentração de incêndios na região Sul do Pantanal, ocorrendo essencialmente no final da tarde do dia 12 de novembro. Este é o evento previamente estudado por Couto et al. (2024b), que se estendeu até 15 de novembro de 2023. No entanto, o presente estudo destaca duas regiões extensas com focos ativos de fogo no norte do Pantanal em 12 de novembro. A distribuição espacial e temporal desses incêndios indica que houve dois períodos em que o fogo se propagou rapidamente, o primeiro entre 1200 UTC e 1500 UTC (PERÍODO I), e o segundo período após 2100 UTC (PERÍODO II).

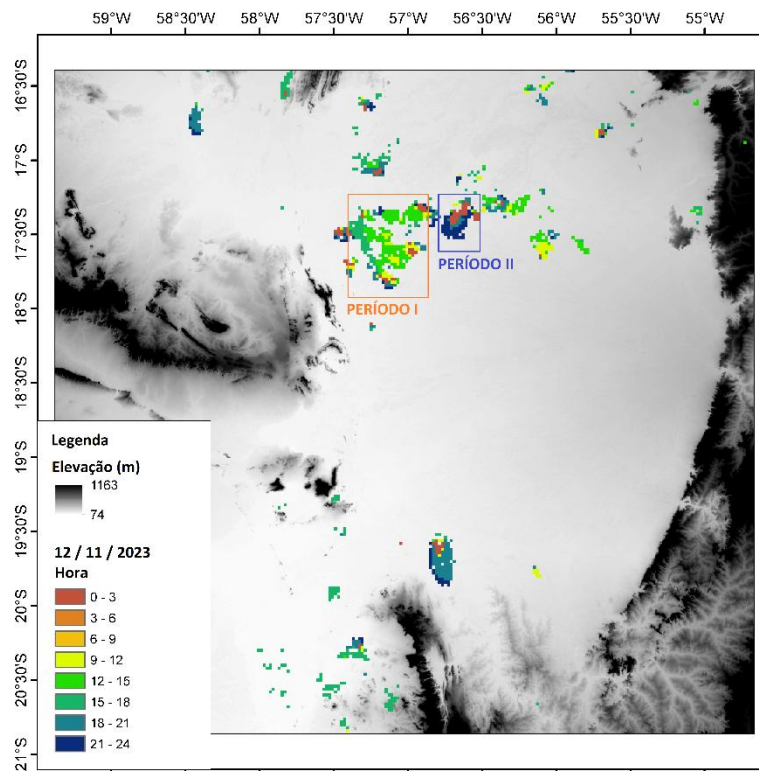


Figura 4 – Distribuição espacial dos focos de calor do GOES-16 em 12 de novembro de 2023.

## Meteorologia do fogo

Esta subseção explora a dinâmica atmosférica na região norte do Pantanal com base na simulação numérica com resolução de 500 m, buscando encontrar respostas para a alta concentração de focos de calor e extensa área queimada ao longo do dia 12 de novembro. A análise meteorológica é dividida em dois períodos com base na Figura 4, PERÍODO I (início da tarde) e PERÍODO II (início da noite).

## PERÍODO I: Meteorologia do fogo

A Figura 5 mostra a distribuição espacial da temperatura e umidade relativa perto da superfície às 1400 UTC, e rajadas de vento às 1300 e 1400 UTC. A temperatura apresenta maior extensão espacial de valores em torno de 40 °C (Figura 5a). Além disso, a maior parte do Pantanal apresenta valores de umidade relativa abaixo de 40 % neste período (Figura 5b).

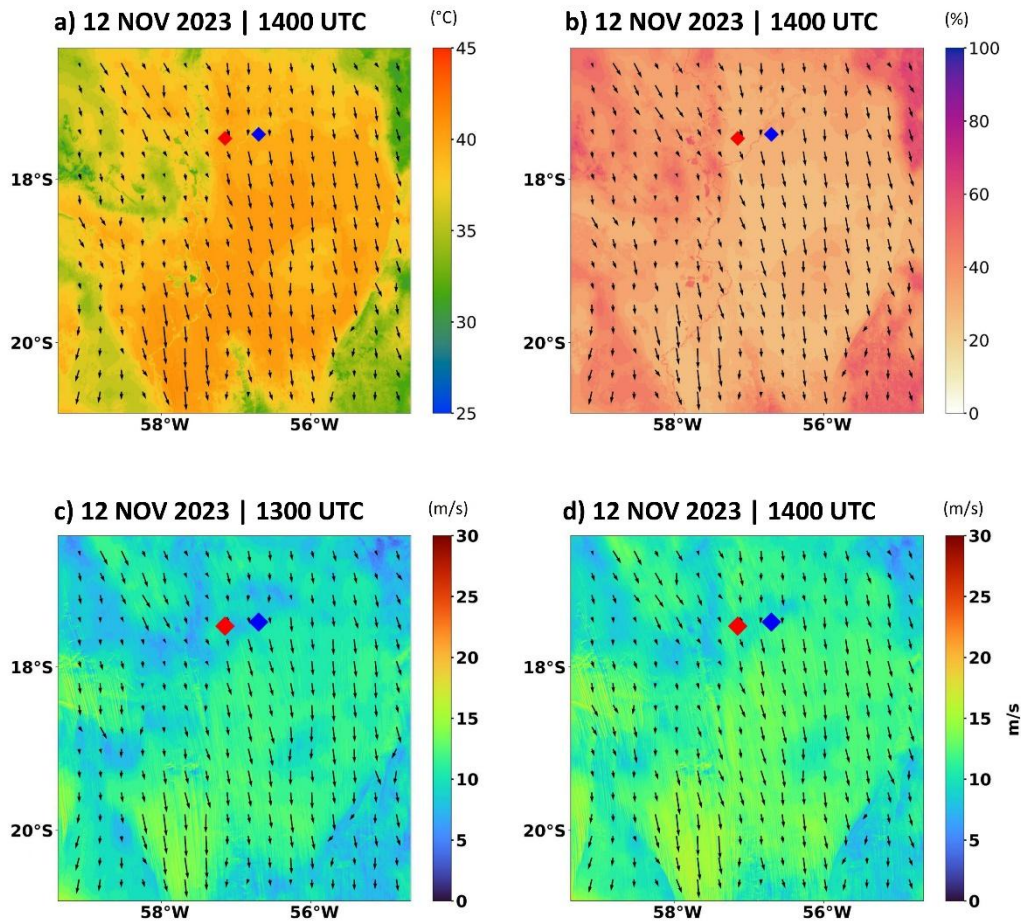


Figura 5 – Variáveis meteorológicas simuladas com resolução de 500 m durante o Período I: a) temperatura a 2 m, b) umidade relativa a 2 m, c) e d) rajadas de vento a 10 m. As setas representam os vetores do vento perto da superfície. Os ícones representam os períodos de maior propagação de incêndios: o vermelho corresponde ao Período I e o azul ao Período II identificados na Figura 4.

Em relação aos ventos próximos à superfície, rajadas de vento mais fracas foram simuladas durante a manhã (não mostradas), intensificando-se a partir do final da manhã, atingindo velocidades superiores a 10 m/s sobre o Pantanal ao longo da tarde. As Figuras 5c e 5d mostram um escoamento de norte afetando a região dos incêndios. Este resultado para o primeiro período indica condições meteorológicas favoráveis à propagação do fogo no início da tarde.

**PERÍODO II: Meteorologia do fogo**

As Figuras 6 e 7 representam as condições meteorológicas do segundo período. As figuras mostram temperaturas acima de 35 °C às 2200 UTC (Figura 6a), bem como baixa umidade relativa (<40 %, Figura 6b). Em relação às rajadas de vento, a Figura 7a mostra uma frente de rajada (linha tracejada) ao norte da região dos incêndios que se desloca para o sul (Figura 7b), atingindo o fogo por volta da meia-noite (Figura 7c).

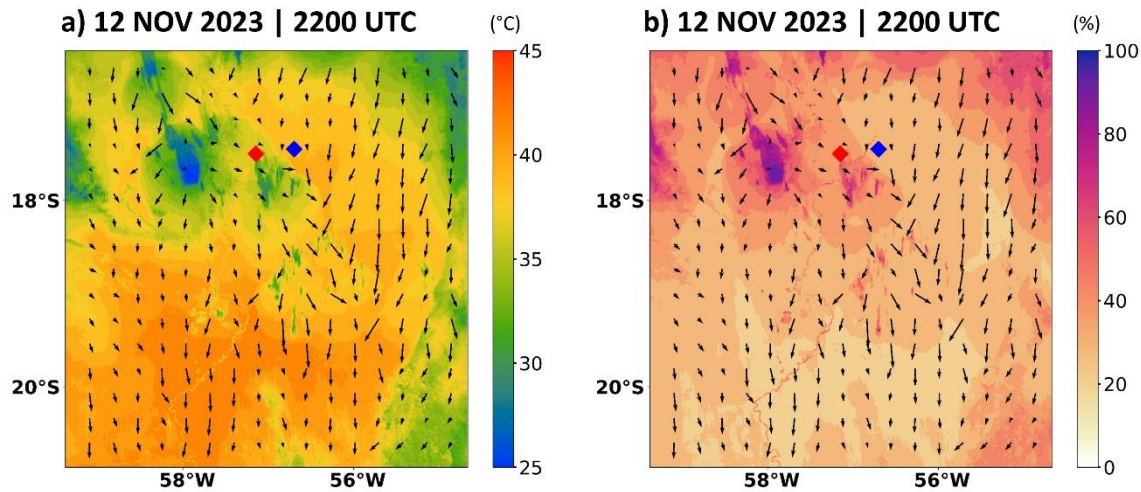


Figura 6 – Variáveis meteorológicas em 12 de novembro de 2023: a) temperatura a 2 m, b) umidade relativa a 2 m. As setas representam os vetores do vento perto da superfície. Os ícones representam os períodos de maior propagação de incêndios: o vermelho corresponde ao Período I e o azul ao Período II identificados na Figura 4.

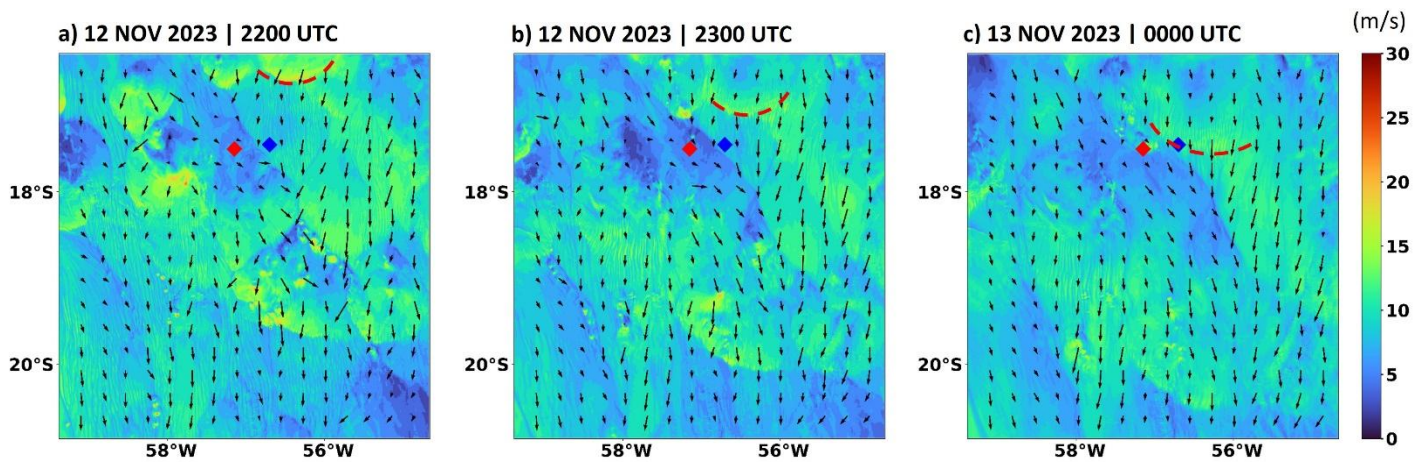


Figura 7 – Rajadas de vento a 10 m simuladas com resolução de 500 m durante o Período II: a) 2200 UTC, b) 2300 UTC em 12 de novembro, e c) 0000 UTC em 13 de novembro de 2023. As setas representam os vetores do vento perto da superfície. Os ícones representam os períodos de maior propagação de incêndios: o vermelho corresponde ao Período I e o azul ao Período II identificados na Figura 4. A linha a tracejado representa a frente de rajada.

### Outras condições propensas aos incêndios florestais

As duas subseções anteriores sugerem que os incêndios florestais ocorridos na planície norte do Pantanal em 12 de novembro foram influenciadas tanto por uma circulação de larga escala (PERÍODO 1) quanto por uma circulação de mesoescala (PERÍODO 2). No entanto, esta seção chama a atenção para o desenvolvimento de frentes de rajadas. As Figuras 8a-8d demonstram um exemplo de uma situação simulada no final da tarde próximo aos incêndios florestais, que, segundo o modelo, não estava diretamente associada ao desenvolvimento do fogo. O campo de rajadas de vento destaca o desenvolvimento de escoamentos marcados pela existência de uma frente pronunciada com maior intensidade de vento (cores amarelas), expandindo seu tamanho consideravelmente de 1800 UTC para 2000 UTC.

As Figuras 8e-8h mostram a soma total de hidrometeoros, ou seja, a integração vertical do conteúdo de água líquida (gotas de chuva e gotículas de nuvens) e água congelada (graupel, neve e cristais de gelo). É possível observar o desenvolvimento de núcleos convectivos isolados e, para uma análise mais detalhada, o estudo considerará apenas o núcleo convectivo com a maior concentração de hidrometeoros (Figura 8f).

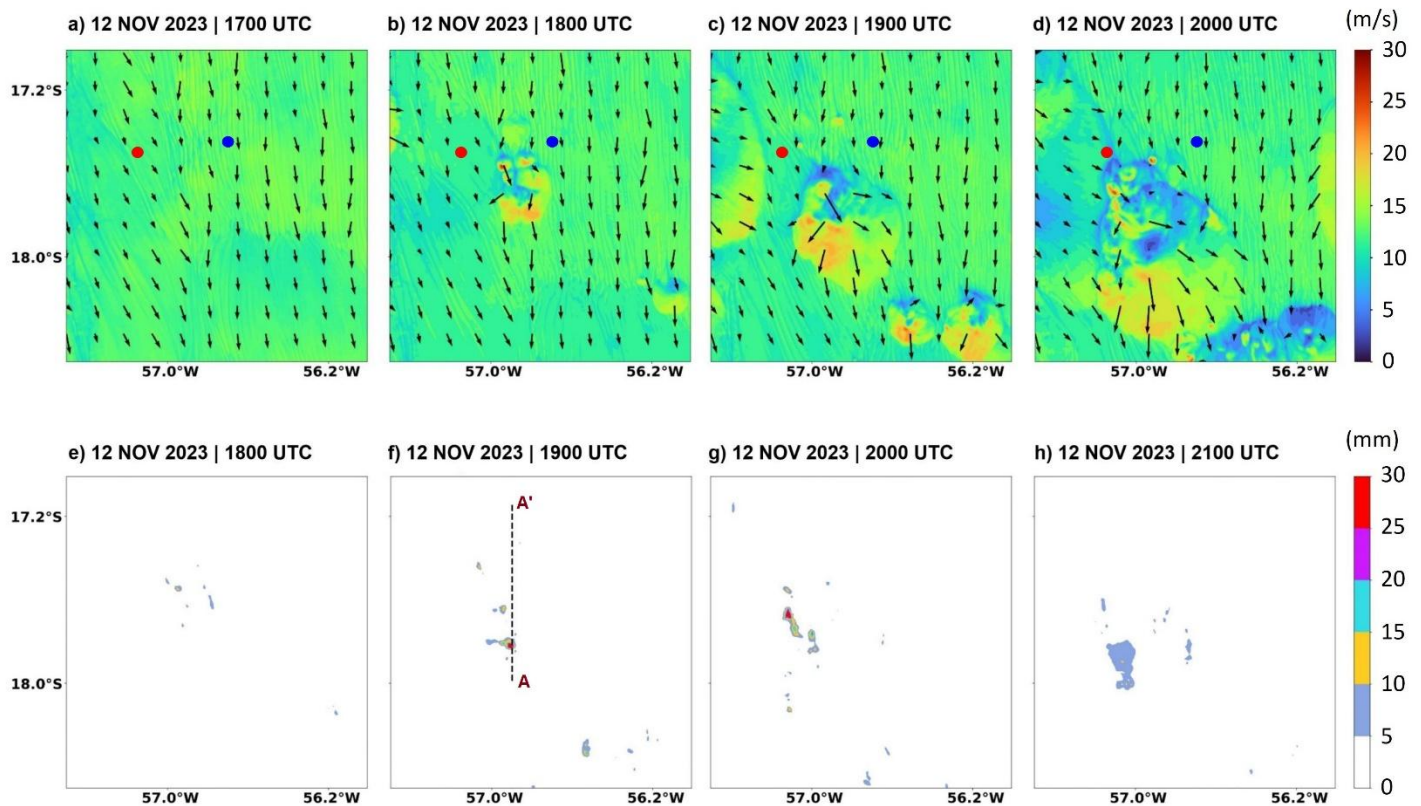


Figura 8 – Rajadas de vento a 10 m simuladas com resolução horizontal de 500 m durante o final da tarde: a) 1700 UTC, b) 1800 UTC, c) 1900 UTC e d) 2000 UTC em 12 de novembro de 2023. As setas representam os vetores de vento perto da superfície. Concentração de hidrometeoros e) às 1800 UTC, f) às 1900 UTC, a linha tracejada A-A' indica a localização da seção transversal vertical, g) às 2000 UTC, e h) às 2100 UTC. Os ícones representam os períodos de maior propagação de incêndios: o vermelho corresponde ao Período I e o azul ao Período II identificados na Figura 4.

A partir da seção transversal vertical apresentada na Figura 9a, é possível destacar a presença de uma nuvem isolada do tipo cumulonimbus (Cb). Essa nuvem se estende até aproximadamente 14 km de altitude e encontra-se num estágio maduro de desenvolvimento, com a presença de uma região de corrente descendente (cores azuis, Figura 9b), que está associada a um intenso movimento vertical descendente e que explica a formação do escoamento radial na superfície. Ao observar os campos de temperatura e umidade relativa da superfície, pode-se observar que esse movimento vertical descendente está relacionado ao ar mais frio e úmido (Figuras 9c e 9d, respectivamente).

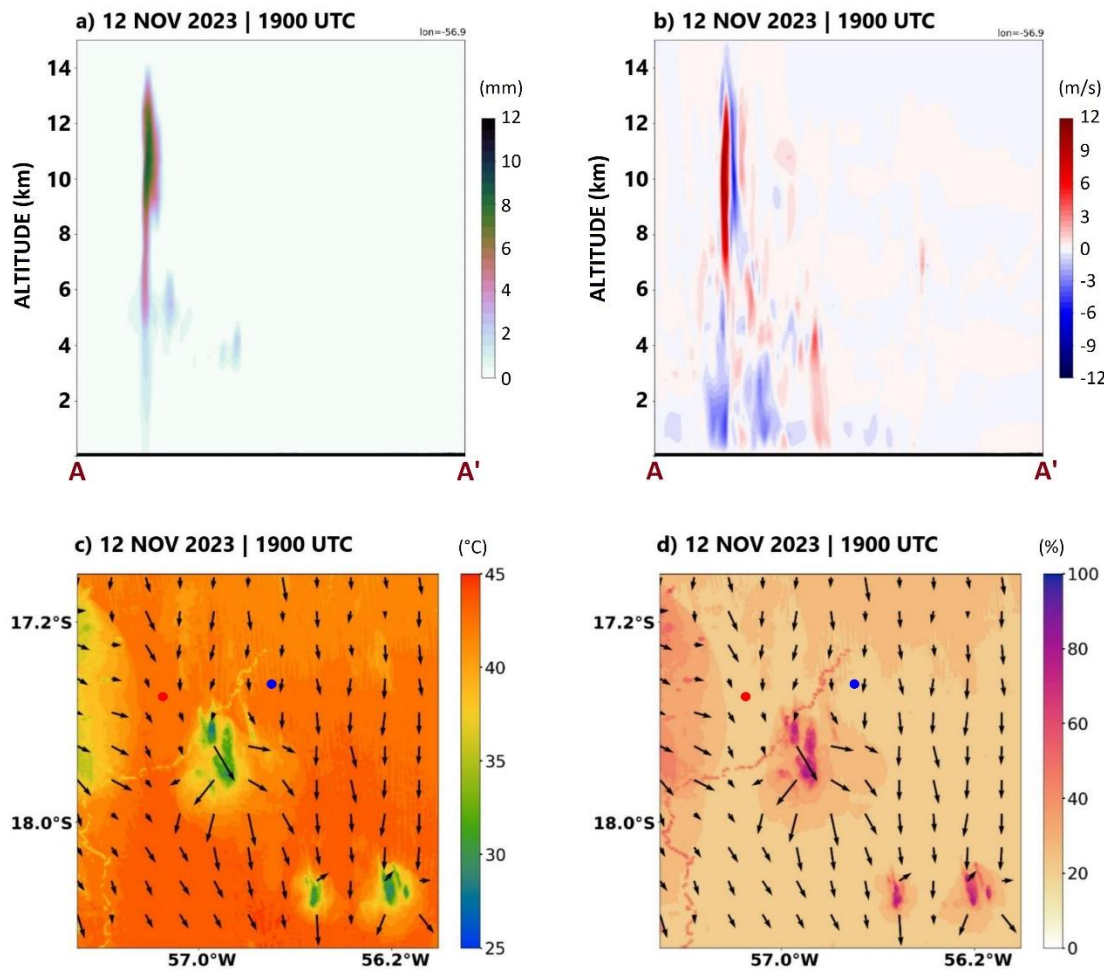


Figura 9 – Seção transversal vertical A-A' de a) concentração total de hidrometeoros às 1900 UTC, e b) velocidade vertical às 1900 UTC. Variáveis meteorológicas de incêndio c) temperatura do ar a 2 m às 1900 UTC, e d) umidade relativa a 2 m às 1900 UTC. As setas representam os vetores de vento perto da superfície. Os ícones em (c) e (d) representam os períodos de maior propagação de incêndios: o vermelho corresponde ao Período I e o azul ao Período II identificados na Figura 4.

A Figura 10 ilustra as condições meteorológicas às 1700 UTC, horas antes do período analisado na Figura 9. A Figura 10a mostra o diagrama termodinâmico Skew-T/Log-P para 1700 UTC, mostrando uma camada de ar quente e seco na troposfera inferior, favorecendo o desenvolvimento de nuvens de base alta. Uma seção

transversal vertical através do ponto no diagrama termodinâmico, Figura 10b, indica correntes ascendentes horas antes do início do desenvolvimento de nuvens convectivas profundas e do desenvolvimento das correntes verticais descendentes. A Figura 10c indica conteúdo de água precipitável acima de 50 mm no norte do Pantanal. Como a camada seca e quente está nos níveis mais baixos, a Figura 10c sugere a presença de umidade em níveis mais altos.

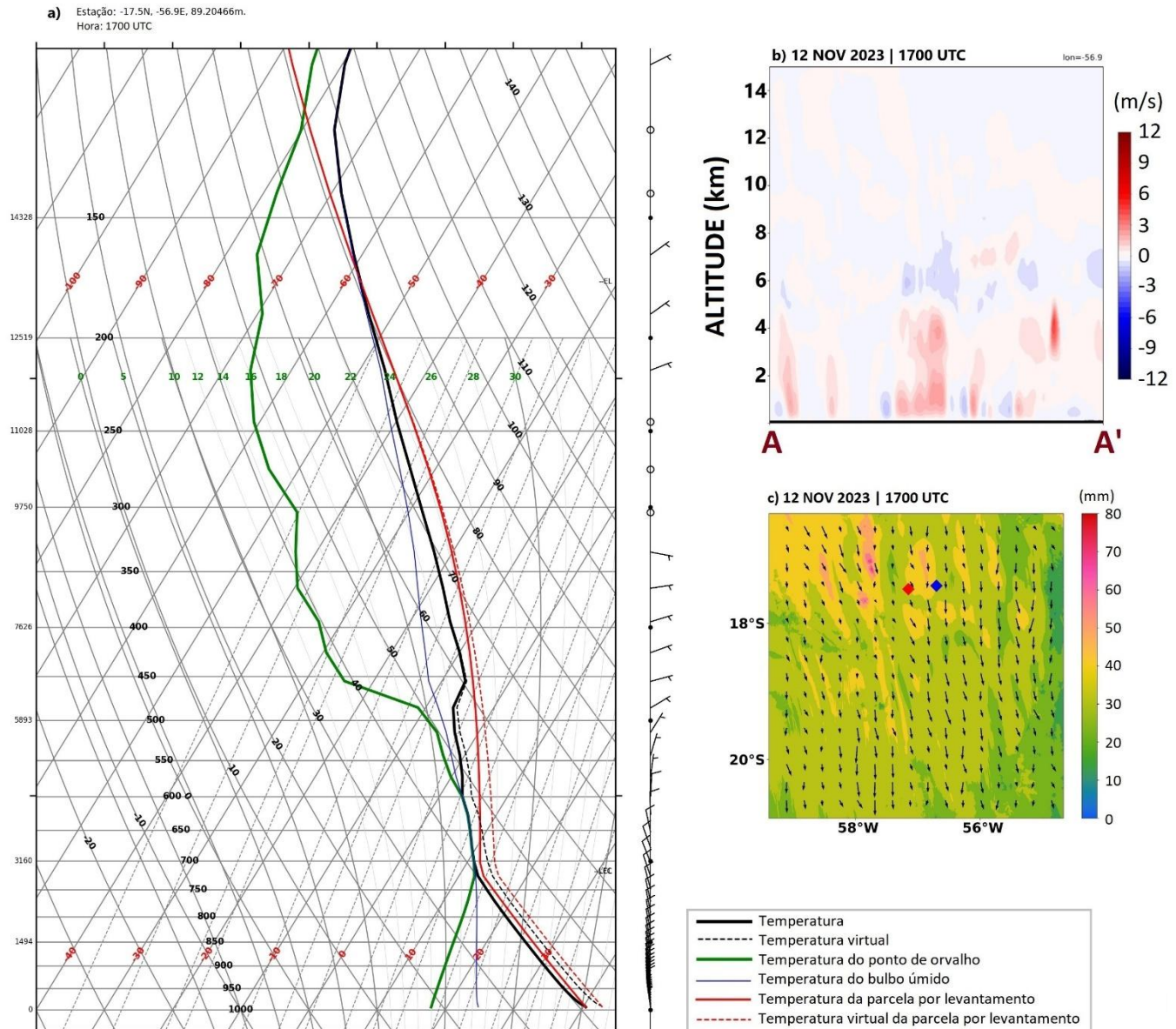


Figura 10 – a) Diagrama Skew-T/Log-P às 1700 UTC, b) Seção transversal vertical A-A' da velocidade vertical, e c) Conteúdo de água precipitável às 1700 UTC. As setas representam os vetores do vento perto da superfície. Os ícones em (c) representam os períodos de maior propagação de incêndios: o vermelho corresponde ao Período I e o azul ao Período II identificados na Figura 4.

O estudo revela a complexidade do estudo da meteorologia do fogo no Pantanal quando se considera a escala sub-diária. Mudanças nas condições meteorológicas ao longo do dia, particularmente a partir do desenvolvimento da camada limite planetária, podem levar ao desenvolvimento de nuvens convectivas, às vezes caracterizadas como Cb, que dão origem a rajadas de vento intensas que dificultam a previsão do comportamento do vento na superfície.

Em geral, vários fatores podem causar uma mudança abrupta no campo de ventos afetando os incêndios, seja em um contexto de mesoescala ou em uma circulação criada na escala do fogo, particularmente durante os incêndios que criam sua própria meteorologia (Fromm et al., 2010; Werth et al., 2011; Couto et al., 2024a). No entanto, o presente estudo não considera o fogo na simulação, e então esses fenômenos de interações fogo-atmosfera são negligenciados aqui. No entanto, a simulação atmosférica revela um ambiente em que as condições meteorológicas de mesoescala podem ser importantes para o desenvolvimento de frentes de rajadas na região do Pantanal. O desenvolvimento de movimentos convectivos e frentes de rajadas é reconhecido como um fator importante para o desenvolvimento dos incêndios florestais (Haines et al., 1988; Potter et al., 2017). Em algumas regiões, como na Península Ibérica, a ocorrência deste fenômeno foi identificada como um fator de aumento do perigo de fogo (Purificação et al., 2024) e, num caso específico, de influência no ambiente de um grande incêndio florestal (Couto et al., 2020).

Este fenômeno é amplamente reconhecido por criar situações críticas para bombeiros em todo o mundo. Embora este ambiente tenha sido inicialmente identificado como associado à dinâmica do comportamento inesperado do fogo no sul do Pantanal (Couto et al., 2024b), este estudo reforça o papel significativo das frentes de rajadas na propagação do fogo, uma vez que o PERÍODO II também foi favorecido por tal fenômeno. Além disso, nossas descobertas confirmam que o uso de modelagem atmosférica pode ajudar a entender os ambientes de fogo, especialmente durante situações complexas, conforme identificado em 12 de novembro. Em resumo, as condições em escala sinótica podem influenciar a temperatura e a umidade do ar próximo à superfície, que são variáveis determinantes para a inflamabilidade do combustível. Por outro lado, entender os padrões meteorológicos de mesoescala é importante para prever o comportamento do vento, um fator crucial na propagação do fogo.

Embora o risco meteorológico de incêndios em 2023 não tenha sido tão crítico quanto em 2020, ele ainda é significativo. Além disso, a tendência positiva no FWI sugere que as alterações climáticas influenciaram o FWI nas últimas décadas. Como muitas regiões em todo o mundo que estão experimentando o aumento da ocorrência de fogo devido às influências climáticas, a região do Pantanal também pode se tornar mais suscetível

a eventos extremos, e vários estudos mostraram o papel crítico das condições climáticas nos incêndios devastadores na região do Pantanal (Teodoro et al., 2022; Libonati et al., 2022; Pelissari et al., 2023).

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo mostra a importância do uso de diferentes fontes de dados para entender a dinâmica dos incêndios florestais no Pantanal. Dados de modelagem atmosférica mostraram-se úteis para complementar informações obtidas através da geoinformação.

Em resumo, foram identificados dois momentos distintos com grande concentração de número de focos de calor no dia 12 de novembro de 2023: um no início da tarde e outro no final do dia. De acordo com o modelo, dois tipos de circulação afetaram as regiões. O primeiro foi relacionado à circulação em grande escala, e o segundo ao desenvolvimento de uma frente de rajada que atingiu o local dos incêndios. No entanto, ambos os eventos ocorreram sob influência de condições meteorológicas propícias ao fogo, ou seja, temperaturas acima de 35 °C e umidade relativa do ar abaixo de 40 %. Além disso, o estudo destaca que este dia apresentou um risco meteorológico extremo de incêndio, o que foi associado a um período crítico de risco de fogo na primeira quinzena de novembro. Vale ressaltar que o estudo identificou claramente uma sazonalidade no perigo meteorológico de incêndio para o ano de 2023, bem como uma tendência positiva no aumento do risco de fogo nos últimos 40 anos, com máximos significativos a partir de 2000 e uma condição extrema em 2020, a qual favoreceu a catástrofe vivenciada no Pantanal naquele ano.

É importante destacar que o estudo não considerou a interação fogo-atmosfera na simulação, o que significa que os resultados não levam em conta os fenômenos que podem ocorrer a partir dessa interação, por exemplo, tempestades geradas por fogo e rajadas de vento intensas associadas. Portanto, o estudo apresenta, de forma exploratória através de simulações numéricas, o contexto meteorológico que pode ter afetado o desenvolvimento dos incêndios florestais identificados a partir das informações de satélite.

O estudo sobre a meteorologia do fogo no Pantanal está em andamento, e trabalhos futuros têm sido direcionados para o estudo das condições atmosféricas durante outros incêndios, em particular aqueles que ocorreram em diferentes estações e que podem ser afetados por diferentes condições meteorológicas. Esse conhecimento dos padrões atmosféricos que podem aumentar o risco de fogo na região é essencial para o desenvolvimento tanto de planos de combate aos incêndios florestais quanto de estratégias para ações de prevenção.

## Agradecimentos

Esta pesquisa foi cofinanciada pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. no âmbito do projeto PyroC.pt (Refs. PCIF/MPG/0175/2019), UIDB/06107 – Centro de Investigação Científica e Tecnológica em Sistemas de Terra e Energia (CREATE). Filipe L. M. Santos é financiado pela FCT, no âmbito do projeto 2022.11960.BD com o identificador DOI <https://doi.org/10.54499/2022.11960.BD>.

## V. REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T.; WILLIAMS, A. P. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 42, p. 11770–11775, 2016.
- ANDRADE, N.; COUTO, F. T.; SERRA, J. Assessing Fire Risk Perception in the Vale do Guadiana Natural Park, Portugal. *Fire*, v. 6, n. 6, p. 243–243, 2023.
- BAKHSHAI, A.; JOHNSON, E. A. A review of a new generation of wildfire–atmosphere modeling. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 49, n. 6, p. 565–574, 2019.
- BOIN, M. N.; MARTINS, P. C. S.; DA SILVA, C. A. et al. Pantanal: The Brazilian Wetlands. *Geography of the physical environment*, p. 75–91, 2019.
- BRADSTOCK, R.; PENMAN, T.; BOER, M. et al. Divergent responses of fire to recent warming and drying across south-eastern Australia. *Global Change Biology*, v. 20, n. 5, p. 1412–1428, 2014.
- BURTON, C. Climate change is increasingly affecting fires worldwide. *Nature Climate Change*, v. 14, p. 1123–1124, 2024.
- CARRILLO, J.; PÉREZ, J. C.; EXPÓSITO, F. J. et al. Projections of wildfire weather danger in the Canary Islands. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 8093, 2022.
- CENTRE, UNESCO World Heritage. Pantanal Conservation Area. UNESCO World Heritage Centre. Disponível em: <<https://whc.unesco.org/en/list/999/>>. Acesso em: fev. 2025.
- CHANG, D. Y.; JEONG, S.; PARK, C. -E. et al. Unprecedented wildfires in Korea: Historical evidence of increasing wildfire activity due to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 348, n. 2024, p. 109920, 2024.
- COUTO, F. T.; DUCROCQ, V.; SALGADO, R. et al. Numerical simulations of significant orographic precipitation in Madeira Island. *Atmospheric Research*, v. 169, n. 2016, p. 102–112, 2016.
- COUTO, F. T.; IAKUNIN, M.; SALGADO, R. et al. Lightning modelling for the research of forest fire ignition in Portugal. *Atmospheric Research*, v. 242, n. 2020, p. 104993, 2020.
- COUTO, F. T.; HENRIQUE, E.; COSTA, M. J. et al. How a mesoscale cyclonic vortex over Sahara leads to a dust outbreak in South-western Iberia. *Atmospheric Research*, v. 249, n. 2021, p. 105302–105302, 2021.
- COUTO, F. T.; SANTOS, F. L. M.; CAMPOS, C. et al. Is Portugal Starting to Burn All Year Long? The Transboundary Fire in January 2022. *Atmosphere*, v. 13, n. 10, p. 1677, 2022.
- COUTO, F. T.; FILIPPI, J. -B.; BAGGIO, R. et al. Numerical investigation of the Pedrógão Grande pyrocumulonimbus using a fire to atmosphere coupled model. *Atmospheric Research*, v. 299, n. 2024, p.

107223, 2024a.

COUTO, F. T.; SANTOS, F. L. M.; CAMPOS, C. et al. A Case Study of the Possible Meteorological Causes of Unexpected Fire Behavior in the Pantanal Wetland, Brazil. *Earth*, v. 5, n. 3, p. 548–563, 2024b.

CUXART, J.; BOUGEAULT, P.; REDELSPERGER, J. -L. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 126, n. 562, p. 1–30, 2000.

DE BARROS, A. E.; MORATO, R. G.; FLEMING, C. H. et al. Wildfires disproportionately affected jaguars in the Pantanal. *Communications Biology*, v. 5, n. 1, p. 1028, 2022.

DI VIRGILIO, G.; EVANS, J. P.; BLAKE, S. A. P. et al. Climate Change Increases the Potential for Extreme Wildfires. *Geophysical Research Letters*, v. 46, n. 14, p. 8517–8526, 2019.

DOWDY, A. J. Climatological Variability of Fire Weather in Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 57, n. 2, p. 221–234, 2018.

DOWDY, A. J.; YE, H.; PEPLER, A. et al. Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 10073, 2019.

DUPUY, J. -I.; FARGEON, H.; MARTIN-STPAUL, N. et al. Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. *Annals of Forest Science*, v. 77, n. 2, 2020.

FROMM, M.; LINDSEY, D. T.; SERVRANCKX, R. et al. The Untold Story of Pyrocumulonimbus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 91, n. 9, p. 1193–1210, 2010.

HAINES, D. A. Downbursts and Wildland Fires: A Dangerous Combination. In: *Fire Management Notes - Volume 49, No.3*. [s.l.]: Forest Service - United States Department of Agriculture, 1988, p. 8–10.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>.

KIM, M. -K.; JAKUS, P. M. Wildfire, national park visitation, and changes in regional economic activity. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, v. 26, n. 2019, p. 34–42, 2019.

LAC, C.; CHABOUREAU, J. -P.; MASSON, V. et al. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, v. 11, n. 5, p. 1929–1969, 2018.

LANG, S. et al. IFS upgrade brings many improvements and unifies medium-range resolutions METEOROLOGY EARTH SYSTEM SCIENCE. ECMWF Feature article, 2023. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/072023/81380-ifs-upgrade-brings-many-improvements-and-unifies-medium-range-resolutions.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2025.

LIBONATI, R.; GEIRINHAS, J. L.; SILVA, P. S. 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, p. 015005, 2022.

MASSON, V.; CHAMPEAUX, J. -L.; CHAUVIN, F. et al. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *Journal of Climate*, v. 16, n. 9, p. 1261–1282, 2003.

MASSON, V.; LE MOIGNE, P.; MARTIN, E. et al. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, v. 6, n. 4, p. 929–960, 2013.

MATAVELI, G. A. V.; PEREIRA, G.; DE OLIVEIRA, G. et al. 2020 Pantanal's widespread fire: short- and long-term implications for biodiversity and conservation. *Biodiversity and Conservation*, v. 30, n. 11, p. 3299–3303, 2021.

- MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D. et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 102, n. D14, p. 16663–16682, 1997.
- NACHTERGAELE, F.; VAN VELTHUIZEN, H.; VERELST, L. et al. Harmonized World Soil Database. [s.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/aq361e/aq361e.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- PARENTE, J.; PEREIRA, M. G.; AMRAOUI, M. et al. Heat waves in Portugal: Current regime, changes in future climate and impacts on extreme wildfires. *Science of The Total Environment*, v. 631-632, p. 534–549, 2018.
- PEACE, M.; GREENSLADE, J.; YE, H. et al. Simulations of the Waroona fire using the coupled atmosphere–fire model ACCESS-Fire. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, v. 72, n. 2, p. 126–138, 2022.
- PEACE, M.; YE, H.; GREENSLADE, J. et al. The Destructive Sir Ivan Fire in New South Wales, Australia; Simulations Using a Coupled Fire–Atmosphere Model. *Fire*, v. 6, n. 11, p. 438–438, 2023.
- PERGAUD, J.; MASSON, V.; MALARDEL, S. et al. A Parameterization of Dry Thermals and Shallow Cumuli for Mesoscale Numerical Weather Prediction. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 132, n. 1, p. 83–106, 2009.
- PINTY, J. -P.; JABOUILLE, P. A mixed-phase cloud parameterization for use in mesoscale non-hydrostatic model: Simulations of a squall line and of orographic precipitations. *Amer. Meteor. Soc.*, p. 217–220, 1998.
- POTT, A.; POTT, V. J. Features and conservation of the Brazilian Pantanal wetland. *Wetlands Ecology and Management*, v. 12, n. 6, p. 547–552, 2004.
- POTTER, B. E.; HERNANDEZ, J. R. Downdraft outflows: climatological potential to influence fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire*, v. 26, n. 8, p. 685–685, 2017.
- PURIFICAÇÃO, C.; CAMPOS, C.; HENKES, A.; COUTO, F. T. Exploring the atmospheric conditions increasing fire danger in the Iberian Peninsula. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 150, n. 763, p. 3475–3494, 2024.
- RAPHAEL, M. N. The Santa Ana Winds of California. *Earth Interactions*, v. 7, n. 8, p. 1–13, 2003.
- ROLINSKI, T.; CAPPS, S. B.; ZHUANG, W. Santa Ana Winds: A Descriptive Climatology. *Weather and Forecasting*, v. 34, n. 2, p. 257–275, 2019.
- SENANDE-RIVERA, M.; INSUA-COSTA, D.; MIGUEZ-MACHO, G. Climate change aggravated wildfire behaviour in the Iberian Peninsula in recent years. *npj Climate and Atmospheric Science*, v. 8, n. 1, 2025.
- SHARPLES, J. J. An overview of mountain meteorological effects relevant to fire behaviour and bushfire risk. *International Journal of Wildland Fire*, v. 18, n. 7, p. 737, 2009.
- SILVA, P. S.; RODRIGUES, J. A.; NOGUEIRA, J. et al. Joining forces to fight wildfires: Science and management in a protected area of Pantanal, Brazil. *Environmental Science & Policy*, v. 159, n. 2024, p. 103818–103818, 2024.
- SILVA, F. R.; CÂMARA, S. F.; PINTO, F. R. et al. Machine learning application to assess deforestation and wildfire levels in protected areas with tourism management. *Journal for nature conservation*, v. 74, p. 126435–126435, 2023.
- SRTM 90m Digital Elevation Database - CGIAR Platform for Big Data in Agriculture. CGIAR Platform for Big Data in Agriculture. Disponível em: <<https://bigdata.cgiar.org/srtm-90m-digital-elevation-database/>>. Acesso em: jan. 2025.
- PELISSARI, T. D.; TEODORO, P. E.; PEREIRA, L. et al. Dynamics of major environmental disasters involving fire in

the Brazilian Pantanal. Scientific reports, v. 13, n. 1, 2023.

TEODORO, P. E.; MARIA, L. S.; RODRIGUES, J. M. A. et al. Wildfire Incidence throughout the Brazilian Pantanal Is Driven by Local Climate Rather Than Bovine Stocking Density. Sustainability, v. 14, n. 16, p. 10187, 2022.

THAPA, B.; CAHYANTO, I.; HOLLAND, S. M. et al. Wildfires and tourist behaviors in Florida. Tourism Management, v. 36, n. 2013, p. 284–292, 2013.

TOMAS, W. M.; BERLINCK, C. N.; CHIARAVALLOTI, 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, n. 1, p. 23547, 2021.

WAGNER, V. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Headquarters, Ottawa: Canadian Forestry Service, 1987. Disponível em: <<https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/entities/publication/d96e56aa-e836-4394-ba29-3afe91c3aa6c>>.

WERTH, P. M.; POTTER, B. J.; CLEMENTS, C. B. et al. Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: volume I for fire managers. [s.l.]: Forest Service - United States Department of Agriculture, 2011.

---