

QUEIMADAS E INCÊNDIOS FLORESTAIS

mediante
monitoramento
orbital

Alberto W. Setzer
Nelson J. Ferreira
organizadores

Copyright © 2021 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

Conselho editorial Arthur Pinto Chaves; Cylon Gonçalves da Silva;
Doris C. C. K. Kowaltowski; José Galizia Tundisi;
Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos;
Teresa Gallotti Florenzano; Aluizio Borém

Capa e projeto gráfico Malu Vallim

Foto capa Bruno Kelly/Amazonia Real

Diagramação Victor Azevedo

Preparação de figuras Victor Azevedo

Preparação de textos Natália Pinheiro

Revisão de textos Renata de Andrade Sangeon

Impressão e acabamento BMF artes gráficas e editora

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Queimadas e incêndios florestais : mediante
monitoramento orbital / Alberto W. Setzer,
Nelson J. Ferreira organizadores. -- São Paulo :
Oficina de Textos, 2021.

ISBN 978-85-7975-318-3

1. Biomas - Brasil 2. Incêndios - Combate
3. Incêndios - Investigação 4. Incêndios - Prevenção
5. Queimadas I. Setzer, Alberto W. II. Ferreira,
Nelson J.

21-87918

CDD-634.9618

Índices para catálogo sistemático:

1. Incêndios florestais : Zoneamento de risco :
Engenharia florestal 634.9618

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Todos os direitos reservados à **Editora Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 798

CEP 04013-003 São Paulo SP

tel. (11) 3085-7933

www.ofitexto.com.br

atend@ofitexto.com.br

Sobre os autores

Alana Kasahara Neves

Mestra e doutora em Sensoriamento Remoto (2021), ambos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Trabalha como pesquisadora associada no projeto Brazil Data Cube, na Funcate. Possui experiência em mapeamento de fitofisionomias e uso e cobertura da terra (principalmente na Amazônia e no Cerrado), mineração de dados, séries temporais, *machine learning* e *deep learning*.

Alberto W. Setzer

PhD em Engenharia Ambiental pela Purdue University (1982) e com pós-doutorado no Joint Research Center/EEC, Ispra, Itália (1993). Pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) desde 1983, desenvolvendo projetos operacionais e pesquisas nos temas de monitoramento de queimadas com satélites, risco de fogo da vegetação e meteorologia Antártica. Estruturou, entre outros, os projetos: Mapeamento Automático de Áreas Queimadas com Imagens Landsat, Plataforma de Monitoramento de Queimadas, Portal do Programa Queimadas; Cálculo e Aprimoramento do Risco de Fogo; Sistema Brasileiro Fogo-Superfície-Atmosfera.

Alex Santos da Silva

Doutor em Meteorologia Aplicada (2019) pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professor do Magistério Superior, lotado no Curso de Ciências Atmosféricas, do Instituto de Engenharia e Geociências (IEG) da Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa). Possui experiência em modelagem numérica do tempo e do clima. No que tange a ensino, pesquisa e extensão, coopera com análises das mudanças climáticas e seus efeitos nas condições atmosféricas de curto prazo e do risco potencial de fogo em vegetação.

Aline Pontes Lopes

Doutora em Sensoriamento Remoto (2021) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e mestra em Ciências de Florestas Tropicais (2015) pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa). Atualmente realiza consultoria em pesquisa para o Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Ipam). Possui experiência em

estudos de campo e de sensoriamento remoto para a quantificação das mudanças temporais nos estoques de carbono e na estrutura de florestas afetadas por fogo na região amazônica.

Allan A. Pereira

Doutor em Engenharia Florestal (2017) pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Minas Gerais, Brasil. É professor do Instituto Federal do Sul de Minas Gerais e pesquisador associado do Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais (Lasa-UFRJ), atuando nas áreas de sensoriamento remoto da vegetação e algoritmos para mapeamento de queimadas.

Ananda Santa Rosa de Andrade

Geógrafa, mestra e doutoranda em Geografia pela Universidade de Brasília (UnB), desde 2014 atua em atividades da gestão pública para combater e prevenir queimadas em áreas legalmente protegidas. Atualmente, gerencia projetos e está responsável tecnicamente pelas atividades dos eixos “autonomia e sustentabilidade dos povos e territórios indígenas” e “defesa dos direitos dos povos indígenas autônomos” da Coordenação das Organizações Indígenas da Amazônia Brasileira (Coiab).

Andeise Cerqueira Dutra

Engenheira florestal (2017) pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e mestra em Sensoriamento Remoto (2019) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), onde atualmente é aluna de doutorado. Seus interesses de pesquisa envolvem fenologia e monitoramento da vegetação, e mudanças de uso e cobertura da terra utilizando técnicas de sensoriamento remoto.

Arturo E. Melchiori

Bioengenheiro (2004) pela Universidade Nacional de Entre Ríos, Argentina. Com mais de 20 anos de experiência em desenvolvimento de sistemas para processamento de dados geográficos, atualmente é consultor independente.

Debora Cristina Cantador Scalioni

Geógrafa (2011) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e mestra em Geografia na área de Análise Ambiental e Dinâmica Territorial (2014) pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atualmente é doutoranda no programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atua principalmente nos seguintes temas: recursos hídricos, modelagem hidrológica, mudança de uso e cobertura da terra, e planejamento urbano e regional.

Egídio Arai

Doutor em Sensoriamento Remoto (2011) e mestre em Computação Aplicada (2002) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente é tecnologista sênior da DIOTG/Inpe, atuando nas áreas de sensoriamento remoto, processamento de imagens, séries temporais e ciências ambientais.

Fabiano Morelli

Doutor em Ciências (2011) pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Atualmente é tecnologista sênior III e coordena o Programa de Monitoramento de Queimadas por Satélites do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), atuando em projetos de pesquisas para desenvolvimento de produtos, processos e serviços de monitoramento ambiental de queimadas e incêndios na vegetação por meio de imagens de satélites.

Fausto Machado-Silva

Doutor em Ecologia (2016) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). É pesquisador no Programa em Geociências – Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense (UFF). Atua nas áreas de biogeoquímica, ecologia de ecossistemas e biometeorologia, e investiga os processos ecológicos em diferentes escalas e a influência de impactos antropogênicos e das mudanças climáticas.

Filippe Lemos Maia Santos

Mestre em Meteorologia (2018) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente é doutorando no Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa). Desde 2016 é pesquisador do Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais (Lasa-UFRJ), atuando nas áreas de sensoriamento remoto da vegetação e algoritmos para mapeamento de queimadas.

Flávio Justino Barbosa

PhD em Meteorologia (2004) pelo Leibniz-Institute of Marine Research na Alemanha e com pós-doutorado em Ciências Atmosféricas (2006) pela Universidade de Toronto no Canadá, sabático no Byrd Polar Climate and Research Center da Universidade Estadual de Ohio (2016) e *simon fellow* no Centro de Física Teórica de Trieste, na Itália (ICTP/Unesco). É professor adjunto no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV) desde 2006 e coordenador do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada da UFV desde 2018.

Irving Foster Brown

PhD pelo Department of Geological Sciences da Universidade Northwestern (1981). Atualmente é pesquisador no Woods Hole Research Center e na Universidade Federal do Acre (Ufac). Tem experiência nas áreas de geoquímica e ecologia, com ênfase em ecologia aplicada, atuando principalmente nos seguintes temas: mudanças globais, queimadas, sensoriamento remoto, estimativas de desmatamento, uso de florestas e métodos de verificação do uso da terra.

Jackson Martins Rodrigues

Doutor em Matemática e Ciências Naturais (2016) pela Georg-August-Universität Göttingen. Atualmente é professor adjunto na Universidade Federal Fluminense (UFF). Tem experiência na área de geografia, atuando principalmente nos seguintes temas: temperatura, mudanças climáticas, planejamento urbano, modelagem e urbanização.

Joana Messias Pereira Nogueira

PhD em Ecologia e Biodiversidade (2016) pela Universidade de Montpellier, França, atuando nas áreas de ecologia de paisagem, sensoriamento remoto e ecologia do fogo. Atualmente é pós-doutoranda na Universidade de Münster, Alemanha, e colaboradora científica do Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais (Lasa) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

José Guilherme Martins dos Santos

Doutor em Ciência do Sistema Terrestre (2015) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente é analista em geoprocessamento no Programa Queimadas do Inpe, atuando na melhoria do produto de risco de fogo para a América do Sul. Possui experiência em meteorologia, climatologia e manipulação e visualização de dados ambientais.

Julia Abrantes Rodrigues

Mestra em Meteorologia (2018) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Desde 2017 é pesquisadora do Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais (Lasa-UFRJ), atuando nas áreas de sensoriamento remoto da vegetação e validação de algoritmos para mapeamento de queimadas.

Kaio Allan Cruz Gasparini

Doutor em Sensoriamento Remoto (2019) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente é sócio-fundador da Landmap Mapeamento e Geosoluções.

Atua nas áreas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica, prestando serviços de aerofotogrametria, principalmente para as áreas ambiental e agrícola.

Liana Oighestein Anderson

Bióloga com PhD em Geografia e Meio Ambiente pela Universidade de Oxford (2011) e pós-doutorado pelo Environmental Change Institute (ECI) da Universidade de Oxford (2014). Atualmente, trabalha como pesquisadora do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden) e docente no curso de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Seus interesses de pesquisa incluem o monitoramento de florestas e a gestão dos riscos e impactos associados a incêndios florestais e extremos climáticos nos ecossistemas e comunidades.

Luis Eduardo Maurano

Mestre em Sensoriamento Remoto (2018) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Desde 2010 é tecnologista sênior da Coordenação Geral de Ciências da Terra do Inpe, atuando no Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia e Demais Biomas Brasileiros.

Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão

Doutor em Sensoriamento Remoto (2004) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e com pós-doutorado (2008) pela Universidade de Oxford. Atua como pesquisador titular do Inpe e chefe da Divisão de Observação da Terra e Geoinformática do Inpe. É coordenador do grupo de pesquisas em Ecossistemas Tropicais e Ciências Ambientais (TREES) e presidente do Comitê Científico do Programa de Grande Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia. É docente do programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Inpe.

Marcus Jorge Bottino

Possui graduação em Meteorologia (1996) pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), mestrado (2000) e doutorado (2013) em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Colaborador no CPTEC/Inpe na área de radiação na atmosfera.

Margarete Naomi Sato

Doutora (2003) pela Universidade de Brasília (UnB). Pesquisadora da Iniciativa Cerrado juntamente com a Universidade de Brasília, atuando no Cerrado nas áreas de ecologia do fogo e serviços ecossistêmicos.

Nelson Jesus Ferreira

PhD pela Universidade de Wisconsin, Madison, EUA (1987). Pesquisador titular (aposentado) do CPTEC/Inpe e professor colaborador do curso de pós-graduação em Meteorologia do Inpe, atuando nas áreas de sensoriamento remoto da atmosfera e estudos e modelagem do tempo.

Paulo Sérgio S. Victorino

Engenheiro cartógrafo graduado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Unesp e especialista em Ciências de Dados pelo Instituto de Gestão e Tecnologia (IGTI). Desde 2004 atua na pesquisa e desenvolvimento de sistemas de informação geográfica com foco na tecnologia de recepção, manipulação, processamento e armazenamento de dados geográficos e imagens de satélite.

Pedro Augusto Lagden de Souza

Analista de sistemas (1999) pela Universidade de Taubaté (Unitau) e pós-graduado em Informática Empresarial (2003) pela Universidade Estadual Paulista (Unesp). Desde 2001 trabalha no Programa de Monitoramento de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), com experiência em desenvolvimento e análises de dados geográficos, voltado para a tecnologia de recepção, manipulação e processamento e armazenamento de imagens de satélite.

Raffi Agop Sismanoglu

Mestre em Meteorologia Agrícola (1995) pelo DEA da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Possui experiência em modelagem regional numérica do tempo com o modelo RAMS/CSU. Atuou no SIMERJ/Furnas e Infraero como previsor e assistente de pesquisador. Atua no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) desde 2001 na Divisão de Satélites e Sensores Meteorológicos.

Renata Libonati dos Santos

PhD (2011) pela Universidade de Lisboa (UL), Portugal. É professora do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e pesquisadora associada ao Instituto Dom Luiz e ao Centro de Estudos Florestais, ambos da Universidade de Lisboa, Portugal. Atua nas áreas de sensoriamento remoto do fogo e de extremos climáticos e coordena o Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais (Lasa-UFRJ).

Roberta Bittencourt Peixoto

PhD (2017) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). É pesquisadora no Programa em Geociências – Geoquímica Ambiental da Universidade Federal

Fluminense (UFF). Atua nas áreas de ecologia de ecossistemas e geoquímica ambiental e investiga processos de degradação da matéria orgânica, o ciclo do carbono e os impactos das mudanças globais.

Silvia Cristina de Jesus

Mestra em Sensoriamento Remoto (2009) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente é doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e membro integrante do grupo de pesquisa Geotecnologias, Meio Ambiente e Sustentabilidade (GeoSus-UFSCar) junto ao CNPq.

Valdete Duarte

Engenheiro agrônomo (1977) pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e mestre em Sensoriamento Remoto (1980) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente é tecnologista sênior III do Inpe.

Vanúcia Schumacher

Doutora em Meteorologia (2019) pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Atualmente é pesquisadora no Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), atuando na área de sensoriamento remoto do fogo.

Vera Reis

Bióloga, mestra (1994) e doutora (2002) em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é diretora executiva da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Políticas Indígenas (Semapi) do Acre e coordenadora do Centro Integrado de Geoprocessamento e Monitoramento Ambiental (Cigma) do Acre.

Vinicius Peripato Borges Pereira

Mestre em Sensoriamento Remoto (2019) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente é doutorando no curso de Sensoriamento Remoto do Inpe. Seus interesses de pesquisa incluem ecologia histórica e modelagem de distribuição de espécies.

Wesley Augusto Campanharo

Mestre em Ciências Florestais (2013) pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Atualmente é doutorando em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), onde desenvolve pesquisas sobre o padrão de uso do

fogo na Amazônia Legal brasileira, seus impactos e o dano ocasionado por esses eventos ao longo dos anos, aplicando técnicas de geoprocessamento, econometria e valoração ambiental.

Yosio Edemir Shimabukuro

PhD pela Universidade do Estado do Colorado, EUA (1987). De 1992 a 1994, foi pesquisador visitante no Goddard Space Flight Center da Nasa, EUA. Desde 1973 é pesquisador no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), utilizando dados de sensoriamento remoto por satélite e terrestres para análise de cobertura vegetal. Vem aplicando técnicas e modelos de sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto para detecção de mudanças ambientais em diferentes biomas do Brasil. É pesquisador 1A do CNPq.

Apresentação

Foi com enorme satisfação que recebi o convite dos organizadores para fazer a apresentação deste livro. Primeiro, pelo fato de ter tido a oportunidade de conhecer de perto o trabalho da equipe do Inpe no desenvolvimento inédito do primeiro sistema operacional de queimadas, conhecido mundialmente e transferido a vários países da América Latina e do Caribe. A maior disponibilidade de satélites de observação da Terra e geoestacionários, muitos dos quais sem custo ao usuário, permitiu enormes avanços do Programa Queimadas do Inpe, tornando acessíveis, entre outros, dados diários de focos de queimadas e mapa de risco, parte dos quais também acompanhei de perto.

Dados sobre área queimada, quantidade de biomassa combustível, fator de combustão ou eficiência da queima são insumos necessários para estimar as emissões atmosféricas associadas à queima de biomassa, incluídas como parte do conjunto de emissões nos inventários nacionais de gases de efeito estufa submetidos à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). À exceção das estimativas da área queimada, os outros parâmetros podem ser estimados utilizando valores padrão (*default*) nas Diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), caso estimativas específicas do país não existam. As estimativas da área queimada em todo o território nacional, utilizando imagens diárias de satélites com resolução espacial de 1 km e mensais com 30 m, fazem parte de uma das linhas de atuação do Programa Queimadas e têm um papel relevante no aumento da acurácia das estimativas de emissões pela queima de biomassa.

O IPCC, nas suas avaliações das informações científicas produzidas em todo o mundo nos temas relevantes à mudança do clima, já indicou que as atividades humanas causaram aumento da temperatura média global acima dos níveis pré-industriais, de aproximadamente 1,0 °C, e que, com esse aumento, já foram observados impactos significantes em várias regiões do planeta. Na América do Sul, por exemplo, a área queimada aumentou, consistente com os riscos de impactos pela mudança do clima de natureza antrópica. Adicionalmente, o desmatamento, a variabilidade natural e outros fatores também exercem uma influência nas tendências observadas de queima.

O relatório especial do IPCC confirma a conclusão, no seu sexto relatório de avaliação de 2021, de que um planeta mais quente impactará negativamente amplas áreas de florestas, pois elas estarão mais expostas a eventos extremos como calor, secas e tempestades, sendo que a incidência de incêndios florestais também aumentará. Isso demonstra a importância do mapa diário de risco de fogo que, desde 1999, tem sido desenvolvido no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Inpe. Desde lá, enormes avanços foram feitos, tanto no maior refinamento da resolução espacial dos dados orbitais, originalmente 55 km e atualmente 1 km, como na expansão geográfica do mapa de risco, concentrado inicialmente na Amazônia brasileira e atualmente utilizado por vários outros países da América Latina e do Caribe. O mapa de risco, produto diário e operacional, faz parte do conjunto de dados do Programa Queimadas que qualquer instituição federal, estadual ou municipal pode acessar para apoiar suas medidas e ações de prevenção de queimadas. Infelizmente, dados por si só não previnem nem combatem as queimadas e os incêndios florestais. Há a necessidade de investimentos concretos por parte dos governos para evitar ou minimizar as queimadas, entendendo-se que isso se tornará cada vez mais importante à medida que eventos climáticos extremos serão mais frequentes e intensos com o aumento da temperatura média anual.

Em um cenário de aumento global das emissões de gases de efeito estufa, as queimadas e os incêndios florestais são esperados a aumentar substancialmente. Reduções ambiciosas de emissões, consistentes com limitar o aquecimento a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, podem evitar o projetado aumento de áreas queimadas. O custo de cortar emissões com ações ambiciosas de mitigação pode parecer elevado, mas os benefícios associados, particularmente pelo corte de emissões fósseis, são inúmeros, desde uma melhor qualidade do ar até a redução de problemas respiratórios, os quais serão também beneficiados pela redução das queimadas e dos incêndios florestais. Dessa forma, ressalta-se também a importância de transferir a tecnologia e capacitar os países da região para que possam prevenir queimadas e incêndios florestais, visto que, dependendo das condições meteorológicas, a fumaça resultante desses eventos pode ser transportada para áreas no Brasil e, assim, agravar as condições respiratórias principalmente das populações mais vulneráveis – os idosos e as crianças.

Finalmente, não devemos nos esquecer que o Brasil ratificou o Acordo de Paris e, com isso, estabeleceu o compromisso de reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 37% em 2025 e 43% em 2030, relativamente a essas emissões em 2005. Essas contribuições foram declaradas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil, submetida à Convenção do Clima em 2014 e atualizada em 2020. Vários países, na atualização de suas NDCs, aumentaram suas ambições de redu-

ção líquida de emissões, enquanto o Brasil manteve os percentuais de sua submissão original, confirmando os 43% em 2030, que era então indicativo. A eliminação do desmatamento ilegal na Amazônia brasileira é uma das formas sugeridas na submissão do Brasil para atingir os percentuais de redução. Claro que há também que se prevenir os incêndios florestais nas florestas brasileiras e, assim, reduzir ou eliminar as correspondentes emissões de gases de efeito – foi-se o tempo em que se afirmava que as florestas amazônicas, em particular, não pegavam fogo porque eram muito úmidas. Cada vez mais está-se observando essa realidade, que não pode ser negligenciada.

Por tudo isso, resta-me somente agradecer aos organizadores deste livro por trazerem tantos resultados relevantes e tanta informação atualizada sobre o Programa Queimadas. Resta aos governos em todos os níveis aproveitar a gama de produtos que esse programa oferece para buscar conter as queimadas e os incêndios florestais. É um privilégio para o Brasil poder contar com instituições sérias e empenhadas e que só têm um foco – um Brasil sustentável.

Thelma Krug

Pesquisadora que atua em Ciências da Terra e Mudanças Climáticas,
atualmente é vice-presidente do IPCC

Prefácio

O livro *Monitoramento orbital de queimadas e incêndios florestais* foi concebido como marco do Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), para registrar o impacto de 35 anos do uso de imagens de satélites ambientais na detecção de queimadas e incêndios florestais no País. Como que por coincidência, marcando essa ocasião, os anos de 2019 e 2020 foram de particular relevância, tanto pela extensão da vegetação afetada pelo fogo (cerca de 60 mil km² apenas no Pantanal, ~40% do bioma) como pelo impacto ambiental e pelas crises políticas nacionais e internacionais decorrentes, demandando ao máximo os produtos e a capacidade da equipe do Programa Queimadas.

A evolução desse trabalho no Inpe envolveu eventos significativos considerados históricos nos campos científico, administrativo e político. Em julho de 1985, imagens da Amazônia registradas pelo satélite NOAA-9 mostraram dezenas de queimadas e plumas de fumaça oriundas dos desmatamentos no sul da região. Essas imagens, gravadas para o experimento GTE-ABLE-2A, coordenado pelo Inpe e pela Nasa, que analisava a composição química da troposfera, permitiram identificar as fontes da poluição encontrada inesperadamente entre Manaus e Belém nas medições a bordo da aeronave quadrimotor Electra da Nasa, altamente instrumentada. Dessa pesquisa decorreu a associação entre a queima de biomassa em grande escala e a produção de emissões atmosféricas em volume capaz de alterar o clima planetário.

Estabelecida a possibilidade de detecção diária e quase imediata de focos de queima em imagens de satélites, em setembro de 1987 foi formalizado, entre o então Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF) e o Inpe, o Projeto SEQE para o monitoramento de queimadas por satélites. As imagens obtidas documentaram milhares de focos de queima por dia no Cerrado e no sul da Amazônia, particularmente no inverno de 1987 e 1998. Sua divulgação, os testemunhos de jornalistas atraídos para a região e os resultados dos trabalhos científicos que passaram a analisar a questão tomaram as capas de jornais diários nacionais e revistas semanais no mundo todo, acompanhados de debates acirrados, alguns inclusive buscando desacreditar os dados de satélites. O potencial dessas descobertas documentando uma devastação ambiental sem precedentes, capaz de afetar o planeta, com a possibilidade de divulgação imediata, fortaleceu o nascente movimento ecológico. A distri-

buição dos focos detectados para as sedes do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) era feita por meio de mensagens Telex, anterior à internet e ao uso comum dos equipamentos de fax.

Em resposta às evidências apresentadas e às numerosas e intensas pressões nacionais e internacionais, o Governo do Brasil reagiu com a criação do “Pacote Ecológico Nossa Natureza”, em outubro de 1988, pela Presidência da República, estabelecendo em 1989 o Ibama e o Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (PrevFogo) e motivando a escolha do Brasil para sediar a *Earth Summit Rio 92*, na qual foram abordadas futuras políticas globais de preservação florestal e foi elaborada a Agenda-21. Outra consequência nessa década foi o início do monitoramento regular do desmatamento na Amazônia pelo Prodes/Inpe, retomando o estudo pioneiro com base em imagens de 1978 dos satélites de observação terrestre Landsat, com algumas dezenas de metros de resolução espacial, o que permitiu análises espaciais e temporais condizentes com as necessidades administrativas e científicas relativas a análise e definição de políticas e impactos da conversão da Floresta Amazônica.

No período de 1992 a 1995, a detecção de queimadas no Inpe gerou novo ponto de contenção ao registrar aumento exagerado dos focos de queima na Amazônia, quando novamente houve acusações infundadas de falsas detecções e de busca de autopromoção pela equipe de trabalho. Como consequência, o Prodes, que por falta de recursos estava atrasado, foi incentivado, e as análises das imagens indicaram o número recorde e surpreendente de ~30.000 km² de corte raso da floresta somente em 1995, o que, por sua vez, motivou ações nacionais e estaduais de controle e redução do desmatamento. Datam também desse período os primeiros mapas de concentrações de focos para o território nacional, divulgados semanalmente nos principais jornais do País.

Março de 1998, com o incêndio descontrolado e de origem antrópica em Roraima, o qual atingiu ~12.000 km² de florestas naturais, parte delas em terras dos índios Yanomami, gerou novo episódio de repercussão nacional e internacional. Nessa esteira, no mesmo ano, o Governo criou dentro do Ibama o Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal (Proarco), atuando até 2007 particularmente em Roraima e nos municípios do “arco do desmatamento” do sul da Amazônia. Por seu desempenho regular no monitoramento de focos durante dez anos, o Inpe foi incluído nesse novo programa, passando a contar com recursos anuais específicos de uma ação formal no orçamento da União, o que permitiu a contratação de uma equipe estável, atendendo as necessidades mínimas de trabalho. Imediatamente, foi adaptada para o monitoramento de queimadas a ferramenta SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) do Inpe, e, além da detecção de focos de queima, passaram a ser gerados produtos de estimativa e previsão do risco meteorológico de queima da vegetação.

A década de 2000 foi marcada pelo avanço das tecnologias de detecção com o sensor MODIS nos novos satélites de órbita polar AQUA e TERRA e dos sensores IMAGER e SEVIRI, respectivamente nos geoestacionários GOES e MSG. Também foram essenciais as novas tecnologias de informática por meio de computadores mais potentes e rápidos, de distribuição da informação e seu acesso público na internet e de aplicativos de análise e consulta a bancos de dados. Dessa forma, o Programa Queimadas pode se aperfeiçoar e atender a crescente demanda de dados do uso descontrolado do fogo em várias regiões do País, particularmente nos anos anormalmente secos de 2002 a 2005, 2007 e 2010. Nessa fase, consolidaram-se as quatro principais áreas de atuação operacional do programa: detecção de focos com satélites, cálculo e previsão do risco meteorológico de fogo, mapeamento de áreas queimadas e sistemas específicos para atender órgãos de governos federal e estaduais. O Banco de Dados de Queimadas, desenvolvido com tecnologias internas do Inpe para visualizar os focos detectados, gerar análises básicas e exportar dados, passou de 600 mil acessos, atendendo também usuários em países da América Latina e do Caribe.

Na década de 2010, o Programa Queimadas buscou recursos adicionais e obteve apoio de instituições de fomento de pesquisa, como Fapesp e CNPq, em alguns casos com enlace internacional, como no Sprint/EUA e na FCT/Portugal, e de agências de outros países para apoio a projetos, como GIZ/Alemanha, Defra/Grã-Bretanha e FIP, muitas delas coordenadas pelo Banco Mundial sob supervisão dos Ministérios do Meio Ambiente, de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação e da Saúde. Nessa fase, destacam-se o uso descentralizado dos dados gerados pelo programa em secretarias estaduais de meio ambiente com suas próprias salas de situação e equipes dedicadas, em instituições governamentais como ONS e Censipam, e a ampla repercussão dos dados em publicações técnicas e científicas e na mídia. Foram também desenvolvidos e consolidados sistemas específicos, como o SISAM, desenvolvido para o VIGIAR/DSAST/Ministério da Saúde, para análise do impacto da poluição das queimadas na saúde humana; o Ciman, para que órgãos federais coordenem ações de combate a incêndios florestais em áreas de preservação; e o Sistema de Gestão Geoespacializada da Transmissão (GTT), para a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) reduzir apagões no fornecimento de energia elétrica devidos a queimadas próximas a linhas de transmissão.

A década de 2010 encerrou-se com dois anos particularmente críticos quanto ao uso descontrolado do fogo no País, motivando a criação por decreto presidencial do Comitê da Amazônia, com atuação por meio da Operação Verde Brasil, sob responsabilidade do vice-presidente do Brasil. O aumento dos focos na Amazônia como precursor do aumento nas taxas de desmatamento e os incêndios descontrolados no Pantanal reproduziram vários dos elementos vividos no final da década de 1980, a começar pelas tentativas de descrédito dos dados e pelas crises políticas nacionais e interna-

cionais centradas na magnitude da devastação, o que reforça a utilidade dos dados e serviços do Programa Queimadas na gestão de desastres ambientais. No presente, desafios do dia a dia incluem cortes desde 2015 no orçamento federal do Programa Queimadas, diminuição do número de funcionários no Inpe, redução na capacidade de atuação dos órgãos ambientais, e maiores e mais complexas demandas por usuários em uma perspectiva de extremos climáticos mais frequentes e intensos que no passado – certamente, preocupações com solução, ou apenas redução, complexa.

Uma das circunstâncias desse Programa tem sido a relativamente baixa produção de textos documentando os avanços técnicos e científicos e os impactos decorrentes do trabalho. A página da internet de produções e impacto do programa apresenta centenas de publicações descrevendo a evolução do trabalho e textos de terceiros que utilizam os resultados. Porém, a sobrecarga da equipe ao longo dos anos impediu a produção de uma publicação mais abrangente e concisa com resultados que mostrassem a amplitude e o alcance do esforço realizado. Nesse contexto, este volume, com 12 capítulos, traz resultados e exemplos distintos de produtos e aplicações do Programa Queimadas do Inpe.

O primeiro capítulo contém a visão geral das ferramentas e produtos existentes, e os três capítulos seguintes descrevem produtos e métodos com enfoques específicos: medidas de áreas queimadas, risco meteorológico para queima da vegetação e detecção de focos de queima com satélites geoestacionários, respectivamente. O Cap. 5 indica uma possível nova linha de pesquisa para cobrir a lacuna de como quantificar o número e o impacto de incêndios naturais, causados por raios, e o sexto capítulo contém exemplo de como o monitoramento de focos pode indicar a preservação precária de áreas de conservação em um bioma – no caso, a Caatinga. O Cap. 7, sobre degradação florestal, e o Cap. 8, sobre impactos do fogo nos biomas nacionais, abrem espaço para pesquisadores do Inpe, externos ao Programa Queimadas, mas que também usam dados do programa e comparam seus resultados com os do programa. No Cap. 9 é abordada a resposta da vegetação ao fogo sob influência de eventos de seca e da regeneração vegetal pós-fogo. Já o décimo capítulo exemplifica resultados de um dos projetos perante órgão financiador, realizado com compromisso na geração de dados de emissões atmosféricas para avaliação de políticas ambientais, e o décimo primeiro foi escrito por usuários do programa, mostrando para o caso do Acre o potencial de aplicação efetiva dos produtos do programa na gestão do uso do fogo em base estadual. Finalizando a sequência, o último capítulo contém exemplo de aplicação do produto de risco de fogo para análise de condições climáticas futuras.

*Alberto W. Setzer
Nelson J. Ferreira*

Sumário

- 1 O PROGRAMA QUEIMADAS DO INPE – 23
 - 1.1 Histórico – 23
 - 1.2 Metas do programa – 24
 - 1.3 Estrutura e disponibilidade de dados – 27
 - 1.4 Principais usuários – 30
 - 1.5 Satélite de referência – 32
 - 1.6 Nova base (“Base 2”) de focos de queima na vegetação – 32
 - 1.7 Monitoramento dos focos ativos de fogo por continente e países: aspectos gerais – 33
 - 1.8 Monitoramento dos focos de queima por regiões: aspectos gerais – 36
 - 1.9 Monitoramento dos focos de queimas por biomas: aspectos gerais – 38
 - 1.10 Aviso de fumaça e boletim de risco de fogo para brigadas – 39
 - 1.11 Monitoramento dos focos de queima em tempo quase real: situação atual – 39
 - 1.12 Relatório diário automático – 40
 - 1.13 Ciman – 42
 - 1.14 Sisam – 43
 - 1.15 TerraMA2Q – 45
 - 1.16 Cooperação internacional – 46
 - 1.17 Metas futuras – 47
 - Agradecimentos – 48
 - Referências bibliográficas – 49
- 2 SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁREAS QUEIMADAS NO BRASIL: PROGRESSOS, INCERTEZAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS – 53
 - 2.1 Princípios fundamentais do monitoramento de áreas queimadas via satélite – 55
 - 2.2 Estado da arte dos produtos globais de área queimada – 57
 - 2.3 Sistemas de monitoramento e disseminação de produtos de área queimada no Brasil – 58
 - 2.4 Processos de validação de produtos de áreas queimadas AQM1km e AQM30 – 67

2.5	Perspectivas futuras no mapeamento de áreas queimadas por satélite no Brasil – 71
2.6	Considerações finais – 74
	Agradecimentos – 75
	Referências bibliográficas – 75
3	O RISCO DE FOGO DO CPTEC/INPE – 81
3.1	Histórico do risco de fogo no Inpe – 81
3.2	O método do risco de fogo – 82
3.3	Produtos gerados a partir do risco de fogo – 90
3.4	Desempenho do risco de fogo – 90
3.5	Considerações finais – 92
	Agradecimentos – 95
	Referências bibliográficas – 96
4	DETECÇÃO DE QUEIMADAS POR SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS E SEU USO NO PROGRAMA QUEIMADAS DO INPE – 99
4.1	Princípios da detecção de focos de queimadas por satélites geoestacionários – 101
4.2	O algoritmo de detecção de queimadas utilizado no Inpe – 105
4.3	Comparação da detecção por satélites de órbitas geoestacionária e polar – 113
4.4	Considerações finais – 117
	Agradecimentos – 117
	Referências bibliográficas – 118
5	RELAÇÃO ENTRE QUEIMADAS E RELÂMPAGOS NO PARQUE NACIONAL DAS EMAS – 122
5.1	Materiais e métodos – 123
5.2	Resultados – 125
5.3	Considerações finais – 133
	Agradecimentos – 134
	Referências bibliográficas – 134
6	QUEIMA DE VEGETAÇÃO EM ÁREAS PROTEGIDAS NA CAATINGA (2000-2012) – 137
6.1	Dados e resultados – 140
6.2	Conclusões – 153
	Agradecimentos – 156
	Referências bibliográficas – 156

7	A DEGRADAÇÃO FLORESTAL CAUSADA POR QUEIMADAS: MÉTODOS E APLICAÇÕES NA AMAZÔNIA – 159
7.1	Métodos para mapeamento de queimadas e incêndios florestais utilizando sensores de média e moderada resoluções espaciais – 161
7.2	Panorama conceitual para o monitoramento operacional da degradação florestal – 165
7.3	Implicações e desafios para o mapeamento da degradação florestal causada por queimadas – 167
7.4	Mapeamento da degradação florestal por queimada: aplicações na Amazônia – 171
7.5	Considerações finais – 174 Referências bibliográficas – 176
8	PADRÕES E IMPACTOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NOS BIOMAS BRASILEIROS – 181
8.1	Padrões espaçotemporais dos incêndios florestais – 182
8.2	Causas dos incêndios florestais – 189
8.3	Consequências dos incêndios florestais – 197
8.4	Considerações finais – 204 Agradecimentos – 205 Referências bibliográficas – 205
9	RESPOSTAS DA VEGETAÇÃO AO FOGO: PERSPECTIVAS DO USO DE SATÉLITES AMBIENTAIS NO BRASIL – 213
9.1	Interação fogo-vegetação nos ecossistemas brasileiros – 214
9.2	Interação fogo-clima-vegetação: a influência dos eventos de seca – 217
9.3	Regeneração da vegetação pós-fogo – 220
9.4	Considerações finais – 226 Agradecimentos – 226 Referências bibliográficas – 227
10	ESTIMATIVAS ANUAIS DE BIOMASSA CONSUMIDA E DE EMISSÕES DE CO ₂ , CO E CH ₄ NO CERRADO A PARTIR DE ÁREAS QUEIMADAS EM IMAGENS LANDSAT (2011-2015) – 235
10.1	Materiais e métodos – 237
10.2	Resultados – 244
10.3	Considerações gerais – 250
10.4	Material suplementar – 253 Agradecimentos – 261 Referências bibliográficas – 261

11	EVOLUÇÃO DO MONITORAMENTO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS E QUEIMADAS NO ESTADO DO ACRE – 267
11.1	Período de 2000 a 2004 – preparação para um evento extremo – 268
11.2	2005 – o ano do inferno – 268
11.3	Período após 2005 – políticas públicas instituídas – 271
11.4	Sugestões para o futuro – 276
	Agradecimentos – 277
	Referências bibliográficas – 277
12	PALEOFOGO E O POTENCIAL IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA INCIDÊNCIA DE QUEIMADAS – 281
12.1	Perspectivas do risco de fogo em um futuro cenário de mudança climática – 285
12.2	Discussão e comentários finais – 289
	Agradecimentos – 290
	Referências bibliográficas – 291

O PROGRAMA QUEIMADAS DO INPE

Alberto W. Setzer, Nelson J. Ferreira, Fabiano Morelli

O monitoramento orbital de queimadas e incêndios florestais e o cálculo de risco de fogo da vegetação são atividades essenciais em vários contextos no País, destacando-se: proteção de vidas e propriedades, gerenciamento dos recursos naturais, aumento da produtividade das empresas, vigilância ambiental e gestão da qualidade do meio ambiente do cidadão.

Atualmente são poucas as instituições nacionais, e mesmo internacionais, que trabalham operacionalmente com dados obtidos por satélites, integrados a campos tridimensionais, transformando-os em valores físicos básicos para monitorar o meio ambiente. O Programa de Queimadas/Incêndios Florestais do Inpe (Inpe, 2020n), por meio de suas várias linhas de trabalho e produtos gerados relativos à queima de vegetação, apoia dezenas de instituições federais e estaduais, grupos de pesquisa científica, empresas e ONGs em seus esforços para minimizar o uso descontrolado e ilegal do fogo no País. Milhares de usuários diversos e a mídia também fazem uso extensivo das informações geradas.

Essa atividade do Inpe integra o trabalho de vários setores do instituto e reflete a interação de muitas instituições federais em ministérios distintos, estruturada ao longo de três décadas de cooperação.

1.1 HISTÓRICO

O monitoramento orbital de queimadas e incêndios florestais no Brasil remonta a uma pesquisa Inpe-Nasa de julho de 1985 na Amazônia, quando nas imagens AVHRR do satélite NOAA-9 foram identificadas centenas de queimadas, cujas plumas de fumaça emitidas, conforme as medições feitas em aeronave instrumentada na ocasião, contaminaram milhões de quilômetros quadrados na região (Andreae et al., 1988). Entre as decorrências dessa pesquisa, foi estabelecido um convênio com o então Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), em 1987, para o forne-

relatórios diários com mapas e tabelas das detecções de focos, mapas de risco e de ocorrência de focos e históricos de detecções por estados, regiões nacionais e países (Inpe, 2020p, 2020q). Publicações mensais apresentam resumos do monitoramento e os principais destaques registrados, e também previsão de queimadas para os meses seguintes (Martins et al., 2019; Inpe, 2020h).

1.3 ESTRUTURA E DISPONIBILIDADE DOS DADOS

Informações detalhadas sobre o Programa Queimadas e seus dados e produtos associados encontram-se no portal <<http://www.inpe.br/queimadas>> (Fig. 1.1). Nele são apresentadas as principais opções do trabalho operacional do Inpe relacionado ao monitoramento de queimadas e incêndios florestais detectados por satélites e ao cálculo e previsão do risco meteorológico de fogo da vegetação. Os dados de focos para a América do Sul, América Central, África e Europa são atualizados a cada três horas, todos os dias do ano, e o acesso às informações é livre. Casos de usuários que necessitam de focos com maior frequência temporal ou monitoramento em áreas específicas devem ser dirigidos a queimadas@inpe.br. As seções de “Introdução” (Inpe, 2020o) e “Perguntas Frequentes” (Inpe, 2020m) procuram responder a dúvidas mais comuns, considerando as centenas de pedidos de esclarecimentos recebidas anualmente.

O portal e seus vários componentes são melhorados continuamente, estando divididos em três blocos principais, configurados segundo características comuns, e são apresentados a seguir.

1.3.1 Sistemas de monitoramento

BD Queimadas (Inpe, 2020c): permite visualizar os focos em um sistema de informação geográfica, com opções de períodos, regiões de interesse, satélites, planos de informação (por exemplo, desmatamento, hidrografia, estradas) etc., além da exportação dos dados em formatos csv, geotson, shp e kml (Inpe, 2020c).

Ciman Virtual (Inpe, 2020f): é o sistema de monitoramento e apoio ao Centro Integrado Multiagências de Coordenação Operacional Nacional em Brasília, que visa integrar dados derivados de satélites com informações, fotos e detalhes das equipes que estão em campo combatendo o fogo, em tempo real.

TerraMA2Q (Inpe, 2020t): é a ferramenta de monitoramento, análise e alerta para queimadas e incêndios florestais adaptada para a plataforma computacional TerraMA2, de modo que usuários criem seus próprios sistemas de monitoramento e alerta.

Focos nas APs (áreas protegidas) (Inpe, 2020d): informa e detalha a ocorrência do fogo em áreas de preservação, como parques nacionais e estaduais, florestas, reservas biológicas municipais, estaduais e nacionais, e terras indígenas.

Esses produtos para os seis biomas com séries temporais e mapas de focos são divulgados rotineiramente pelo Programa de Queimadas do Inpe, e essa iniciativa visa monitorar a ocorrência de focos de incêndios em áreas estratégicas, podendo assim apoiar tomadas de decisão e planejamentos estratégicos de interesse econômico, ambiental e segurança alimentar em território brasileiro. Um exemplo dessa aplicação ocorreu com o Decreto de Garantia da Lei e da Ordem no final de agosto de 2019 para controlar as queimadas e desmatamentos ilegais na Amazônia (Setzer, 2019).

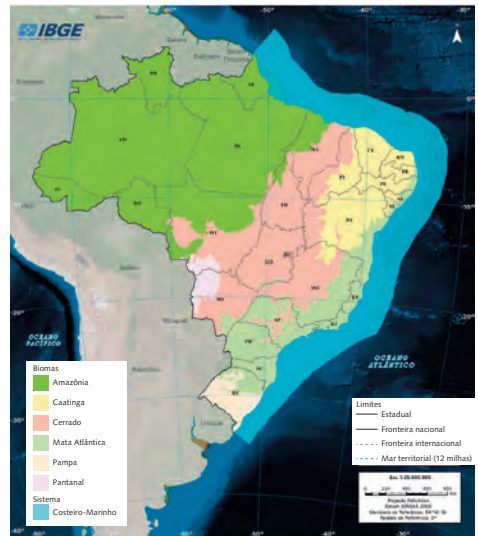


FIG. 1.8 Biomas brasileiros

Fonte: IBGE (2012).

1.10 AVISO DE FUMAÇA E BOLETIM DE RISCO DE FOGO PARA BRIGADAS

Em janeiro de 2016 foram implementados pelo Programa Queimadas do Inpe dois novos produtos operacionais disponíveis ao público. O primeiro é o aviso de fumaça, uma informação de advertência relativa às condições meteorológicas associadas à fumaça observada em determinada cidade que possa afetar a saúde das pessoas, a segurança em rodovias e a operacionalidade dos aeroportos. Contém dados de fenômenos como vento, visibilidade e focos de queimadas, bem como previsões para os próximos dois dias. Com base em informações emitidas por meio dos códigos METAR, toda vez que uma visibilidade menor ou igual a 5.000 m for observada em um aeroporto, um aviso de fumaça é emitido. Os avisos são emitidos para 31 cidades monitoradas, a maioria delas na região da Amazônia Legal.

O segundo produto é o boletim de risco de fogo para brigadas, um boletim diário emitido toda vez que uma brigada de combate a queimadas encontra-se mobilizada. Nele, além das previsões meteorológicas, são informadas as condições de risco de fogo, dispersão da fumaça, condições para operações aéreas etc.

1.11 MONITORAMENTO DOS FOCOS DE QUEIMA EM TEMPO QUASE REAL: SITUAÇÃO ATUAL

O monitoramento de focos do Programa Queimadas do Inpe utiliza centenas de imagens por dia, recebidas de nove satélites diferentes (Tab. 1.2). Para análises temporais e espa-

SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁREAS QUEIMADAS NO BRASIL: PROGRESSOS, INCERTEZAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Renata Libonati, Allan A. Pereira, Filippe L. M. Santos, Julia A. Rodrigues, Ananda Santa Rosa, Arturo E. Melchiori, Fabiano Morelli, Alberto W. Setzer

Nas últimas décadas, as condições climáticas, como as secas severas e a pressão do desmatamento para práticas agropastoris ou silvícolas, contribuíram para aumentar a ocorrência das queimadas e incêndios florestais nos diversos biomas brasileiros. Em alguns biomas, como o Cerrado, o fogo de origem natural e eventual é um fator ecológico necessário para a dinâmica dos ecossistemas, produtividade e biodiversidade (Hardesty; Myers; Fulks, 2005). Entretanto, o uso inadequado do fogo no manejo da terra tem provocado um grande aumento dos incêndios florestais, que afetam anualmente milhares de hectares de vegetação nativa, alterando o regime de fogo natural, destruindo a fauna e empobrecendo o solo, além de causar enormes prejuízos sociais e econômicos, como doenças respiratórias, mortes, acidentes e perdas materiais e de propriedades.

Ademais, a queima da biomassa impacta direta e indiretamente diversos processos do sistema climático, além de constituir uma das mais importantes fontes de alteração da cobertura da vegetação (Bowman et al., 2011). Nesse contexto, estudos recentes quantificaram vários aspectos do efeito do fogo no clima regional e global, nomeadamente: alterações no balanço de energia da superfície continental, na microfísica das nuvens, nos ciclos biogeoquímicos e da água, além da emissão de gases do efeito estufa e aerossóis para a atmosfera (Ward et al., 2012). A partir da década de 1980, a área queimada (AQ) na vegetação passou a ser considerada uma variável essencial do clima (*essential climate variable*, ECV), isto é, seu monitoramento passou a ser de alta prioridade para se compreender o sistema climático, sendo altamente recomendável que sua observação seja feita globalmente, de forma contínua e sistemática no tempo e no espaço (WMO, 2011).

Além das questões de mudança climática, há uma busca de modelos alternativos para que o desenvolvimento socioeconômico seja sustentável, devido à ameaça de escassez de recursos naturais. Como o impacto do setor agrícola e industrial na deterio-

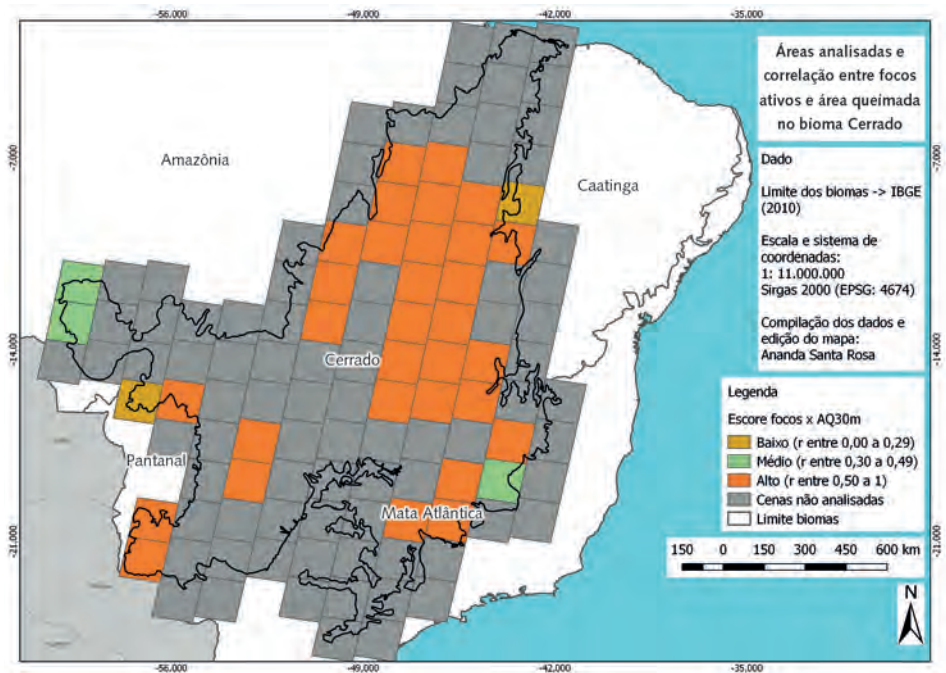


FIG. 2.9 Caracterização espacial da correlação entre focos ativos e cicatrizes de AQ detectadas pelo algoritmo do AQM30

e 6%, com correlações baixas (amarelo). As correlações foram calculadas através do coeficiente linear de Pearson.

A média da quantidade total de AQ nas cenas foi de: ~408 km² (correlações altas), ~23 km² (correlações medianas) e ~17 km² (correlações baixas). As correlações medianas e baixas podem ser explicadas pela resolução média espacial do produto, que compromete a detecção de cicatrizes com perímetros discretos e valores reduzidos de áreas, ocasionando interpretações equivocadas de erro quando considerados os focos ativos como dados de referência.

2.5 PERSPECTIVAS FUTURAS NO MAPEAMENTO DE ÁREAS QUEIMADAS POR SATÉLITE NO BRASIL

Duas questões importantes devem ser consideradas sob o ponto de vista das perspectivas futuras no âmbito do mapeamento de áreas queimadas por satélites no Brasil. A primeira está relacionada ao desenvolvimento e lançamento de novos sensores orbitais, questão que aponta para as novas tecnologias, com o objetivo de prover imagens da superfície terrestre de qualidade em um menor espaço de tempo e em resoluções espaciais e espectrais mais refinadas. A segunda questão diz respei-

O RISCO DE FOGO DO CPTEC/INPE

*Alberto Setzer, Guilherme Martins, Flávio Justino, Alex da Silva, Fabiano Morelli,
Joana Nogueira, Raffi Agop Sismanoglu*

Um passo importante na mitigação dos impactos de queimadas e incêndios florestais é determinar a suscetibilidade que a vegetação possui à queima e à propagação do fogo. Nesse contexto, a modelagem do risco de fogo (RF) tornou-se uma ferramenta útil na avaliação da resiliência ambiental, bem como na análise entre desmatamentos e clima, quando o uso constante e descontrolado do fogo pode levar ecossistemas a ciclos irreversíveis de degradação.

Os modelos meteorológicos mais simples de RF usam somente temperatura e umidade relativa do ar para gerar um índice referente à condição inicial do potencial de combustão da vegetação, como os índices de Angstron, Nesterov, Telicyn e Monte Alegre (Telicyn, 1971; Soares, 1986; Mafalda; Torres; Ribeiro, 2009; Holsten et al., 2013; White, 2013). Por outro lado, há modelos mais complexos, como os desenvolvidos nos Estados Unidos e Canadá (*National Fire Danger Rating System*, NFDRS; *Fire Weather Index*, FWI; *Fire Behavior Prediction System*, FBP), que combinam medições de massa e umidade do material combustível, topografia, condições do tempo e risco de ignição devido à contribuição antropogênica ou natural (Canadian Forestry Service, 1970; Deeming et al., 1972).

Neste capítulo apresentam-se o histórico, os conceitos, os produtos, as aplicações e a análise de acertos do modelo de risco de fogo do Programa Queimadas e Incêndios Florestais (www.inpe.br/queimadas) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Sua metodologia situa-se entre a dos índices de risco de fogo mais simples e a dos mais complexos, cujas múltiplas variáveis nem sempre são acuradas.

3.1 HISTÓRICO DO RISCO DE FOGO NO INPE

O RF do Programa Queimadas foi desenvolvido no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/Inpe) com base na análise da ocorrência de centenas de milhares de queimadas/incêndios detectados por satélites nos principais biomas e

TAB. 3.2 OS SETE TIPOS DE VEGETAÇÃO DO CÁLCULO DO RISCO BÁSICO DE FOGO E SUAS CONSTANTES DE FLAMABILIDADE (A)

Classes de vegetação do IGBP_C6 combinado com o MapBiomias_V3		Constante de flamabilidade (A)
0	Gelo ou corpos de água	-x-
1	Pastagens e gramíneas	6,0
2	Agricultura e diversos	4,0
3	Savana; Caatinga aberta	3,0
4	Savana arbórea; Caatinga fechada	2,4
5	Floresta de contato; Campinarana	2,0
6	Florestas decíduas e sazonais	1,72
7	Ombrófilas densas	1,5

Nota: o valor -x- significa que o risco de fogo não será calculado.

3.2.6 Efeito da latitude e elevação

Nas versões anteriores do RF, supunha-se que o efeito da latitude e elevação estava implícito nas classes de vegetação utilizadas. Por exemplo, em uma região acima de 2.500 m, as baixas temperaturas do inverno impedem o crescimento de florestas, ou seja, a classe de vegetação nessa região atinge níveis altos de RF antes que a vegetação em uma floresta tropical. Entretanto, constatou-se que a parametrização do RF apresentava limitações nas faixas extratropicais, devido a diferenças dos padrões de precipitação e temperatura entre as regiões equatoriais e as extratropicais, e que essas limitações foram minimizadas com a introdução da variável latitude (Justino et al., 2010, 2013).

Nesse cenário, como esse modelo de RF possui formulações física e matemática simples, incorporaram-se na versão atual também os efeitos dos fatores latitudinal (FLAT, Eq. 3.6a) e topográfico (FELV, Eq. 3.6b), ambos por meio de ajustes lineares. O passo seguinte no cálculo do RF, com os ajustes desses efeitos, também está na Eq. 3.6c.

3.2.7 Categorias de RF

Em seguida, os valores numéricos do RF, de zero a um, são separados nas cinco classes para apresentação em produtos visuais, conforme os limites mostrados na Tab. 3.1. A opção por essas classes e suas cores segue o padrão de produtos diversos de risco em outros contextos.

3.2.8 Ajuste das classes mínima e baixa para focos detectados

O último ajuste do RF está em considerar a presença de focos de queima de vegetação detectados pelos satélites. A ocorrência desses focos em locais com risco calculado como “mínimo” e “baixo” indica alguma limitação nos pressupostos do modelo, como

DETECÇÃO DE QUEIMADAS POR SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS E SEU USO NO PROGRAMA QUEIMADAS DO INPE

Alberto Setzer, Paulo Sérgio S. Victorino, Marcus Jorge Bottino

A queima da biomassa causada por ações antrópicas é um dos mais marcantes fatores de perturbação do ecossistema terrestre. Dependendo de sua extensão, localização e duração, o fogo pode modificar significativamente as propriedades da superfície do solo, a química e a qualidade do ar na atmosfera, e influenciar a longo prazo o balanço radiativo do planeta (Bowman et al., 2009; IPCC, 2013). A natureza dinâmica das queimas implica que a observação da Terra a partir do espaço é fundamental para caracterizar sua magnitude, impacto, variabilidade e tendência para uso em monitoramentos e modelos de sistemas terrestres (Van der Werf et al., 2006; Plank; Fuchs; Frey, 2017).

Um sistema capaz de detectar o mais cedo possível onde e quando se inicia a ignição da vegetação e o avanço da frente ativa de fogo deveria trazer redução considerável de danos materiais e sociais. Instrumentos orbitais polares, como o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), na década de 1980, o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), na década de 2000, ambos com resolução espacial de 1 km, e mais recentemente a nova geração com o imageador de média resolução do sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS), com pixels de 375 m, têm sido usados para detectar e investigar os padrões globais e sazonais de queima de biomassa por meio da detecção de paisagem queimada (Dozier, 1981; Setzer; Pereira, 1991; Setzer; Verstraete, 1994; Holben et al., 1996; Kaufman et al., 1998; Lee; Tag, 1990; Giglio et al., 2003; Schroeder et al., 2014).

Como produto derivado, a potência radiativa do fogo também é avaliada a partir das imagens termais, inferindo estimativas da temperatura da combustão, da extensão afetada pelas chamas e das taxas de emissão de gases e aerossóis (Ichoku; Kaufman, 2005; Wooster et al., 2005; Freeborn et al., 2008). Para tanto, são utilizados métodos baseados em medições da radiação térmica emitida pela queima, primeiro para identificar incêndios, e depois para caracterizar as suas principais propriedades, como a taxa de calor/emissão de energia (Riggan et al., 2004; Wooster et al., 2004).

mentas para indicar vários elementos na superfície da Terra ou na atmosfera, como árvores, água, nuvens, umidade, queimadas ou fumaça. Todas as bandas do ABI têm calibração em órbita. O ABI possui alguns modos de varredura, e no seu modo preferencial de operação produz simultaneamente uma imagem de disco completo (Hemisfério Ocidental) a cada dez minutos, uma imagem dos EUA Contíguos (CONUS) a cada cinco minutos e duas imagens menores de mesoescala a cada 60 segundos ou uma a cada 30 segundos para áreas de interesse específico. A resolução espacial no nadir ($75,2^\circ$ W) das imagens coletadas é de 0,5 km ou 1 km nos canais visíveis e de 1 km ou 2 km nos canais infravermelhos (NOAA; Nasa, 2019).

Os satélites MSG transportam o instrumento SEVIRI, que possui um imageador radiométrico de 10-bit, em 11 canais espectrais, localizados entre $0,6\ \mu\text{m}$ e $14\ \mu\text{m}$. O satélite está posicionado sobre o meridiano de Greenwich e o plano do equador, e faz varreduras do disco terrestre a cada 15 minutos – especificações detalhadas são encontradas em Aminou, Jacquet e Pasternak (1997) e Schmetz et al. (2002). Sobre o ponto subsatélite, a distância espacial de suas medições no canal de detecção de fogo na vegetação centrado em $3,92\ \mu\text{m}$ é de 3 km, e o campo de visada instantâneo (IFOV, em inglês) é de 4,8 km. Sobre o Brasil, devido ao efeito da visada lateral do sensor, essas distâncias devem ser multiplicadas por até três vezes. Os dados SEVIRI (level 1.5) são imagens radiometricamente calibradas e geometricamente corrigidas, produzidas pela EUMETSAT para serem usadas na derivação de várias informações geofísicas, tais como os produtos de queimadas.

4.2 O ALGORITMO DE DETECÇÃO DE QUEIMADAS UTILIZADO NO INPE

A detecção de queimadas por satélites geoestacionários foi iniciada no Inpe em 1998, processando imagens do satélite GOES-8. Atualmente, o Instituto processa imagens dos satélites geoestacionários GOES-16 e MGS-3, produzindo dados de focos de queimadas com frequência de até 10 minutos, cobrindo as Américas, África e Europa. O Programa Queimadas do Inpe apresenta na internet diversos produtos, entre eles, imagens com a localização dos focos detectados durante período selecionável e tipo de satélite. Na Fig. 4.1 apresenta-se uma comparação da detecção de focos na imagem vespertina do satélite AQUA (Fig. 4.1A) “de referência”, com 2.300 focos no Brasil, e do conjunto de todas as imagens GOES-16 (Fig. 4.1B), com 5.546 focos no Brasil, no dia 29 de agosto de 2019, conforme consulta no Banco de Dados de Queimadas. Para todo o ano de 2019, os totais desses dois satélites no País foram, respectivamente, 197.632 e 633.111 focos, evidenciando assim o potencial de mais detecções GOES-16 em relação a um satélite de órbita polar, no que pesa a melhor resolução temporal GOES-16 sobre sua pior resolução espacial em relação ao AQUA.

5

RELAÇÃO ENTRE QUEIMADAS E RELÂMPAGOS NO PARQUE NACIONAL DAS EMAS

Vanúcia Schumacher, Alberto Setzer

A história do regime de fogo tem um papel importante na evolução e adaptação do ecossistema de savana, a exemplo do Cerrado brasileiro, contribuindo para sua biodiversidade (Coutinho, 1990; Vicentini, 1999; Durigan; Ratter, 2016).

Embora o fogo seja parte integrante e fundamental na manutenção do Cerrado, seu uso intenso, frequente e descontrolado nas últimas décadas, em associação com as práticas de desmatamento, expansão e atividades agrícolas, prejudicou a integridade ecológica do bioma (Miranda et al., 2004). Muitos dos incêndios se propagam fora de controle sobre unidades de conservação, gerando danos ao clima e aos ecossistemas naturais, além de causar doenças respiratórias, perdas de vidas humanas e bens materiais (Fonseca; Alves; Aguiar, 2019). Neste capítulo, os termos *queimada* e *incêndio* são utilizados como sinônimos, embora de maneira geral incêndio se refira a fogo descontrolado e/ou que cause prejuízos.

A ocorrência de queimadas é quase sempre associada à interação do homem com o meio ambiente e depende de vários fatores além da fonte de ignição, como tipo de vegetação, volume de biomassa, condições topográficas e meteorológicas (Ye et al., 2017). No entanto, queimadas naturais, provocadas por raios, também ocorrem e têm sido reconhecidas em diversos lugares do mundo como uma das principais causas de incêndios florestais (Pineda; Montanyà; Van der Velde, 2014; Abdollahi; Dewan; Hassan, 2019).

Alguns estudos procuraram identificar a ocorrência de queimadas de causa natural no Parque Nacional das Emas (PNE), considerado um dos principais ecossistemas de conservação do Cerrado brasileiro e reconhecido ao longo da história como propenso ao fogo (França; Ramos-Neto; Setzer, 2007). Ramos-Neto e Pivello (2000), usando observação direta no campo, identificaram como naturais 89% das queimadas entre 1995 a 1999 – 75% delas ocorreram durante a estação chuvosa e foram extintas rapidamente, seguidas por precipitação, atingindo menos de 500 hectares; e 25% ocorreram durante

QUEIMA DE VEGETAÇÃO EM ÁREAS PROTEGIDAS NA CAATINGA (2000-2012)

*Alberto W. Setzer, Silvia Cristina de Jesus, Fabiano Morelli, Luis E. Maurano,
Pedro A. Lagden de Souza*

A Caatinga abrange uma área de 844.500 km² (IBGE, 2021) e cobre parte dos Estados da Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e Minas Gerais – ver Fig. 6.1A. Suas maiores extensões de áreas protegidas (APs) estão na Bahia (19.810 km²), Piauí (18.000 km²) e Ceará (9.500 km²), sendo que o Piauí é o Estado com maior percentual desse bioma em relação à extensão estadual (11%) – ver mais detalhes na Tab. 6.1. As áreas protegidas abrangem 30 territórios indígenas (TIs), 28 unidades de conservação estaduais (UCEs) e 15 unidades de conservação federais (UCFs), os quais cobrem 2.210 km², 16.580 km² e 34.940 km², respectivamente, num total de 53.160 km², ou 6,4% da extensão original do bioma, dos quais 590 km² são de sobreposição entre algumas delas (ISA, 2021; ICMBio, 2021; IBGE, 2021; Brasil, 2012b). Nesses valores não estão consideradas reservas particulares do patrimônio natural (RPPNs) e áreas municipais de proteção, que correspondem a ~1.000 km², ou seja, cerca de 0,1% da Caatinga (Maciel, 2010).

O domínio da Caatinga apresenta índices pluviométricos que variam de 250 mm a 900 mm anuais, sendo que em sua maior parte chove menos de 750 mm anuais, concentrados e distribuídos irregularmente no período de novembro a junho; já a temperatura média anual varia em torno de 26 °C. Climaticamente, segundo a classificação Köppen-Geiger, predomina o tipo BSh semiárido quente, com regiões de Aw savânico (Briggs; Smithson, 1986); conforme Nimer (1989), o padrão é tropical quente semiárido, com períodos de seca variando de 6 a 11 meses.

Associada aos períodos de estiagem prolongados e aos aspectos antrópicos do uso do fogo na agropecuária e nos desmatamentos, a ocorrência de queimadas e incêndios florestais é marcante na Caatinga. A Fig. 6.1B mostra a distribuição espacial da densidade de focos de queima de vegetação no bioma para o ano de 2012, com 16.522 detecções pelo satélite de referência (SR) e 74.595 por todos os satélites utilizados no monitoramento do Inpe (Inpe, 2020a, 2020b). Em comparações espaciais e temporais, utiliza-se apenas o SR.

TAB. 6.3 PRINCIPAIS RESULTADOS SOBRE A OCORRÊNCIA DE FOCOS DE QUEIMA NAS UCFs

	AL	BA	CE	MA	MG	PB	PE	PI	RN	SE	Total
Área das UCFs (km²)	114	2.836	9.739	53	91	1	4.026	17.999	13	65	34.939
Número UCFs	1	5	10	1	2	1	4	7	2	1	28
% Área protegida na Caatinga em UCFs	1%	1%	7%	1%	1%	0%	5%	11%	0%	1%	4%
Quantidade de UCFs com focos (SR)	1	3	9	1	2	–	3	7	1	–	22
% UCFs com focos (SR)	100%	60%	90%	100%	100%	0%	75%	100%	50%	0%	79%
Quantidade de UCFs com focos (todos os satélites)	1	5	10	1	2	1	3	7	1	1	25
% UCFs com focos (todos os satélites)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	75%	100%	50%	100%	89%
Focos SR											
2000	–	15	112	–	2	–	50	159	–	–	338
2001	–	27	344	3	4	–	64	348	–	–	790
2002	–	18	560	–	4	–	112	549	–	–	1.243
2003	6	23	648	–	1	–	141	518	–	–	1.337
2004	–	26	672	–	5	–	113	581	–	–	1.397
2005	–	39	510	–	–	–	90	501	–	–	1.141
2006	–	17	352	1	6	–	50	240	–	–	666
2007	1	68	270	–	1	–	170	358	–	–	868
2008	–	237	314	1	–	–	140	359	–	–	1.051
2009	–	9	371	1	–	–	132	419	–	–	932
2010	–	19	357	2	40	–	166	670	–	–	1.254
2011	–	13	286	6	–	–	142	349	–	–	796
2012	–	39	375	5	2	–	101	492	–	–	1014
Total de focos (SR) – 2000-2012	7	550	5.171	19	65	–	1.471	5.543	1	–	12.827
Total de focos (todos os satélites) –2000-2012	29	3.049	17.745	107	158	2	6.397	22.403	3	21	49.914

A DEGRADAÇÃO FLORESTAL CAUSADA POR QUEIMADAS: MÉTODOS E APLICAÇÕES NA AMAZÔNIA

Egidio Arai, Andeise Cerqueira Dutra,

Kaio Allan Cruz Gasparini, Valdete Duarte, Yosio Edemir Shimabukuro

As taxas de desmatamento em florestas tropicais e seus efeitos negativos têm sido amplamente evidenciados nas últimas décadas (Inpe, 2008; Tyukavina et al., 2017). Entretanto, embora o desmatamento seja a principal força destrutiva (Asner et al., 2005), outros distúrbios, como o corte seletivo e o fogo, têm avançado em frequência e extensão nas áreas florestadas (Asner et al., 2005; Aragão et al., 2008, 2014).

Na Amazônia Legal, estima-se que 9% da área total afetada por distúrbios florestais em florestas primárias foi acometida pelo fogo, sendo que, junto ao corte seletivo e ao desmatamento em florestas não primárias, representa uma área estimada de 53% da perda bruta de cobertura florestal e de 26% a 35% da perda total de carbono acima do solo entre 2000 e 2013 (Tyukavina et al., 2017). Esses distúrbios tornam-se, assim, uma das principais causas de degradação florestal e emissões de carbono na Amazônia, além de induzirem mudanças na estrutura florestal, na composição de espécies e nos estoques de biomassa e de favorecerem a conversão ao desmatamento (Watson et al., 2018; Barlow et al., 2016; Davidson et al., 2012; Numata et al., 2010) (Fig. 7.1).

No que concerne às relações entre o fogo e a degradação florestal, é importante destacar que historicamente o fogo tem sido a ferramenta principal em uma gama de atividades humanas (Earl; Simmonds, 2018; Piromal et al., 2008), sem ser confiável, pois pode sair do controle e causar incêndios desenfreados em florestas (Bowman et al., 2009). Assim, a frequência e a intensidade de queimadas em florestas não diminuíram, sendo observada a tendência de aumento de 1,4% ano⁻¹ das áreas queimadas na América do Sul; as perspectivas de degradação geradas por esse fenômeno continuam sendo risco crescente em várias regiões (Davidson et al., 2012; Andela et al., 2017). Além disso, a falha em combater o uso do fogo pode desencorajar políticas governamentais (Aragão; Shimabukuro, 2010) para a redução de emissões de gases de efeito estufa provenientes do desmatamento e da

NBR, com acurácia de 83% e 76% respectivamente, apesar do decréscimo em ambos os métodos quando utilizadas imagens provenientes do sensor OLI/Landsat-8 nesses pequenos fragmentos.

Em geral, as técnicas de sensoriamento remoto desenvolvidas para mapear florestas degradadas por queimadas variam principalmente em relação a dois fatores: o produto utilizado para processamento e o número de imagens utilizadas (Quintano et al., 2006). Assim, os métodos aqui apresentados permitem tanto a detecção de alterações em imagens de média resolução espacial como o monitoramento da degradação utilizando séries temporais em imagens de baixa resolução temporal.

7.2 PANORAMA CONCEITUAL PARA O MONITORAMENTO OPERACIONAL DA DEGRADAÇÃO FLORESTAL

O monitoramento da floresta amazônica está consolidado no âmbito do Programa de Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (Prodes) desde o final da década de 1980 (Inpe, 2008). O monitoramento é realizado com o objetivo de detectar alterações marcantes na floresta, conhecidas como corte raso. No entanto, atividades de degradação nas florestas, tais como queimadas e exploração seletiva, não são contempladas. Para preencher essa lacuna, uma solução utilizada pelos pesquisadores do Inpe foi estabelecer o Projeto DEGRAD.

O DEGRAD identifica e mapeia, em tempo quase real, as áreas em que ocorre degradação florestal, utilizando técnicas de realce em imagens orbitais, o MLME e elementos básicos (textura, forma e contexto) aplicados às imagens provenientes dos satélites IRS (*Indian Remote Sensing Satellite*) e CBERS (*Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres*) (Inpe, 2020a, 2020d). No entanto, somente a partir de 2019 os dados disponíveis passaram a diferenciar os agentes de degradação, como incêndio e exploração seletiva da madeira.

Esses dois tipos de degradação florestal, corte seletivo da madeira e incêndio florestal, possuem dinâmicas diferentes e merecem atenção distinta no que tange ao estudo ecológico. Com isso, existe a necessidade de aplicar diferentes técnicas e abordagens para mapeamento dos diferentes tipos de degradação florestal.

Atualmente, para o mapeamento de queimadas, as abordagens baseadas em objetos (segmentos) são as mais efetivas e utilizadas (Shimabukuro et al., 2014; Melchiori, 2014), pois consideram também a forma e textura dos objetos em relação à vizinhança, além das suas informações espectrais. Com isso, Sertel e Alganci (2016) reportaram a acurácia de 0,93% na classificação baseada em objetos e de 0,74% quando comparada àquela baseada em *pixel*. Considerando o mapeamento de exploração seletiva, as abordagens baseadas em *pixel* são as mais utilizadas, visto que o tamanho dos pátios e carregadores utilizados para o arraste das árvores cortadas

PADRÕES E IMPACTOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NOS BIOMAS BRASILEIROS

Wesley Augusto Campanharo, Alana Kasahara Neves, Aline Pontes Lopes, Andeise Cerqueira Dutra, Debora Cristina Cantador Scalioni, Vinicius Peripato Borges Pereira, Liana Anderson, Luiz E. O. C. Aragão

O fogo é um fator de risco para a vida, saúde e atividades econômicas dos seres humanos e modifica processos ecossistêmicos, como os ciclos biogeoquímicos e o clima, em várias partes do planeta (Bowman et al., 2009; Earl; Simmonds, 2018). Apesar do declínio global de áreas queimadas observado nos últimos anos, uma tendência inversa é observada em regiões com formações florestais de dossel fechado, devido à intensificação da agricultura (Andela et al., 2017). Esse é um fato preocupante, pois alguns modelos climáticos desenvolvidos pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) indicam tendências negativas na chuva para os trópicos no final do século XXI (Marengo et al., 2009; Settele et al., 2014), causando aumento na frequência e intensidade das secas nessas regiões. Com esse cenário, existe uma tendência de as queimadas agrícolas permearem cada vez mais as áreas florestadas, evoluindo para incêndios descontrolados que causam a degradação dos estoques de carbono e da biodiversidade florestal. O conhecimento detalhado dos padrões de incêndios florestais no Brasil é, portanto, fundamental para que os impactos negativos dos incêndios nas populações e ecossistemas possam ser evitados (Aragão et al., 2008).

O entendimento do efeito combinado da influência antropogênica com as variações climáticas na frequência do fogo em florestas requer a análise e o monitoramento de longo prazo dos incêndios florestais, abrangendo grandes extensões territoriais. Esse monitoramento permite a compreensão dos principais fatores que impulsionam os padrões temporais e espaciais do fogo, o que possibilita a previsão de ocorrência e impactos desses eventos (Earl; Simmonds, 2018).

O aumento da pressão internacional para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂) (UNFCCC, 2011), vem contribuindo para o estabelecimento de políticas governamentais visando ao controle do desmatamento, especialmente na Amazônia (Nepstad et al., 2014; Mello; Artaxo, 2017).

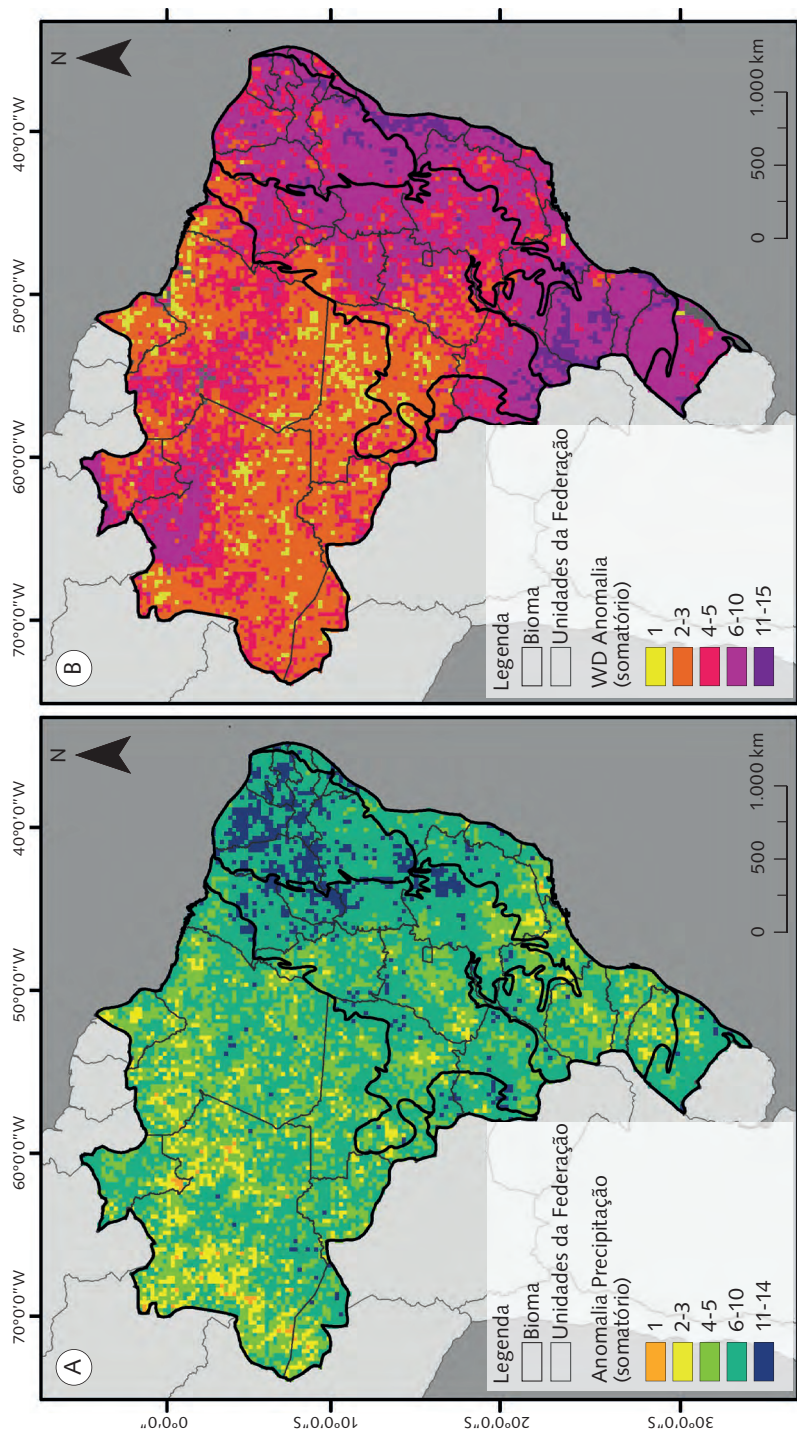


FIG. 8.5 Espacialização do somatório do número de meses na série temporal (2003-2016) em que cada célula de 0,25° apresentou (A) anomalia positiva de precipitação e (B) anomalia de déficit hídrico acumulado, a 95% de confiança. Os valores de anomalia aqui utilizados indicam como a precipitação (mm/mês) e o déficit hídrico (mm/mês) de cada mês e em cada célula espacial (0,25°) se comportaram em relação à média mensal do mesmo mês, entre 2003 e 2016

RESPOSTAS DA VEGETAÇÃO AO FOGO: PERSPECTIVAS DO USO DE SATÉLITES AMBIENTAIS NO BRASIL

*Joana Nogueira, Fausto Machado-Silva,
Roberta B. Peixoto, Renata Libonati*

Os eventos de fogo são perturbações significativas nos processos e padrões espaciais de funcionamento da paisagem, pois influenciam a distribuição das espécies, a estrutura dos ecossistemas, os ciclos biogeoquímicos e o clima em escala local, regional e global (Bowman et al., 2009, 2011). Cerca de 4% da área vegetal global é queimada anualmente, levando à emissão de 2 Pg C (pentagramas de carbono) para a atmosfera (Hantson et al., 2016; Giglio; Randerson; Van der Werf, 2013), o que equivale a cerca de 50% das emissões antropogênicas pela queima de combustíveis fósseis. As regiões tropicais contribuem com mais de 60% das áreas queimadas anualmente (IPCC, 2014) e apresentam uma alta diversidade de tipos funcionais de plantas com diferentes respostas a eventos de fogo, gerados tanto por fatores ambientais como antropogênicos (Bowman et al., 2011).

Diferentemente da rápida destruição causada pelo fogo, a regeneração da vegetação é um processo lento que causa um desbalanço entre impactos e recuperação do meio ambiente (Gouveia; DaCamara; Trigo, 2010). Essa recuperação depende do grau de degradação ambiental causado pelo incêndio, além de atributos intrínsecos das comunidades e dos processos de sucessão ecológica de cada localidade (Ireland; Petropoulos, 2015). Por isso, é extremamente importante conhecer e identificar o impacto do fogo, monitorar a recuperação da vegetação e entender os processos da dinâmica espaçotemporal do regime de queimadas em cada caso de estudo. Essas informações são cruciais para estimar os custos relativos aos impactos, prever as reincidências de incêndios florestais e subsidiar o manejo mais eficiente de áreas ameaçadas pelo fogo.

Entretanto, o regime de fogo envolve fatores de diferentes escalas espaçotemporais que impulsionam a combustão e propagação do fogo na paisagem, como intensidade, frequência de ocorrência das ignições, sazonalidade, extensão ou padrão dos tipos de combustível/vegetação, topografia e tipo de uso do solo por atividades humanas (Hantson et al., 2016). Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto têm se mostrado ferramentas importantes para quantificar o regime de fogo, especialmente em regiões onde

QUADRO 9.1 (Continuação)

Índice	Parâmetro avaliado	Aplicabilidade	Referências
Índice Keetch Byram (KBDI)	Modelo empírico de balanço hídrico, assumindo uma capacidade de armazenamento de ~200 mm	Largamente utilizado no Mediterrâneo para simular a variabilidade sazonal do teor de água do combustível no solo superficial, onde a água do solo pode atingir o seu ponto de murcha rapidamente	Keetch e Bryam (1968) e Pellizzaro et al. (2007)
Índice de seca de Palmer (PDSI)	Os efeitos da ETP e da distribuição sazonal de chuvas, ponderada pela capacidade de campo da área de estudo	Utilizados em várias regiões em sistemas de controle de fogo, como o sistema canadense (FWI), americano (<i>national fire danger rating system</i> , NFDRS), australiano (<i>forest fire danger rating system</i> , FFDRS) e alemão (<i>Deutscher Wetter Dienst</i> , DWC)	Palmer (1965)

9.3 REGENERAÇÃO DA VEGETAÇÃO PÓS-FOGO

Após a queima de um fragmento florestal, a vegetação tem sua estrutura e composição de espécies alteradas (Cochrane; Schulze, 1999). As espécies de árvores mais comuns na localidade vão apresentar a maior mortalidade, e as espécies raras podem, inclusive, sofrer extinção local (Gerwing, 2002). Os incêndios podem ocorrer em toda a floresta, abrir clareiras e expor o solo à radiação solar, ou, ainda, ocorrer nos estratos florestais inferiores, onde a área queimada fica encoberta pelo dossel (Alencar et al., 2015).

Em muitas situações, as áreas queimadas resultam em um mosaico de vegetação com diferentes estágios de desenvolvimento, o que implica fragmentos em diferentes processos de recuperação (Chambers et al., 2013). Assim, a área queimada será recolonizada a partir da rebrota e chegada de propágulos de novos indivíduos, dando início então ao primeiro estágio do desenvolvimento da sucessão ecológica, o qual depende do tempo e do grau de degradação de cada localidade (Walker et al., 2010). Sendo esse processo direcionado pelo fogo ou por outras forças externas ao ambiente, é denominado sucessão alogênica (gerada externamente) (Odum, 1988).

ESTIMATIVAS ANUAIS DE BIOMASSA CONSUMIDA E DE EMISSÕES DE CO₂, CO E CH₄ NO CERRADO A PARTIR DE ÁREAS QUEIMADAS EM IMAGENS LANDSAT (2011-2015)

Margarete N. Sato, Alberto W. Setzer

O monitoramento de áreas queimadas de savanas tem sido reportado na literatura devido à sua contribuição na emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Dwyer et al., 2000; Van der Werf et al., 2010, 2017). O fogo é fator determinante na diversidade fisiológica do Cerrado; no entanto, a frequência e o regime de queima não são conhecidos (Coutinho, 1990; Miranda et al., 2009; Miranda; Neto; Castro-Neves, 2010). A ocorrência do fogo natural prevalece na estação chuvosa, e durante a estação seca o fogo tem origem antrópica, sendo que as fisionomias mais abertas, como savanas e campos, sofrem maior frequência de queima do que as formações florestais (Dias, 2006; França et al., 2007; Pereira-Júnior et al., 2014). A caracterização do fogo é variada, tanto pela origem natural ou antrópica quanto pela frequência, época e severidade; além disso, para as diferentes fitofisionomias, há locais com registros anuais ou com décadas sem qualquer ocorrência de queima (Alvarado et al., 2017; Pereira-Júnior et al., 2014; França et al., 2007; Dias, 2006; Medeiros; Fiedler, 2004; Ramos-Neto; Pivello, 2000).

O bioma Cerrado, com ~2 milhões de km², predomina na porção central do País e está presente em dez Estados da federação e no DF (Sano et al., 2007). As formações campestres e savânicas são especialmente relevantes devido à sua grande diversidade fitofisiológica e biológica e à grande extensão, uma vez que corresponde a 67,4% da área natural do bioma. A maioria das queimadas naturais e antrópicas nas formações campestres e savânicas consome principalmente a biomassa denominada combustível fino, isto é, gramíneas, serapilheira e ramos finos de espessura < 6 mm, localizados sobre o solo até a altura de 2,8 m (Castro; Kauffman, 1998; Miranda et al., 2009; Miranda; Neto; Castro-Neves, 2010). O fogo nas formações florestais resulta da ação antrópica e, nesse caso, é facilitado pela mudança na estrutura da vegetação, seja pelo corte seletivo ou pelo desmatamento com ou sem destinação da floresta para outros usos (Balch et al., 2008), quando o material combustível inclui toda a biomassa aérea da vegetação afetada.

EVOLUÇÃO DO MONITORAMENTO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS E QUEIMADAS NO ESTADO DO ACRE

Vera Reis, Irving Foster Brown

Na segunda metade da década de 1980, foram realizados na Amazônia os experimentos científicos do Experimento Troposférico Global/Experimento da Camada Limite Atmosférica (GTE-ABLE-2A e 2B), coordenados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e pela Agência Estadunidense de Atmosfera e Espaço (Nasa). Nesses estudos, descobriu-se a existência de grandes queimadas na região, produzindo nuvens de fumaça e afetando áreas extensas na região (Andreae et al., 1988), o que despertou o interesse científico para a questão referente às emissões de carbono na atmosfera e às mudanças climáticas (Simons, 1988).

Na sequência, foi montado o Programa Experimento de Grande Escala Biosfera-Atmosfera (LBA) na década de 1990, com investimentos do Ministério de Ciência e Tecnologia e da Nasa (Avisar et al., 2002; Gonçalves et al., 2013). Esse programa teve uma dupla tarefa: entender como a Amazônia atua em termos de entidade ambiental regional e como os fatores biofísicos afetam a sustentabilidade do desenvolvimento na Amazônia (Lahsen; Nobre, 2007).

Outro objetivo do LBA foi fortalecer comunidades científicas na Amazônia, e os projetos realizados incluíram capacitação científica local. Foster Brown, mantendo seu interesse no tema (Setzer; Brown, 1990), foi um dos investigadores principais de dois projetos apoiados pelo LBA para avaliar queimadas em associação com as mudanças do uso da terra e indiretamente influenciar a sustentabilidade do desenvolvimento regional. Como o Acre possuía relativamente poucos cientistas ambientais, promoveu-se a capacitação de alunos de graduação e pós-graduação para fomentar a comunidade científica local. Assim, formou-se em 1997 o Setor de Estudos do Uso da Terra e de Mudanças Globais (Setem), do Parque Zoológico da Universidade Federal do Acre (Ufac).

Desde a década de 1980 ficaram evidentes o uso e o impacto do fogo na vegetação da Amazônia; porém, na percepção científica de então, a Amazônia Ocidental era considerada úmida demais para ter incêndios florestais. Entretanto, trabalhos

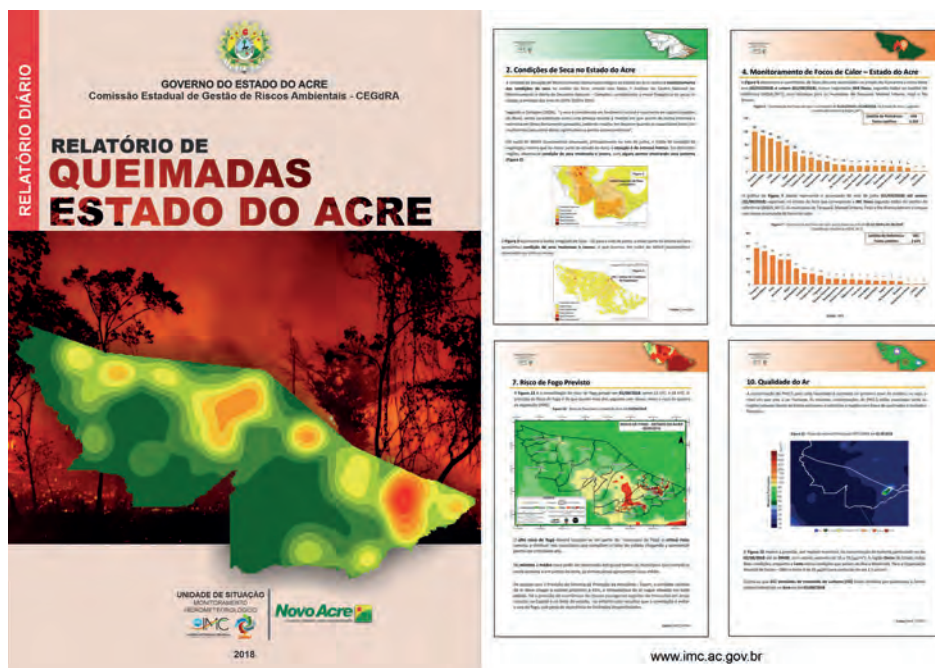


FIG. 11.6 Relatório de queimadas (30 de agosto de 2016) divulgado pela Unidade de Situação de Monitoramento Hidrometeorológico com base nos produtos do Programa Queimadas do Inpe

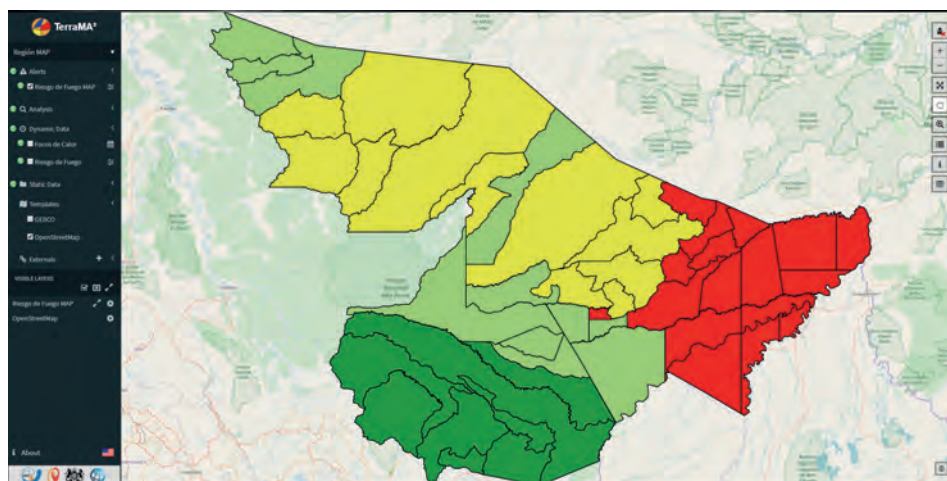


FIG. 11.7 Sistema de alerta antecipado com as faixas de risco de fogo indicadas em cores, gerado pelo TerraMA2 para a região MAP (2 de agosto de 2018, 15h37min)

Complementando as análises em execução, a partir da nova Plataforma Terra-MA2Q, em 2018, o risco de incêndio florestal do Programa Queimadas do Inpe (ver Cap. 1 deste livro) foi incorporado e tem sido utilizado como importante estra-

PALEOFOGO E O POTENCIAL IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA INCIDÊNCIA DE QUEIMADAS

Flavio Justino, Jackson Martins Rodrigues, Alex S. da Silva

O fogo sempre foi um elemento natural no ambiente, de ocorrência controlada principalmente pelo clima. As secas sazonais, a temperatura, a umidade e os ventos são responsáveis pelo controle de biomassa morta e pela propagação do fogo em quase todos os tipos de vegetação (Harrison; Marlon; Bartlein, 2010), e a precipitação foi o mais importante elemento na determinação da ocorrência de incêndios durante o período pré-industrial (Pechony; Shindell, 2010). Contudo, nos séculos que sucederam a Revolução Industrial, as ações humanas passaram a ser a principal causa.

O aumento na frequência e nos impactos causados pelos incêndios nas últimas décadas tem causado grande preocupação, pois resulta da intensificação de atividades antrópicas, como manejo de áreas para agricultura, e apresenta consequências nas mudanças climáticas. Espera-se que a frequência de incêndios aumente na maioria dos cenários de mudanças climáticas, e os custos relacionados ao manejo e ao dano de incêndios florestais já mostram crescimento nos últimos anos (Denis et al., 2012).

Os incêndios produzem e acumulam registros no ambiente, como carvão, resíduos de carbono e cicatrizes em anéis de árvores, que são utilizados para reconstruir a dinâmica local do fogo (Whitlock; Bartlein, 2004; Mouillot; Field, 2005; Gavin et al., 2007; McConnell et al., 2007; Falk et al., 2011). Estudos nesse sentido cobrem períodos que variam de décadas até milênios (Carcaillet et al., 2002; Brown et al., 2005; Marlon et al., 2008; Iglesias; Whitlock, 2014). A história contada por essas reconstruções geralmente fornece uma perspectiva contínua dos regimes de fogo em diferentes escalas temporais (décadas, séculos ou milênios), e sua consistência depende das taxas de sedimentação, deposição e preservação/decomposição, que podem afetar a interpretação dos resultados (Atahan; Dodson; Itzstein-Davey, 2004; Power et al., 2006). Essas reconstruções destacaram-se nas últimas décadas em função das mudanças climáticas potenciais, uma vez que os incêndios têm impactos diretos sobre o armazenamento de carbono, composição atmosférica, diversidade de ecossistemas e práticas de manejo do solo (Van der Werf et al., 2006; Denis et al., 2012; Kirchgeorg et al., 2014).