Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

AVALIAÇÃO DA FÓRMULA DE MONTE ALEGRE MODIFICADA APLICADA AOS DADOS DA FLONA DE IPANEMA, MERRA-2 E PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Modified Monte Alegre Formula applied to the Flona de Ipanema data, MERRA-2 and remote sensing products

Fórmula de Monte Alegre modificada aplicada a los datos de Flona de Ipanema, MERRA-2 y produtos de teledetección

Cássia Maria Leme Beu
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)
cassia.beu@gmail.com

Resumo: Uma avaliação com os dados meteorológicos da estação automática do INMET indicou que a Fórmula de Monte Alegre modificada é uma ferramenta adequada, tanto para a Flona de Ipanema, quanto para os municípios e organizações nos seus arredores para as atividades de prevenção e combate aos incêndios florestais. Os incêndios florestais, frequentes na estação seca, são desencadeados por ações antropogênicas e são uma das grandes preocupações dos gestores da Unidade de Conservação. Aproximadamente 75% dos eventos detectados na Flona de Ipanema entre 2009 e 2020 corresponderam às categorias de perigo "muito alto" e "extremo" da Fórmula de Monte Alegre modificada. Este resultado despertou a motivação para testar o uso de dados de sensoriamento remoto e produtos do MERRA-2 para a estimativa da Fórmula de Monte Alegre modificada. Apesar dos produtos serem superestimados quando comparados aos dados observacionais, mostraram-se úteis para auxiliar a monitoração das condições ambientais na prevenção de incêndios florestais, na ausência de dados observacionais. Anomalias sazonais ou anuais de precipitação (dados observacionais) não explicaram a tendência de aumento dos incêndios florestais. Por outro lado, a ocorrência de geadas seguida por anomalias de pressão atmosférica positivas e persistentes concentradas em um período inferior a 30 dias mostraram-se favoráveis à incidência de incêndios florestais.

Palavras-chave: Incêndios florestais. Reanálise. Chuva estimada por satélite. Prevenção de queimadas. Monitoramento ambiental.

Abstract: An evaluation with meteorological data from the INMET weather station indicated that the modified Monte Alegre Formula is a suitable tool, as for the Flona de Ipanema, as for its neighbors municipalities and organizations for the wildfire prevention and combat. The wildfires, usual during the dry season, are initiated by anthropogenic actions and are one of great worries of that Conservation Unit managers. About 75% of the detected events in the Flona de Ipanema between 2009 and 2020 corresponded to the "very high" and "extreme" danger categories of the modified Monte Alegre Formula. This result have waked the motivation to test the remote sensing data and the Merra-2 products to estimate the modified Monte Alegre Formula. Although those products are overestimated when compared

to the observational data, both remote sensing and MERRA-2 data are useful to monitor the environmental conditions against the wildfires if the observational data are unavailable. The rainfall seasonal and annual anomalies (observational data) did not explain the rise tendency of the wildfires. However, the frosts followed by positive and persistent atmospheric pressure anomalies concentrated in a period of less than 30 days showed favor the occurrence of wildfire.
Keywords: Wildfires. Reanalysis. Rainfall satellite estimate. Fire prevention. Environmental monitoring.

Resumen: Una evaluación con datos meteorológicos de la estación automática del INMET indicó que la Fórmula de Monte Alegre modificada es una herramienta adecuada, tanto para la Flona de Ipanema, como para los municipios y organizaciones de su entorno para actividades de prevención y combate de incendios forestales. Los incendios forestales, frecuentes en la estación seca, son desencadenados por acciones antrópicas y constituyen una de las mayores preocupaciones de los gestores de la Unidad de Conservación. Aproximadamente el 75% de los eventos detectados en la Flona de Ipanema entre 2009 y 2020 correspondieron a las categorías de peligrosidad “muy alta” y “extrema” de la Fórmula de Monte Alegre modificada. Este resultado despertó la motivación para probar el uso de datos de teledetección y productos MERRA-2 para estimar la Fórmula de Monte Alegre modificada. Aunque los productos se sobreestiman en comparación con los datos de observación, demostraron ser útiles para ayudar a monitorear las condiciones ambientales en la prevención de incendios forestales, en ausencia de datos de observación. Las anomalías de las precipitaciones estacionales o anuales (datos de observación) no explicaron la tendencia creciente de los incendios forestales. Por otro lado, la ocurrencia de heladas seguidas de anomalías de presión atmosférica positivas y persistentes concentradas en un período menor a 30 días se mostró favorable a la incidencia de incendios forestales.
Palabras clave: Incendios forestales. Reanálisis. Precipitaciones estimadas por satélite. Prevención de fuego. Monitoreo ambiental

Submetido em: 30/03/2022
Aceito para publicação em: 16/12/2022
Publicado em: 20/12/2022

1. INTRODUÇÃO

Incêndios florestais têm efeitos devastadores e consequências de longo prazo na biodiversidade e serviços ambientais (BAKLANOV *et al.* 2021; SAHARJO e GOLDAMMER, 2021; BOWMAN *et al.*, 2009). A mensuração dos prejuízos econômicos é difícil, pois os efeitos de longo prazo no clima, recuperação do solo, regime de regulação hídrica e na saúde humana não são considerados (GERASKINA *et al.*, 2022). Estimativas produzidas a partir dos dados do satélite MODIS mostram que no período entre 2003 e 2016 todos os continentes foram atingidos por incêndios, excluindo-se apenas as áreas desérticas da África, da América do Sul, da Austrália, da Ásia e a Groenlândia (VAN DER WERF *et al.*, 2017). Os maiores percentuais anuais de área queimada foram detectados na faixa que abrange os trópicos (entre 23,5º N e 23,5º S), contribuindo com 84% das emissões globais de carbono originado de incêndios florestais (VAN DER WERF *et al.*, 2017). Os incêndios em savanas, localizadas principalmente na África, América do Sul, Ásia e Oceania, lançam na atmosfera, aproximadamente, 62% das emissões globais de carbono, estimadas em aproximadamente em 2,2 X 10^{12} kg de carbono por ano (VAN DER WERF *et al.*, 2017).

Westerling *et al.* (2006) identificaram um substancial aumento dos incêndios florestais, aumento da área queimada e da duração da temporada de incêndios na metade oeste dos EUA: a frequência média de incêndios no período entre 1986 e 2005 foi quase 4 vezes superior ao registrado nos 15 anos anteriores. Aumento da temperatura e da duração dos incêndios e expansão da área vulnerável são os fatores que contribuem para o aumento da atividade dos incêndios. Em 2021, o Nível de Preparação (uma escala de mobilização de recursos humanos e financeiros para combate aos incêndios) esteve no máximo por 68 dias, o mais longo desde o ano 2000, uma métrica importante para avaliar a atividade de incêndios nos EUA (CRSIF, 2022).

No sudeste da Austrália, a combinação do clima, com a topografia e a vegetação, tornam a região propensa à ocorrência de incêndios florestais severos. Dos quatro eventos severos registrados desde de 1939, o incêndio de 2009, que ficou conhecido como *Black Saturday,* foi responsável por 44% (173) das mortes associadas com incêndios florestais no estado de Victoria (CRUZ *et al.*, 2012). A nuvem pirocumulonimbus resultante do incêndio se estendeu por 60 km na horizontal e 15 km na vertical, produzindo relâmpagos e injetando

produtos da combustão na baixa estratosfera, onde permanecem por várias semanas e são transportados por longas distâncias.

A pluma de fumaça resultante dos incêndios nas savanas africanas (centro e oeste do continente) transportam aerossóis por longas distâncias e foram detectadas no sudeste do oceano Atlântico (WU, 2021). Este estudo mostrou que as propriedades físicas dos aerossóis provenientes das savanas africanas são subestimadas nos modelos de projeção climáticas em uso atualmente e merecem um tratamento específico para produzir resultados mais confiáveis.

Como destacado por Van der Werf *et al.* (2017), as queimadas da faixa tropical da América Sul contribuem com importantes quantidades das emissões globais, porém, os incêndios florestais se espalham para além dos trópicos. No sul da América do Sul (latitudes acima de 20º S), a atividade de incêndios está fortemente associada com condições anomalamente quentes resultantes da fase positiva do Modo Anular Sul (MAS). O MAS, também conhecido como Oscilação Antártica, é caracterizado por anomalias de pressão atmosférica no Polo Sul e a sua fase positiva (negativa) corresponde a anomalia negativa (positiva). O MAS, cuja fase positiva é forçada pelos gases do efeito estufa, está com tendência positiva. Os gases do efeito estufa também são forçantes para El Niño extremos, que por sua vez apresentam alta correlação com incêndios florestais no sul da América do Sul, diretamente e/ou combinado com o MAS (HOLZ *et al.*, 2017).

Castillo Soto, Saavedra e Brull (2019) analisaram os 3 incêndios que atingiram a região central do Chile em 2017, resultando na temporada mais catastrófica da história do país, cuja área atingida superou em 7 vezes a média anual dos incêndios florestais. Além da seca prolongada em curso, os incêndios ocorreram sob a combinação do MAS e El Niño (HOLZ *et al.*, 2017). Da análise de Castillo Soto, Saavedra e Brull (2019) resultou a sugestão para a revisão de planos, protocolos, programas e aspectos legislativos relacionados à gestão do manejo dos incêndios florestais. Os autores também identificaram a necessidade aprimorar a modelagem, tanto dos materiais combustíveis, quando dos modelos prognósticos de incêndios florestais.

Incêndio florestal é um problema recorrente no Brasil e com tendência crescente como mostram as estatísticas recentes. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) detectou em 2020 o segundo maior número de focos de queimadas desde 2010 (INPE, 2022)

e a maior extensão de área queimada desde o início da série histórica, em 1998 (PIVELLO *et al.*, 2021). No Brasil, os incêndios florestais desencadeiam uma série de impactos relacionados à saúde, visibilidade em rodovias e aeroportos, ameaça de extinção de espécies e mudanças climáticas (PIVELLO *et al.*, 2021). A análise de Liu *et al.* (2020) verificou que o impacto dos aerossóis produzidos por queima de biomassa em escala local em uma região tipicamente amazônica depende da concentração de aerossóis e é não linear. A taxa de redução da precipitação, por exemplo, apresenta forte sensibilidade à concentração de aerossóis que pode levar a secas severas.

Em agosto de 2019, uma densa pluma de fumaça proveniente das queimadas das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil cobriram a capital paulista. A pluma de fumaça bloqueou a incidência de radiação solar na superfície e escureceu o dia na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e em diversas outras regiões do estado. A chuva acinzentada que precipitou na RMSP, resultado da interação das gotas com a fumaça, continha uma quantidade de sulfetos 10 vezes maior do que a média normalmente observada em águas pluviais. Também foi detectada a presença de reteno na água da chuva, substância proveniente da queima de biomassa (AGÊNCIA FAPESP, 2019). Em seu artigo, Pivello *et al.* (2021) destacam que os incêndios florestais, seca e exploração madeireira nas florestas tropicais aumentam a suscetibilidade às queimadas por meio da fragmentação, inflamabilidade e ignição, enquanto o desflorestamento e a fumaça inibem a chuva e aumentam o perigo de incêndios.

Segundo Pivello *et al.* (2021), a implementação de um sistema de manejo, incluindo sistemas de monitoramento, é um dos passos essenciais para reduzir eventos extremos e suas consequências negativas. A gestão integrada de incêndios é construída com ferramentas tecnológicas e de comunicação que incorporam observações e previsões, cuja metodologia precisa ser validada, para disponibilizar resultados confiáveis (BAKLANOV *et al.* 2021). Iniciativas internacionais como as Conferências sobre Incêndios Florestais promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) são essenciais para o compartilhamento de conhecimento e experiências em ciência, manejo, capacitação e desenvolvimento de políticas sobre o fogo, pois, principalmente os países em desenvolvimento são deficientes em infraestrutura e ferramentas para a gestão dos incêndios florestais (GOLDAMMER, 2021).

No Brasil, os biomas podem ser divididos em 3 tipos: (a) sensíveis ao fogo (Floresta Amazônica e Mata Atlântica), (b) independente do fogo (a Caatinga) e (c) dependentes/influenciadas pelo fogo (Cerrado, Pantanal e Pampas). Com os objetivos de conservação da sociobiodiversidade, redução das áreas afetadas por incêndios florestais, mudança de estação e frequência de ocorrência, proteção de ambientes e espécies sensíveis, redução da emissão dos gases do efeito estufa e redução dos gastos nas operações de combate aos incêndios, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade implementou o Manejo Integrado do Fogo (MIF) nas áreas de proteção federal, de forma a promover o equilíbrio ambiental e as necessidades sociais. O MIF foi implementado no Cerrado, bioma em que a ignição natural é comum e produziu resultados positivos, com redução da área afetada por incêndios florestais. Já na Floresta Amazônica, a gestão é direcionada para o controle e exclusão do fogo. Nesse bioma, os incêndios em sua grande maioria são criminosos e tem provocado mudança do regime de baixa frequência e baixa intensidade para alta frequência e potencialmente alta severidade (BERLINCK E LIMA, 2021). Os autores concluíram que não existe uma estratégia única para todos os biomas brasileiros e seus diferentes ecossistemas, e portanto, cada área protegida precisa compreender seu regime de fogo e os fatores que podem interferir positiva e negativamente para atingir sua meta de conservação.

O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), em parceria com o Instituto de Mudanças Climáticas e Regulação de Serviços Ambientais do Acre (IMC), iniciaram um acordo de cooperação técnica para aprimorar a gestão de risco e desastre relacionados aos incêndios florestais (Anderson *et al.*, 2019). O monitoramento, juntamente com o conhecimento do risco, comunicação e capacidade de resposta constituem os 4 eixos fundamentais do sistema de alerta. Anderson *et al.* (2019), propuseram então, um modelo conceitual para a gestão do risco no qual se inclui mais um eixo: a capacidade de prevenção que deve ser subsidiada pelo conhecimento do risco e pelo monitoramento. Fica evidente do trabalho de Anderson *et al.* (2019) que a gestão de risco deve ser adequada à realidade local.

Nesta linha, o objetivo deste trabalho foi avaliar o perigo de incêndios florestais na Floresta Nacional de Ipanema (Flona de Ipanema) adotando a Fórmula de Monte Alegre modificada (EUGENIO *et al.*, 2021), como uma ferramenta auxiliar para o monitoramento e gestão da prevenção e do combate aos incêndios florestais. Considerando-se o modelo

conceitual proposto por Anderson *et al.* (2019), a Fórmula de Monte Alegre modificada (EUGENIO *et al.*, 2021), insere-se na gestão de risco para subsidiar as 2 próximas etapas: a comunicação (educação e emissão de alertas) e a prevenção (ações para mitigar os riscos). O sucesso das etapas anteriores pode evitar a concretização dos incêndios florestais e/ou minimizar seus impactos, reduzindo dessa forma os custos operacionais de capacidade de reação e resposta. Em terras federais, como é o caso da Flona de Ipanema, o monitoramento é feito de forma remota, via satélite (detecção de focos de calor) e também *in situ*, como rondas preventivas (Anderson *et al.*, 2019). O monitoramento via satélite, sem dúvida, é uma ferramenta essencial para áreas extensas e remotas, como os biomas da Amazônia, Pantanal e Caatinga, porém, são ineficientes para áreas menores, como uma unidade de conservação como a Flona de Ipanema, inserida no meio urbano, devido à relação de resolução espacial do satélite versus a área da unidade de conservação. Além disso, o tempo entre a geração da imagem de satélite e a disponibilização para os usuários pode ser longo demais para uma unidade de conservação como a citada acima. Neste caso, um índice como a Fórmula de Monte Alegre modificada (estimada a partir de dados observacionais locais), que orientará a gestão na adoção de ações preventivas, é mais adequado. Embora o termo incêndio florestal esteja relacionado a áreas protegidas legalmente (SEDEC, 2012), o resultado deste trabalho contribui também com os arredores da Flona de Ipanema, formados por extensas áreas particulares cobertas com vegetação, relevo e clima similares e pode ser adotado por outras organizações que necessitem atuar no combate aos incêndios na época da seca.

2. METODOLOGIA

2.1. Local de estudo

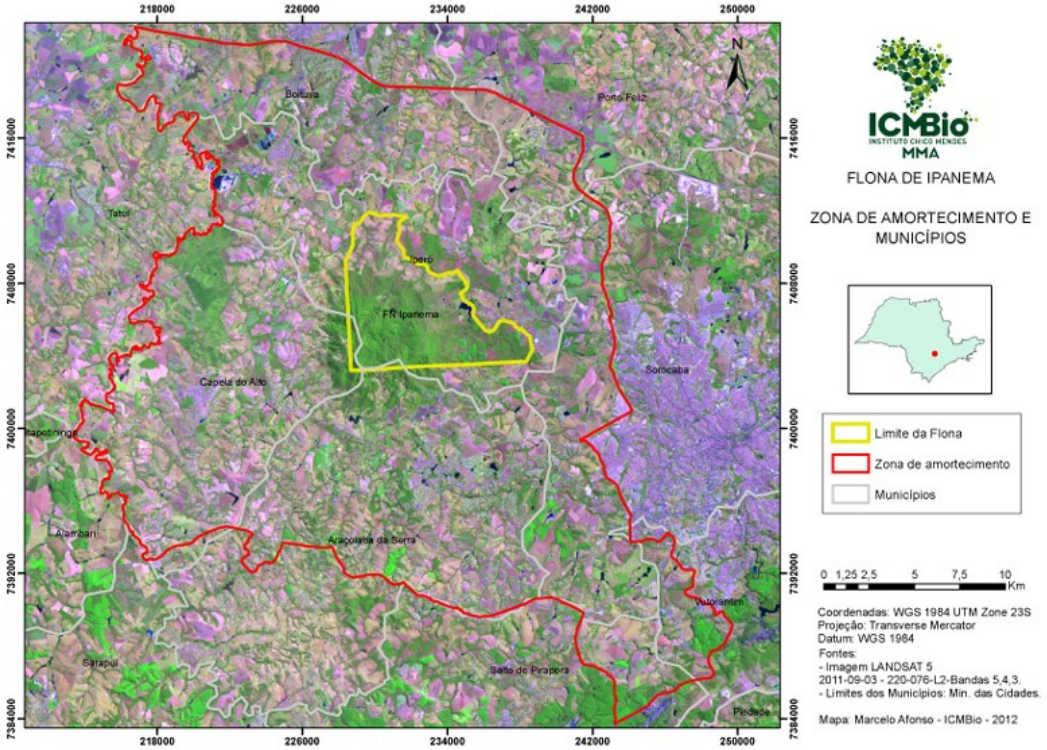
A Flona de Ipanema (ICMBio, 2022) é uma Unidade de Conservação (UC) do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) criada em 1992, entre os municípios de Iperó, Capela do Alto e Araçoiaba da Serra, no interior de São Paulo (Figura 1).

O Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza, instituído pela Lei 9.985/2000, estabelece que Florestas Nacionais são uma das categorias que compõem o grupo de Unidades de Conservação de Uso Sustentável, cujo objetivo é compatibilizar a

conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais (BRASIL, 2000).

A Flona ocupa uma área aproximada de 5.069 hectares e desempenha um importante papel na conservação da biodiversidade do bioma Mata Atlântica, contribui para o equilíbrio climático regional e para a conexão de remanescentes florestais em processo de fragmentação devido à expansão da Região Metropolitana de Sorocaba, cuja mancha urbana é identificada na Figura 1 (AFONSO, 2020). Todas as transformações impostas à área desde o século XVI fragilizaram o solo e a vegetação nativa, gerando pressões e exposição ao risco da perda da biodiversidade. Atualmente, o risco de incêndio florestal é a principal preocupação dos gestores da unidade (AFONSO, 2020).

Figura 1 - Mapa da localização da Flona de Ipanema



Fonte: ICMBio (2022).

2.2. Fórmula de Monte Alegre Modificada (FMA⁺)

A FMA⁺ é um dos índices mais usados no Brasil para monitorar o perigo de incêndios, mas é possível que suas classes precisem ser ajustadas de acordo com a localização, clima e vegetação do local (EUGENIO *et al.*, 2020). Neste trabalho, foi adotada a metodologia

proposta por Eugenio *et al.* (2020) que definiram cinco graus de perigo de acordo com o valor da FMA^{+}: baixo, médio, alto, muito alto e extremo.

A FMA^{+} adota como parâmetros iniciais os valores da umidade relativa do ar (UR) e a velocidade do vento (*v*) às 13 horas (hora local), e o número de dias sem chuva maior ou igual a 13 mm (*n*), como indica a equação 1:

$$FMA^{+} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{100}{UR_i}\right) * e^{0,04*v} \quad (1)$$

Como o FMA^{+} é um índice cumulativo com relação à UR, deve ser aplicada a seguinte restrição quando da ocorrência de precipitação (Tabela 1):

Tabela 1: Restrição da FMA^{+} de acordo com o volume de chuva no dia

PRECIPITAÇÃO NO DIA (mm)	MODIFICAÇÕES
p < 2,5	Nenhuma modificação é aplicada
2,5 ≤ p < 5,0	$0,7*FMA^{+}_{(DIA_ANTERIOR)} + 100/UR_{(DIA)}$
5,0 ≤ p < 10,0	$0,4*FMA^{++}_{(DIA_ANTERIOR)} + 100/UR_{(DIA)}$
10,0 ≤ p < 13,0	$0,2*FMA^{++}_{(DIA_ANTERIOR)} + 100/UR_{(DIA)}$
p ≥ 13,0	FMA^{+}=0, o cálculo recomeça no dia seguinte

Fonte: adaptado de Eugenio *et al.* (2020)

Eugenio *et al.* (2020) definiram a seguinte classificação de grau de perigo a partir do cálculo do FMA^{+} (Tabela 2):

Tabela 2: Grau de perigo de incêndios

FMA^{+}	GRAU DE PERIGO
FMA^{+}≤ 4	BAIXO
4 < FMA^{+} ≤ 10	MÉDIO
10 < FMA^{+} ≤ 17	ALTO
17 < FMA^{+} ≤ 46	MUITO ALTO
FMA^{+} > 46	EXTREMO

Fonte: adaptado de Sisclass FMA^{+} (http://mundogeomatica.com.br/sisclassfma.htm)

2.3. Dados

Para calcular a FMA$^+$ foram usados os dados meteorológicos da estação automática (A713) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada próxima à Flona de Ipanema do período entre 2007 e 2020. As coordenadas geográficas da estação automática A713 são: -23º43'; -47º59'. Os dados horários (valores instantâneos) de temperatura, temperatura do ponto de orvalho, umidade relativa, direção e velocidade do vento, pressão e radiação e acumulado de chuva são disponibilizados no website do INMET. No período avaliado, a recuperação anual foi superior a 75% (BEU, 2022), correspondente a um valor de 6.570 dados por ano dos 8.760 possíveis para cada uma das variáveis supracitadas.

A partir do acumulado de chuva de 24 horas e dos dados de UR e vento das 13 horas local, a FMA$^+$ foi calculada para cada dia do período entre 2007 e 2020. Os valores obtidos com a FMA$^+$ foram então classificados de acordo com o grau de perigo de incêndios (Tabela 2).

Este trabalho traz ainda como proposta, avaliar o uso de dados alternativos para suprir a inexistência de dados observacionais. Para isso, foram usados produtos de reanálise do MERRA-2 (MCCARTY *et al.*, 2016) e dados de sensoriamento remoto disponibilizados pelo Earth Science Data Systems (ESDS) Program (NASA, 2022). O MERRA-2 é o atual sistema de assimilação de dados produzido pela NASA que disponibiliza informações ambientais em pontos de grade para o globo terrestre. A cada ciclo de 6 horas, o MERRA-2 assimila aproximada 5 milhões de observações (Gelaro *et al*., 2017). Do ESDS foram extraídas séries temporais de UR, velocidade do vento na superfície e precipitação acumulada diária da área abrangida pelas seguintes coordenadas: 48,75W; 25S; 46,25W; 23S.

A UR (GMAOb, 2015) e a velocidade do vento (GMAOa, 2015) são produtos resultantes da reanálise do MERRA-2. A precipitação é um produto resultante das observações dos satélites e foram testados dois diferentes conjuntos de dados (HUFFMAN, 2019). O primeiro conjunto de dados, chamado neste trabalho de PREC1 é resultante da estimativa de satélite após o processo de calibração com observações de pluviômetros, disponibilizada aproximadamente 3 meses e meio após a observação. O segundo conjunto de dados, chamado de PREC2 é um produto disponibilizado aproximadamente 14 horas após

a observação, sem calibração. O vento na superfície também é um produto do MERRA-2 (GMAOa, 2015).

As informações sobre os incêndios florestais ocorridos em toda a área de abrangência da Flona de Ipanema foram fornecidas pelos gestores dessa UC. A metodologia foi descrita por Afonso (2020).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Estimativa do FMA+ com os dados observacionais do INMET

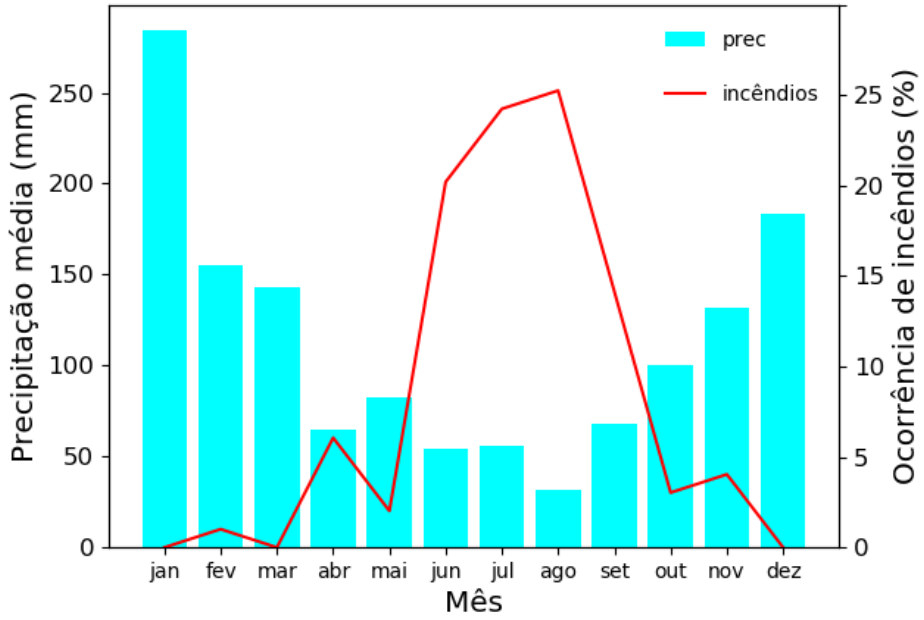
A ocorrência de incêndios florestais na Flona de Ipanema está diretamente associada com a estação seca, como mostra a Figura 1, na qual, as barras indicam a média climatológica de chuva (INMET, 2022) e a linha contínua indica o percentual de queimadas registradas entre 2009 e 2020. Neste intervalo de 12 anos, a Flona de Ipanema registrou 99 casos de incêndios florestais, dos quais, grande parte dos eventos ocorreram no quadrimestre junho-julho-agosto-setembro, coincidente com os meses climatologicamente mais secos. A partir de outubro, a ocorrência de incêndios é reduzida drasticamente permanecendo baixa até o mês de março.

Desde 2009 foram observados dois ciclos nos incêndios florestais na Flona de Ipanema (Figura 2). A partir de 2009 houve um aumento de eventos de incêndios florestais (linha azul), atingido seu máximo em 2011, quando foram registrados 20 eventos. A ocorrência diminuiu a partir de então, sendo que em 2015 nenhum evento foi registrado. No entanto, houve aumento novamente a partir de 2016 e um novo máximo em 2019. Embora neste segundo máximo o número de eventos tenha sido bem inferior (12 eventos em 2019), os incêndios foram mais devastadores do que ano 2011, como indica a área queimada (linha vermelha). Em 2019, uma área superior a 66 hectares foi queimada, contra aproximadamente 46 hectares em 2015.

A estação seca é a época mais propícia para a ocorrência de queimadas (Figura 1), mas as anomalias anuais ou sazonais de chuva sozinhas não explicam o comportamento observado na Figura 2. Embora existam várias causas desencadeadoras de incêndios florestais na Flona de Ipanema (AFONSO, 2020) e as condições ambientais funcionem como agravante (MIN, 2003), o ciclo observado na Figura 2 deixa uma linha de investigação aberta

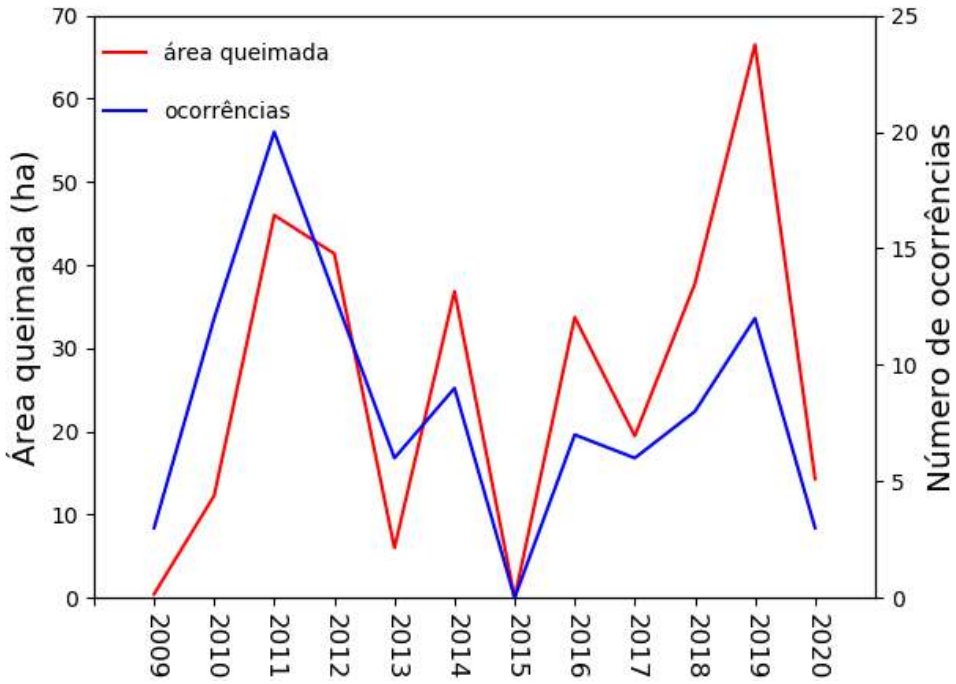
para trabalhos futuros. Dentre os motivos desencadeadores dos incêndios florestais na Flona de Ipanema, Afonso (2020) relatou ações criminosas de caçadores e invasores e o trafégo de composições férreas por 12 km nas divisas leste/nordeste da UC.

Figura 1: Normal climatológica de precipitação 1981-2010 (INMET) e ocorrências de queimadas registradas na Flona de Ipanema no intervalo entre 2009-2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021). Dados de queimadas: Flona de Ipanema. Dados meteorológicos: INMET.

Figura 2: Evolução temporal do número de incêndios (linha azul) e da área atingida pelos incêndios (linha vermelha) entre 2009 e 2020 na Flona de Ipanema



Fonte: Elaborado pelos autores (2021). Dados de queimadas: Flona de Ipanema

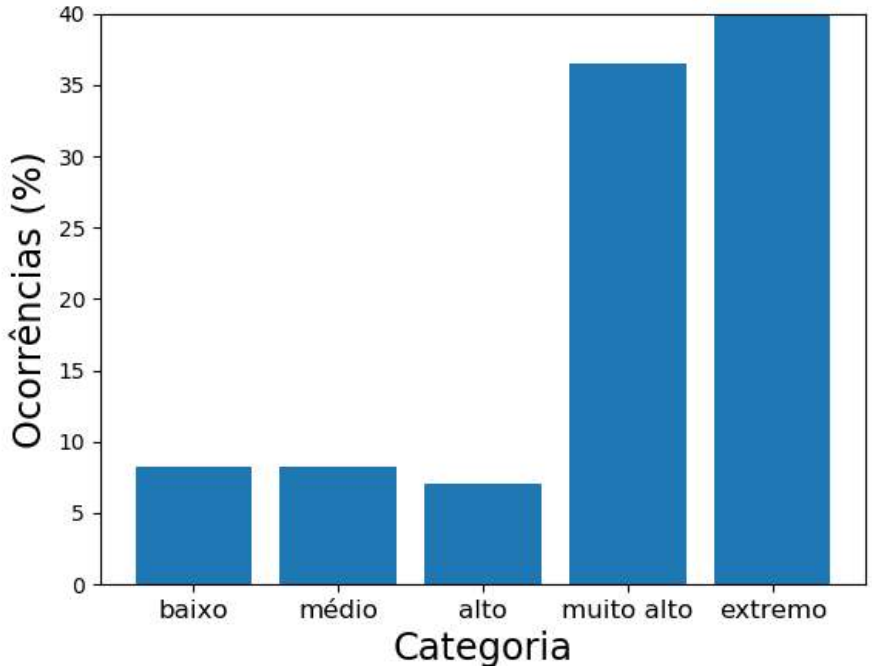
O cálculo da FMA⁺ com os dados meteorológicos da Flona de Ipanema indica a evolução dos graus de perigo ao longo do ano (Figura 3). Nesta Figura são apresentados o percentual das cinco categorias de perigo propostas por Eugenio *et al.* (2020) para cada mês do ano. Observa-se a diminuição do grau de perigo baixo a partir de fevereiro e aumento das outras categorias de perigo. Destaca-se o aumento do grau de perigo extremo a partir de junho e o valor máximo (27%) em julho. Em julho e julho, a soma das categorias muito alto e extremo supera 50%.

Figura 3: Percentual dos graus de perigo estimados pela FMA+ para a Flona de Ipanema com base na média mensal entre 2007 e 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021). Dados de queimadas: INMET.

Figura 4: Distribuição dos incêndios florestais para cada das categorias propostas por Eugenio *et al.* (2020)



Fonte: Elaborado pelos autores (2021). Dados de queimadas: Flona de Ipanema. Dados de queimadas: INMET.

Para avaliar o uso da FMA⁺ como ferramenta de monitoramento na prevenção e combate aos incêndios florestais na Flona de Ipanema, somente os valores obtidos no dia dos eventos de incêndio registrados na Flona foram selecionados. Como explicado anteriormente, considerando que existem fatores antropogênicos que influenciam na ocorrência dos incêndios, o gráfico resultante (Figura 4) indica que a metodologia proposta por Eugenio *et al.* (2020) é adequada para o local de estudo. Nesta Figura observa-se que mais de 35% dos eventos de incêndios florestais na Flona de Ipanema aconteceram para valores da FMA⁺ na categoria de perigo **muito alto** e 40% na categoria de perigo **extremo**.

3.2. Comparação: dados do INMET com dados do ESDS (ano 2018)

Considerando-se que 75% dos eventos corresponderam às categorias muito alto e extremo e a metodologia é adequada para a Flona de Ipanema, o próximo passo é avaliar o método proposto por Eugenio *et al.* (2020) com dados "não convencionais". O uso de dados provenientes de reanálises e equipamentos de sensoriamento remoto tem sido uma prática bastante comum em estudos climatológicos e ambientais e contribuem substancialmente para o entendimento dos processos na ausência de dados observacionais "convencionais". Neste trabalho, entende-se como dados convencionais as observações locais de UR, vento e

precipitação coletadas por estações meteorológicas de superfície. A proposta é avaliar se dados não convencionais podem suprir a inexistência de estações meteorológicas. Com esse intuito, foi escolhido o ano de 2018 por estar entre os anos mais recentes com alta taxa de recuperação de dados do INMET. A recuperação anual foi de 98,5% para da UR e vento e 90,8% para a precipitação, formando então uma boa base para comparação com os dados extraídos do ESDS (NASA, 2022).

Esta etapa tem por objetivo comparar os produtos disponibilizados pelo ESDS com as observações locais (estação meteorológica do INMET), visto que é um período recente em que há alta disponibilidade de dados das 2 fontes. A UR que é disponibilizada somente em intervalos de 3 horas (foi adotado o valor das 15 horas local), em geral é superestimada pelo MERRA-2 e a estimativa do nível de 875 hPa foi a que apresentou maior correlação com os dados observacionais (77%). O vento e a precipitação também são superestimados pelos produtos do ESDS, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Acumulado anual de precipitação e médias anuais da UR e vento do ESDS e diferença em relação ao INMET (ano 2018)

	PREC1 (mm)	**PREC2 (mm)**	**UR_850 hPa (%)**	**Vento (m/s)**
Acumulado / Média	1376,4	1499,5	70,3	4,0
ESDS - INMET	518,6	641,7	17,1	1,3

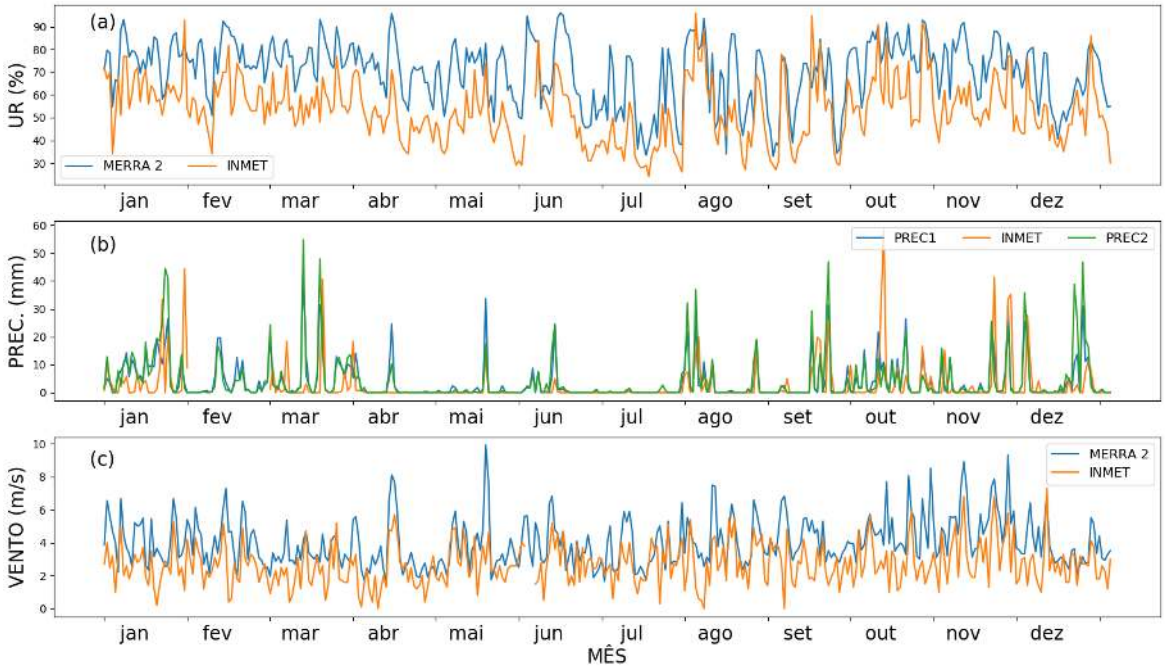
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Na Tabela 3, a primeira linha dos resultados apresenta o acumulado anual de chuva dos dados PREC1 e PREC2 e as médias da UR do nível de 875 hPa e do vento na superfície. A segunda linha dos resultados indica subtração entre o valor estimado com os dados do ESDS e os dados do INMET. Apesar das variáveis serem superestimadas, verifica-se que os dados do ESDS apresentam a mesma tendência dos dados observacionais do INMET (Figura 5). Os dados de chuva são os que apresentam maior discrepância em termos de volume acumulado, no entanto, estas discrepâncias ocorrem fora da estação seca, e portanto, fora da época mais favorável aos incêndios florestais.

Na etapa seguinte, o FMA^{+} foi estimado para dois grupos diferentes: com o PREC1 e com o PREC2. As estimativas apresentaram as seguintes correlações: 92% com o PREC1 e

90% com o PREC2. Este resultado indica que boas estimatimas do FMA⁺ são obtidas, mesmo quando o conjunto PREC2 (que é disponibilizado rapidamente e não é calibrado, como o PREC1) é usado nos cálculos.

Figura 5: Dados mensais de umidade relativa (a), precipitação acumulada (b) e velocidade do vento (c) do INMET e ESDS (ano 2018)



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

3.3. Estimativa do FMA⁺ com dados do ESDS (ano 2021)

Em 2021, dois eventos de frio intenso e prolongado provocaram geadas fortes na área de estudo, situação pouco comum para a região. A primeira frente fria atingiu o estado de São Paulo em 28 de julho, provocando acentuada queda da temperatura. As anomalias de temperatura mínima resultantes desse evento são da ordem de 4º C abaixo da média histórica, conforme síntese mensal elaborada pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2021a). O segundo sistema frontal passou pelo estado em 11 de agosto e produziu anomalias negativas de aproximadamente 3º C abaixo da média apenas na primeira quinzena do mês. O sistema de alta pressão que acompanhou o segundo sistema frontal persistiu por vários dias sobre o centro-sul do Brasil, produzindo anomalias positivas de pressão atmosférica de 4 a 6 hPa sobre grande parte do estado de São Paulo na primeira quinzena de agosto (CPTEC, 2021b). Consequentemente, os dias sob a influência do sistema

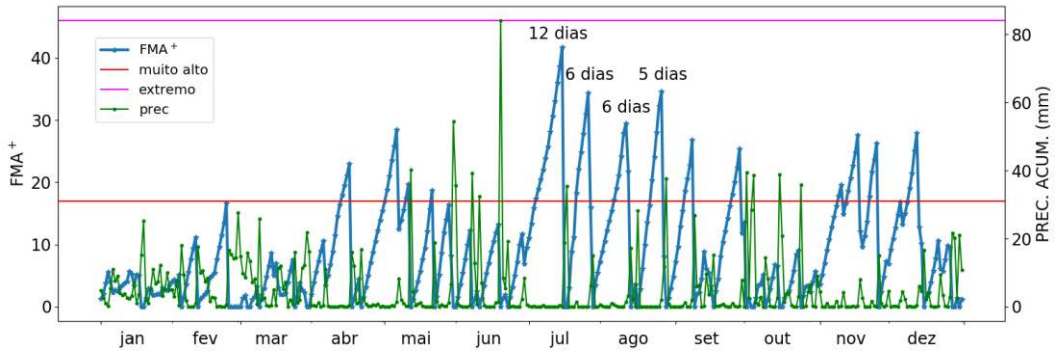
de alta pressão foram caracterizados por grandes amplitudes térmicas e baixos índices de umidade. A estação automática do INMET (A713) apresentou problemas operacionais e por este motivo não registrou a temperatura mínima neste período, no entanto, registrou UR de 28% em 15 de agosto.

O quadro sinótico do período entre a segunda quinzena de julho e a primeira quinzena de agosto provocou graves danos à vegetação local. A vegetação rasteira e as pastagens foram as mais prejudicadas pelos episódios de geadas e demoraram para se recuperar devido à ausência de chuva e aos baixos índices de umidade do ar, apresentando aspecto de palha à inspeção visual.

Este cenário tornou-se bastante favorável à ocorrência de queimadas que se tornaram um problema quase que diário no período que se seguiu. O portal G1 noticiou que em apenas um dia (21 de agosto), o Corpo de Bombeiros foi acionado para atuar em oito ocorrências em Sorocaba e Votorantim (PORTAL G1, 2021). O jornal regional Cruzeiro do Sul noticiou em 24 de agosto que desde o início do ano foram 626 ocorrências de incêndio em vegetação e que dentre outros prejuízos resultantes do alastramento do fogo naquele momento, a fumaça provocava desconforto e preocupação (JORNAL CRUZEIRO DO SUL, 2021). Uma rápida pesquisa junto aos meios de comunicação regionais mostra a alta frequência de queimadas após a primeira quinzena de agosto.

Neste período em que os dados observacionais estavam indisponíveis (2021), o uso da reanálise e da chuva estimada por sensoriamento remoto (do período correspondente) mostrou-se uma ferramenta bastante útil para o monitoramento do perigo de incêndios florestais. Na Figura 6, a linha verde indica os eventos de chuva estimada por sensoriamento remoto e a linha azul indica o valor estimado da FMA^{+} ao longo de 2021. As linhas horizontais vermelha e magenta sinalizam as categorias muito alto e extremo, respectivamente, propostas por Eugenio *et al.* (2020). Acima dos picos visualizados da FMA^{+} estão indicados o número de dias consecutivos que o índice esteve acima da categoria de perigo muito alto. O período mais longo foi de 12 dias no início de julho e em agosto foram 5 dias consecutivos após o segundo evento de geada, sendo interrompido por um evento de chuva no fim do mês.

Figura 6: FMA$^+$ estimada para o ano 2021 com dados do MERRA-2 e sensoriamento remoto



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O risco de incêndios florestais é uma grande preocupação da equipe de gestão da Flona de Ipanema. O fogo também pode ter origem fora dos limites da Flona e se alastrar para o interior da UC, ou então ter início no seu interior e se espalhar para fora, atingindo outras propriedades. Dessa forma, trata-se de um assunto de amplo interesse aos municípios e organizações circunvizinhas à Flona de Ipanema.

Até onde se tem conhecimento, esta é a primeira vez que um índice de perigo de incêndios florestais é avaliado para a região. Este é um passo importante, pois podem ser necessários ajustes para o local de interesse, segundo Eugenio *et al.* (2020). Quando comparada com os eventos de incêndios registrados pela Flona de Ipanema, a metodologia proposta por Eugenio *et al.* (2020) mostrou-se adequada como ferramenta na prevenção e combate aos incêndios. Aproximadamente 75% das ocorrências de incêndios na Flona de Ipanema aconteceram para as categorias de perigo muito alto e extremo.

Considerando-se os resultados obtidos, recomenda-se o investimento em estações meteorológicas, mesmo que simples e de baixo custo para o monitoramento das condições ambientais e operacionalização do FMA$^+$. Atualmente existem diversos modelos de estações meteorológicas automáticas de baixo custo que podem atender a essa necessidade.

Na ausência de dados observacionais, verificou-se que dados de reanálise, neste caso, o MERRA-2 e a estimativa de chuva por satélite proporcionam uma excelente contribuição para a estimativa da FMA$^+$. Os produtos de reanálise e de sensoriamento remoto podem ser usados também para analisar períodos passados e entender a dinâmica local.

As análises com dados observacionais mostraram que anomalias anuais e sazonais sozinhas não explicam a tendência de aumento dos incêndios florestais, visto que a influência antropogênica desempenha um importante papel para a incidência de queimadas. Por outro lado, o quadro sinótico observado no inverno de 2021, com dois eventos de geada forte em menos de 30 dias e um sistema de alta pressão persistente, provocou danos à vegetação rasteira e pastagem, principalmente, que ficaram com aspecto de palha, favorecendo o rápido alastramento dos incêndios florestais. Este resultado deixa aberta uma linha para investigação da relação entre incêndios florestais e anomalias de pressão atmosférica na Flona de Ipanema e seus arredores. Caso a anomalia de pressão seja identificada como indicador para o perigo de incêndios florestais, por se tratar de uma variável muito bem prevista pelos modelos meteorológicos (pressão atmosférica), tem-se então o potencial de prognosticar o perigo de incêndios florestais. O prognóstico do perigo é certamente uma grande contribuição para a prevenção de incêndios, permitindo que os gestores planejem ações e dessa forma evitem as suas ocorrências.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Floresta Nacional de Ipanema (Flona de Ipanema) pela disponibilidade dos dados.

REFERÊNCIAS

AFONSO, M. Risco e ordenamento de áreas protegidas: Floresta Nacional de Ipanema e Parque Natural do Alvão. 2020. Tese (Doutorado em Território, Risco e Políticas Públicas). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2020.

AGÊNCIA FAPESP. **Pesquisadores descrevem trajetória do "rio de fumaça" que escureceu São Paulo**, São Paulo: ago. 2019. Disponível em: https://agencia.fapesp.br/pesquisadores-descrevem-trajetoria-do-rio-de-fumaca-que-escureceu-sao-paulo/31280/. Acesso em: 14 mar. 2022.

ANDERSON L. O. *et al*. Modelo conceitual de sistema de alerta e de gestão de risco e desastres associados a incêndios florestais e desafios para políticas públicas no Brasil**. Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 43 – 61, 2019

BAKLANOV, A. *et al*. The WMO vegetation fire and smoke pollution warning advisory and assessment system (VFSP-WAS): concept, current capabilities, research and development

challenges and way ahead. **Biodiversidade Brasileira**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 128-201, maio 2021.

BERLINK, C. N. e Lima, L. H. A. Implementation of integrated fire management in Brazilian Federal Protected Areas: results and perspectives. **Biodiversidade Brasileira**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 128-139, maio 2021

BRASIL. Lei n. 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 jul. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 10 mar. 2022.

BEU, C. M. L.. Estimativa dos índices HUMIDEX e WBGT da Região Metropolitana de Sorocaba do período entre 2007 e 2020. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 30, n. 18, p. 313–336, 2022. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14953. Acesso em: 9 mar. 2022.

BOWMAN, D. M. J. S. *et al*. Fire in the Earth System. **Science**, [S. l.], v. 324, n. 5926, p. 481 – 484, Apr. 2009

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Síntese Sinótica Julho de 2021**, Cachoeira Paulista: CPTECa, ago. 2021. Disponível em: https://s1.cptec.inpe.br/admingpt/tempo/pdf/sintese_mensal_072021.pdf. Acesso em: 11 mar. 2022.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Síntese Sinótica Agosto de 2021**, Cachoeira Paulista: CPTECb, set. 2021. Disponível em: https://s1.cptec.inpe.br/admingpt/tempo/pdf/sintese_mensal_082021.pdf. Acesso em 11 mar. 2022.

CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE IN FOCUS. **Wildfire**. Washington, D. C.: CRSIF, Jun. 2022. Disponível em: https://sgp.fas.org/crs/misc/IF10244.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.

CRUZ, M. G. et al. Anatomy of a catastrophic wildfire: The Black Saturday Kilmore East fite in Victoria, Australia. **Forest Ecology and Management**, [s.l.], v. 284, p. 269-285, 2012.

EUGENIO, F. C. *et al*. Methodology for determining classes of forest fire risk using the modified Monte Alegre Formula. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.30, n. 4, p. 1085 – 1102, out/dez 2020.

GELARO, R. *et. al*. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, [s.l.], v. 30, n. 14, p. 5419 – 5454, Jul. 2017.

GERASKINA A. P. *et al*. Wildfires as a factior of loss of biodiversity and forest ecosystem functions. **Forest Science Issues**, [s.l.], v. 5, n. 1, 70 pp., 2022.

GOLDAMMER. J. G. Thirty years International Wildland Fire Conferences: Review and achievements of a circumglobal journey from Boston to Campo Grande. **Biodiversidade Brasileira**, [s.l.], v.11, n.2, p. 6-52, maio 2021.

GLOBAL MODELING AND ASSIMILATION OFFICE. **MERRA-2 inst1_2d_lfo_Nx: 2d, 1-Hourly, Instantaneous, Single-Level, Assimilation, Land Surface Forcings V5.12.4**, Greenbelt: GMAOa, 2015. Disponível em: https://earthdata.nasa.gov/. Acesso em 8 mar 2022.

GLOBAL MODELING AND ASSIMILATION OFFICE. **MERRA-2 inst3_3d_asm_Np: 3d, 3-Hourly, Instantaneous, Pressure-Level, Assimilation, Assimilated Meteorological Fields V5.12.4**, Greenbelt: GMAOb, 2015. Disponível em: https://earthdata.nasa.gov/. Acesso em 8 mar 2022.

HOLZ A. *et al*. Southern Annular Mode drives multicentury wildfire activity in Southern South America. **PNAS**, [s.l.], v. 114, n. 36, p. 9552-9557, 2017

HUFFMAN, G. *et al.* GPM IMERG Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06. **Algorithm Theoretical Basis Document**, version 06, Greenbelt: Mar. 2019. Disponível em: https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/GPM/IMERG_ATBD_V06.pdf. Acesso em: 09 mar. 2022.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Floresta Nacional de Ipanema. Brasília: ICMBio, 2022. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/flonaipanema/. Acesso em: 13 mar. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília: INMET, mar. 2022. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais. Acesso em: 16 mar. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Queimadas** – Monitoramento dos focos ativos por países. São José dos Campos: INPE, mar. 2022. Disponível em: https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises/. Acesso em: 14 mar. 2022.

JORNAL CRUZEIRO DO SUL. **Fumaça das queimadas provoca névoa em Sorocaba e na região.** Sorocaba, 24 ago. 2021. Disponível em: https://www.jornalcruzeiro.com.br/sorocaba/noticias/2021/08/678233-fumaca-das-queimadas-provoca-nevoa-em-sorocaba-e-na-regiao.html. Acesso em: 11 mar. 2022.

LIU, L. *et al*. Impact of biomass burning aerossol on radiation, clouds, and precipitation over the Amazon: relative importance of aerosol-cloud and aerosol-radiation interactions. **Atmos. Chem. Phys.**, Munich, v. 20, n.21. p. 12283-13301, Oct. 2020

MCCARTY, W. et al. MERRA-2 input observations: Summary and initial assessment**. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation**, Maryland, v. 46, 61 pp, 2016. Disponível em: https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/McCarty885.pdf. Acesso em: 9 mar 2022.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de desastres** (volume I) – Desastres Naturais, Brasília: MIN, 2003.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Earth Science Data Systems Program. [S. l.]: NASA, 2022. Disponível em https://earthdata.nasa.gov/esds. Acesso em: 08 mar. 2022.

PIVELLO, V. R. *et al*. Understanding Brazil´s catastrophic fires: causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in ecology and conservation**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 233-398, jul./sep. 2021.

PORTAL G1. **Fogo atinge comunidade em área verde na Zona Norte de Sorocaba.** [S. l.], mar. 2021. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/sorocaba-jundiai/noticia/2021/08/21/queimadas-atingem-areas-de-vegetacao-em-bairros-de-sorocaba-e-mobiliza-bombeiros.ghtml. Acesso em: 11 mar. 2022.

SAHARJO, B. H.; GOLDAMMER, J. G. Bridging the services of the WMO vegetation fire and smoke pollution warning advisory and assessment system (VFSP-WAS) to politics, policies and land management: the South East Asia example and global visions. **Biodiversidade Brasileira**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 202-212, maio 2021.

SECRETARIA NACIONAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL. **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres**, Brasília: SEDEC, 2012. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/DOCU_cobrade2.pdf. Acesso em: 04 jan. 2021.

CASTILLO SOTO, M.; SAAVEDRA, J.; BRULL, J. Fire severity in mega wildfires in Chile in 2017: actions to improve the protection system. **Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança**, [s.l.], v. 26, n. 2, p. 5 – 18, 2019

VAN DER WERF, G. R. *et al*. Global fire emissions estimates during 1997-2006. **Earth Syst. Sci. Data**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 697-720, Sep. 2017.

WESTERLING, A. L. *et al*. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. **Science**, [s.l.], v. 313, n. 5789, p. 940-943, 18 August 2006.

WU, H. **Biomass burning aerosols from African Wildfires: Assessing aerosol properties, ageing process and effects on regional clouds.** 2021. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Manchester, Manchester, 2021.