



Compreendendo a ação do fogo nos ecossistemas brasileiros

Antonio Henrique Cordeiro Ramalho^{1*}

<https://orcid.org/0000-0002-0037-5422>

* Contato principal

Nilton Cesar Fiedler²

<https://orcid.org/0000-0002-3895-661X>

Henrique Machado Dias²

<https://orcid.org/0000-0003-2217-7846>

Telma Machado de Oliveira Peluzio²

<https://orcid.org/0000-0003-0462-9239>

Alexandre Rosa dos Santos²

<https://orcid.org/0000-0003-2617-9451>

Fernanda Moura Fonseca Lucas²

<https://orcid.org/0000-0002-3181-2568>

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará/UFOPA, Instituto de Biodiversidade e Florestas, Santarém/PA. Brasil. CEP: 68.035-110. <henriquecr2012@hotmail.com>.

² Universidade Federal do Espírito Santo/UFES, Vitória/ES. Brasil. CEP: 29.075-910. <fiedler@cnpq.pq.br, henridias@yahoo.com.br, tmpeluzio@ifes.edu.br, alexandre.santos@pq.cnpq.br, fernanda.lucas@edu.ufes.br>.

Recebido em 14/12/2021 – Aceito em 30/10/2023

Como citar:

Ramalho AHC, Fiedler NC, Dias HM, Peluzio TMO, dos Santos AR, Lucas FMF. Compreendendo a ação do fogo nos ecossistemas brasileiros. Biodivers. Bras. [Internet]. 2024; 14(1): 8-25. doi: 10.37002/biodiversidadebrasileira. v14i1.2180

Palavras-chave:

Regime de fogo; incêndios florestais; ecossistemas dependentes do fogo; ecossistemas sensíveis ao fogo; Cerrado; Mata Atlântica.

RESUMO – Os incêndios florestais apresentam efeitos adversos ao planeta, como fragmentação florestal, perda de biodiversidade, poluição do ar e ameaça à vida e à saúde humana. No entanto, a ecologia do fogo atesta que o fogo é também um evento ecológico, dinâmico e indispensável para a sobrevivência de determinados ecossistemas. Devido a essa ambiguidade, esta revisão teve como objetivo sintetizar informações técnicas, literárias e científicas que auxiliem no entendimento das relações entre os ecossistemas e os incêndios florestais. Assim, foram abordados assuntos diretamente ligados à ecologia do fogo, como a dinâmica dos regimes de fogo, o comportamento do fogo, a relação entre os incêndios florestais e as emissões de carbono no Brasil. Mediante as informações compiladas, percebe-se que o fogo é indispensável para a sobrevivência de muitas fitofisionomias brasileiras existentes, principalmente no Cerrado, Pantanal e Pampa. Uma série de adaptações de espécies vegetais presentes em ambientes influenciados pelo fogo foram apresentadas. Também foi investigado o papel das variáveis no comportamento do fogo e como os incêndios estão relacionados às alterações climáticas. Estima-se que queimas não associadas ao desmatamento totalizaram 3,16 GtCO₂ de emissões imediatas entre 1990 e 2020, sendo um dos principais contribuintes para emissão de gases de efeito estufa. Diante desse contexto, esta revisão ressalta a importância do desenvolvimento de políticas públicas para efeitos de curto e longo prazo de maneira a popularizar a conservação e o uso sustentável do fogo em ecossistemas propensos a ação dele.



Understanding the action of fire in brazilian ecosystems

Keywords:

Fire regime; forest fires; fire dependent ecosystems; fire-sensitive ecosystems; Cerrado; Atlantic Forest.

ABSTRACT – Forest fires have adverse effects on the planet, such as forest fragmentation, loss of biodiversity, air pollution and threat to human life and health. However, the Ecology of Fire attests that fire is also an ecological event, dynamic and indispensable for the survival of certain ecosystems. Due to this ambiguity, this review aimed to synthesize technical, literary and scientific information that help in understanding the relationships between ecosystems and forest fires. Thus, issues directly related to fire ecology were addressed, such as the dynamics of fire regimes, fire behavior, the relationship between forest fires and carbon emissions in Brazil. Based on the information compiled, it can be seen that fire is essential for the survival of many Brazilian phytophysiognomies that exist mainly in the Cerrado, Pantanal and Pampa. A series of adaptations of plant species present in environments influenced by fire were presented. The role of variables in fire behavior and how fires are related to climate change were also investigated. It is estimated that burns not associated with deforestation totaled 3.16 GtCO₂ of immediate emissions between 1990 and 2020, being one of the main contributors to greenhouse gas emissions. Given this context, this review emphasizes the importance of developing public policies for short and long-term effects in order to popularize the conservation and sustainable use of fire in ecosystems prone to fire.

Comprender la acción del fuego en los ecosistemas brasileños

Palabras clave:

Régimen de incendios; incendios forestales; ecosistemas dependientes del fuego; ecosistemas sensibles al fuego; Grueso; Bosque Atlántico.

RESUMEN – Los incendios forestales tienen efectos adversos en el planeta, como la fragmentación de los bosques, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del aire y la amenaza a la vida y la salud humanas. Sin embargo, la Ecología del Fuego da fe de que el fuego es también un evento ecológico, dinámico e indispensable para la supervivencia de ciertos ecosistemas. Debido a esta ambigüedad, esta revisión tuvo como objetivo sintetizar información técnica, literaria y científica que ayude a comprender las relaciones entre los ecosistemas y los incendios forestales. Así, se abordaron cuestiones directamente relacionadas con la ecología del fuego, como la dinámica de los regímenes de fuego, el comportamiento del fuego, la relación entre los incendios forestales y las emisiones de carbono en Brasil. Con base en la información recopilada, se puede ver que el fuego es esencial para la supervivencia de muchas fitofisionomías brasileñas que existen principalmente en el Cerrado, Pantanal y Pampa. Se presentaron una serie de adaptaciones de especies vegetales presentes en ambientes influenciados por el fuego. También se investigó el papel de las variables en el comportamiento del fuego y cómo se relacionan los incendios con el cambio climático. Se estima que las quemas no asociadas a la deforestación totalizaron 3,16 GtCO₂ de emisiones inmediatas entre 1990 y 2020, siendo uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero. Dado este contexto, esta revisión enfatiza la importancia de desarrollar políticas públicas con efectos a corto y largo plazo para popularizar la conservación y el uso sostenible del fuego en ecosistemas propensos a incendios.

Introdução

O fogo é uma reação de decomposição induzida pelo calor, conhecida como pirólise química, causada pela combinação sinérgica entre fonte de energia,

comburente (oxigênio) e material combustível[1][2]. Em um contexto prático, pode ser considerado como uma ferramenta indispensável para a sobrevivência e manutenção da Terra, sendo um componente modelador da paisagem e dos processos ecológicos



de alguns ecossistemas, mas que atua também como um dos mais devastadores distúrbios ambientais do planeta, os incêndios florestais[3][4].

Antes de apresentar efeitos positivos e negativos do fogo, é importante elucidar que há diferenças entre o uso do fogo para manejo agrícola de forma controlada e os incêndios florestais. As queimas controladas raramente conferem alto grau de risco a uma comunidade ou ecossistema; já os incêndios florestais são definidos como todo evento de fogo que incide em áreas cobertas por vegetação, proveniente de ações antrópicas ou naturais, que fogem do controle[5][6]. São eventos periodicamente recorrentes no mundo e são considerados como um dos maiores fatores de degradação de ecossistemas naturais, devido ao seu elevado poder destrutivo e dificuldade de combate[7][8].

Dante desse cenário, os incêndios florestais apresentam muitos efeitos adversos ao planeta, tais como a fragmentação florestal, perda de biodiversidade, aumento da taxa de erosão e de poluição do ar, e ameaça à vida e à saúde humana[4] [5][9]. Apesar da notoriedade dos riscos associados aos incêndios florestais, os avanços científicos acerca do entendimento da interação do fogo com os ecossistemas têm alterado, de maneira significativa, as perspectivas dos novos estudos sobre o tema[4] [10–13].

Bases de dados científicos que antes eram abastecidos, majoritariamente, com pesquisas focadas no poder destrutivo dos incêndios, agora dividem espaço com análises baseadas nas premissas de que o fogo também é uma força ecológica, dinâmica e indispensável para a sobrevivência de determinados ambientes[11–15]. Essa visão da relação do fogo com o meio biótico tem sido viabilizada pela ecologia do fogo, que é um ramo da ciência que estuda a sua dinâmica nos ecossistemas, sendo adaptados ou não à sua ocorrência, com o objetivo de determinar as maneiras pelas quais o fogo afeta os organismos e os processos ecológicos[12].

Com o passar dos anos, os ecólogos passaram a tratar o fogo como um evento que influencia diretamente a modelagem dos ambientes, considerando os regimes de incidência em cada nível de organização biológica, seja em populações, comunidades ou ecossistemas[16]. Diante desse cenário, estudos sobre comportamento do fogo são fundamentais para compreender as implicações para recuperação e restauração de ambientes afetados por

incêndios[17]. Caso não sejam conhecidas as causas e a forma como o fogo pode agir em determinados cenários, as gestões de áreas naturais são afetadas, podendo acarretar consequências até mesmo para ambientes pirodiversos.

Dado o fato de que a ecologia do fogo ser uma ciência emergente frente aos demais segmentos científicos acerca do fogo, esta revisão tem como objetivo principal a síntese de informações técnicas, literárias e científicas que auxiliem no entendimento das relações entre os ecossistemas brasileiros e os incêndios florestais. Para tal, serão abordados: a dinâmica e as adaptações dos ecossistemas aos regimes de fogo; o comportamento do fogo; e a relação entre os incêndios florestais e as queimas prescritas com as emissões de carbono.

Desenvolvimento

A dinâmica dos regimes de fogo

Inicialmente, “regime de fogo” era um termo utilizado pelos ecólogos e gestores para unificar informações acerca das características e dimensões da ocorrência de incêndios florestais em uma área ou ecossistema em particular[18]. Porém, com o passar dos anos, diversos pesquisadores sentiram a necessidade de considerar o papel ecológico e econômico dos incêndios, o que culminou com a atualização da lista de parâmetros e dos significados incluídos nas definições de regime do fogo[18]. A partir disso, o termo tem sofrido alterações e atualizações à medida que novos estudos surgem. Atualmente, um conceito consideravelmente difundido e utilizado pela comunidade acadêmica é de que o regime do fogo é o conjunto de características e padrões de ocorrência de incêndios florestais relacionados a frequência de ocorrência, tamanho, tipo, sazonalidade, intensidade e severidade das chamas[19–21].

Cada ecossistema apresenta um padrão de regime do fogo distinto, haja vista que cada ambiente possui suas particularidades quanto à composição e estrutura vegetal, às condições climáticas e fontes de ignição[22]. Essas variáveis proporcionam divergências espaço-temporal na ocorrência de incêndios, definindo, assim, os regimes de fogo. Os incêndios são diretamente ligados às individualidades bióticas e abióticas, de modo que os regimes influenciam nas características do meio e vice-versa[12][22].



Quadro 1 – Glossário de termos relacionados ao regime de fogo.

Termo	Definição
Frequência	Número de incêndios que ocorreram em uma área em um dado período
Intensidade	Magnitude com que as chamas atingem a vegetação
Sazonalidade	Época do ano em que ocorre o incêndio
Tamanho	Extensão espacial do incêndio
Tipo	Classificação dos incêndios com base no seu grau de envolvimento em cada estrato combustível florestal (subterrâneo, superficial ou de copa)
Severidade	Nível do impacto causado pelo incêndio na área

Fonte: [19-21]

As alterações nos regimes de fogo influenciam diretamente nas características ambientais do ecossistema, modificando toda estrutura e composição da vegetação de uma determinada área, em escala local ou regional[19][23]. Para melhor entender a interação entre o fogo e os ecossistemas, [24] criaram três grandes grupos:

- **Ecossistemas independentes do fogo:** nesses ambientes, as ocorrências de fogo são muito raras, devido às condições climáticas desfavoráveis ou à escassez de biomassa para continuidade do fogo. No Brasil, podemos citar como exemplo a Caatinga.
- **Ecossistemas dependentes do fogo:** são ambientes propensos ao fogo e inflamáveis; a maior parte das espécies presentes coevoluíram com a passagem do fogo e, portanto, desenvolveram mecanismos para sobreviver e se beneficiar desses eventos. Estão distribuídos em todo globo, sendo exemplos brasileiros o Cerrado, Pampa e Pantanal.
- **Ecossistemas sensíveis ao fogo:** o fogo nesses ecossistemas proporciona alta taxa de mortalidade, uma vez que a maioria de suas espécies não apresentam adaptações favoráveis a passagem desses eventos. Sendo assim, os incêndios podem interromper os processos ecológicos, eliminando alguns indivíduos ou erradicando espécies que não evoluíram sob essa força seletiva. As florestas tropicais como a Amazônia e a Floresta Atlântica são exemplos brasileiros.

Dentre as ecorregiões avaliadas no estudo de [24], aproximadamente 46% são caracterizadas como dependentes e precisam ser queimadas sob um

regime de fogo. As demais ecorregiões correspondem a 36% de ambientes sensíveis ao fogo e 18% como independentes do fogo. É importante elucidar que nenhum bioma apresenta vegetação com sensibilidade única ao fogo, já que são constituídos por diferentes fitofisionomias. Mosaicos de vegetações sensíveis estão presentes em ambientes dependentes, assim como manchas de ambientes pirofíticos podem estar presentes em matrizes sensíveis[25].

Incêndios florestais em ecossistemas brasileiros dependentes do fogo

No Brasil, os ecossistemas dependentes do fogo são formados por fitofisionomias como campos e savanas presentes principalmente no Cerrado, Pampa e Pantanal[25]. No entanto, essas fitofisionomias também estão dentro de florestas tropicais, como os campos sulinos na Floresta Atlântica. Cerca de 5% do bioma Amazônia é formado por manchas de savanas e campinaranas (Figura 1), também influenciadas pelo fogo[26][27].

Em ambientes dependentes do fogo, as ocorrências de incêndios florestais (quando o regime de fogo está regulado com as potencialidades e necessidades do ambiente) podem apresentar benefícios[25][28]. Nesses ambientes, compostos especialmente por vegetação rasteira, o fogo consome os tecidos finos e inflamáveis das gramíneas rapidamente, de maneira que as plantas e os vertebrados não sofrem danos muito severos. Além disso, o isolamento térmico fornecido pelo solo desses ambientes não permite que o calor gerado pelos incêndios penetre na camada subsuperficial do solo; assim, as sementes e outras estruturas vegetais

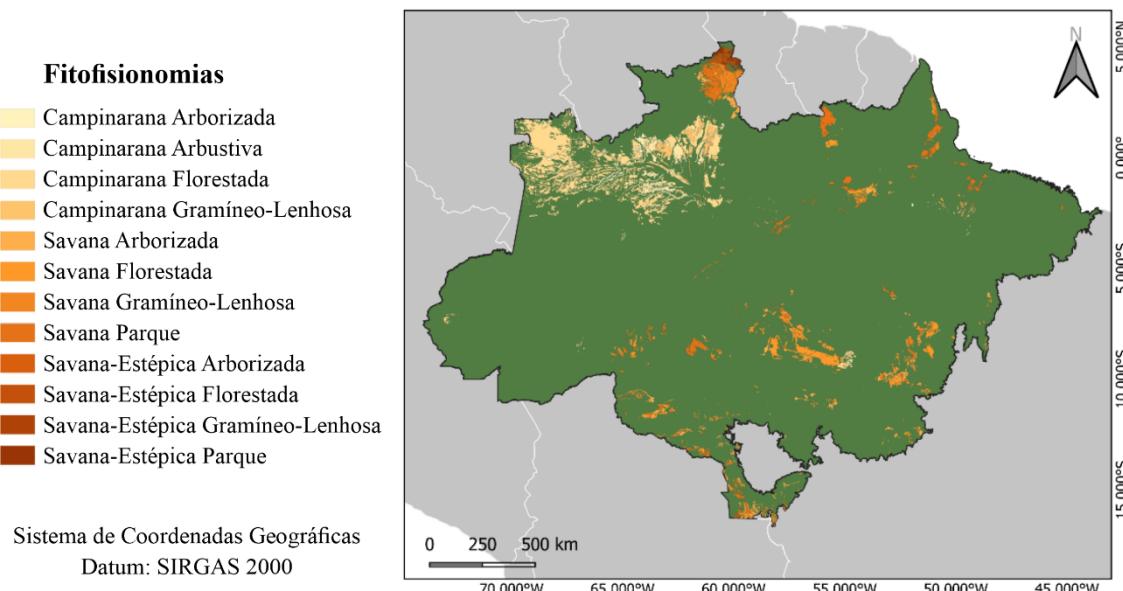


Figura 1 – Distribuição das fitofisionomias amazônicas influenciadas pelo fogo.

ativas enterradas não são destruídas e as plantas podem voltar a brotar, logo após a passagem das chamas[25].

Registros filogenéticos da flora endêmica do Cerrado indicam que as diferentes linhagens começaram a se diversificar há aproximadamente 10 milhões de anos. Nesse mesmo período, foi impulsionado o surgimento das gramíneas C4 (plantas que, através do mesófilo, capturam o CO₂ e o transformam em compostos com quatro carbonos, que as permite economizarem água e crescerem melhor em ambientes quentes e secos) altamente suscetíveis a incêndios[29]. Essas evidências mostram que algumas das espécies do Cerrado tiveram que desenvolver mecanismos para suportarem ou se beneficiarem dos efeitos das chamas decorrentes dos incêndios florestais[30]. Parte superior do formulário No entanto, é importante salientar que as adaptações foram desenvolvidas para cenários de regime natural do fogo, diferentemente da realidade atual em que os incêndios estão cada vez mais frequentes e intensos devido às atividades antrópicas, podendo, nessas circunstâncias, comprometer a resiliência e a biodiversidade do bioma[31].

A seguir são apresentadas características adaptativas que podem estar presentes em espécies de ambientes dependentes e influenciados pelo fogo:

- Sistema radicular:** nesses ambientes, as raízes tendem a ser mais espessas e alongadas.

Essas adaptações são destinadas ao acúmulo de reservas e captação de água, que auxiliam na rebrota pós fogo[32]. No Cerrado, a biomassa subterrânea pode representar até 70% de toda biomassa vegetal existente[33]. Várias espécies de ambientes dependentes do fogo possuem sistemas subterrâneos com amplo tecido de armazenamento de carboidratos, possibilitando novas brotações após a passagem do fogo. Sistemas subterrâneos bem desenvolvidos podem ser observados em diversas espécies, como *Andira humilis* Mart. ex Benth. (Fabaceae) e espécies do gênero *Homalolepis*;

- Casca:** o regime de fogo explica boa parte da variabilidade da espessura da casca em escala global. Cascas mais espessas funcionam como isolante térmico (súber) para proteger os tecidos vivos das plantas. O grau de isolamento térmico pela casca é proporcional à sua espessura e age protegendo o xilema, floema e tecidos meristemáticos[34]. Embora a maioria das árvores do Cerrado possuam casca grossa, os pequenos indivíduos são suscetíveis às altas temperaturas por não possuírem um isolamento ainda tão eficaz. [35] determinou uma espessura mínima de casca de 6 a 8 mm para proteção efetiva do tecido cambial. Brotos apicais também podem ser protegidos por catafilos densos e pilosos;

- **Redistribuição hormonal:** a rápida redistribuição hormonal é uma adaptação de plantas existentes em ambientes dependentes. Alterações metabólicas nos teores de fitohormônios como auxinas são observadas

após a passagem do fogo e favorecem o desenvolvimento de gemas laterais dormentes, sendo uma das explicações para a arquitetura tortuosa existente em árvores de savanas (30) (Fig. 2).

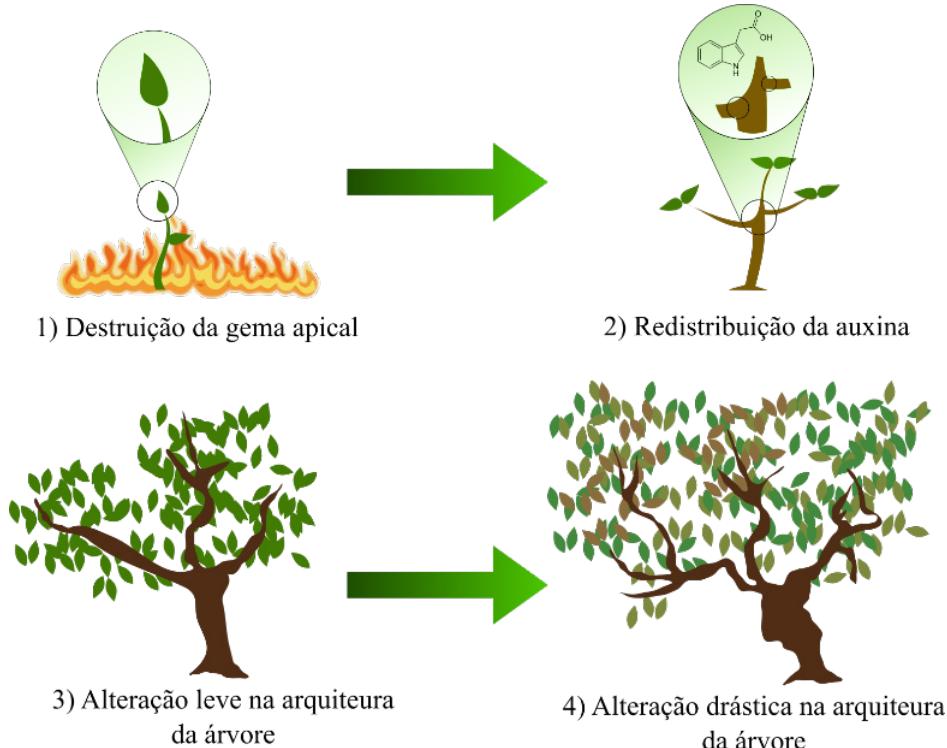


Figura 2 – Influência dos incêndios florestais sobre a arquitetura das árvores do cerrado.
Fonte: (30).

- **Folhas:** há espécies de ecossistemas dependentes/influenciados pelo fogo que apresentam espessa camada de cutícula foliar, assim como acomodação dos estômatos na parte abaxial das folhas e um revestimento epidérmico composto por tricomas. Todas essas adaptações visam reduzir a perda de água evitando estresse hídrico e que as folhas se tornem mais inflamáveis. Além disso, algumas espécies possuem folhas dispostas em rosetas compactas, que formam um reservatório que pode reter água conhecido como fitotelmos, como a *Aechmea phanerophlebia*[36].
- **Sementes:** muitas espécies desenvolveram dormência física para sobreviver às condições adversas do meio e acabam por se beneficiar

da passagem do fogo. No entanto, a superação de dormência física por meio do fogo é uma característica bem relatada para espécies de ambientes dependentes do mediterrâneo, sendo ainda pouco compreendida para espécies do Cerrado[37]. Basicamente quando o calor dos incêndios incide sobre as sementes, fissuras no tegumento podem ser criadas permitindo a penetração de água e consequente estímulo germinativo (Fig. 3). Paralelamente, muitos estudos têm relatado o estímulo da germinação e do crescimento de plântulas por meio da fumaça de combustão e seus compostos químicos. A fumaça proveniente dos incêndios pode liberar gases como etileno e amônia que favorecem a permeabilidade do tegumento.

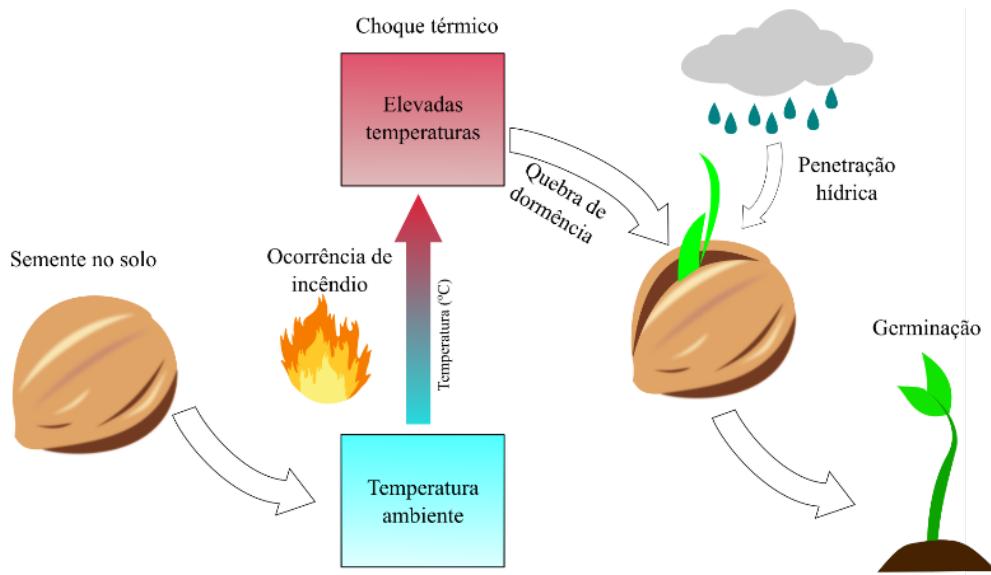


Figura 3 – Influência dos incêndios na superação de dormência vegetativa.

Fonte: (30).

- Flores:** muitas plantas parecem apresentar relação com fogo para a reprodução sexuada, e uma floração intensa pode ser observada alguns dias ou semanas após incêndios para muitas espécies do estrato herbáceo em ambientes dependentes do fogo[38]. A passagem das chamas estimula a floração e proporciona um sincronismo entre populações favorecendo a polinização cruzada[39], analisando a resposta da floração de 402 espécies do Cerrado em cenário pós-fogo, encontraram que 267 das espécies são estimuladas pelo fogo, 73 são dependentes do fogo, enquanto apenas 11 de todas as espécies são sensíveis ao fogo. A rápida resposta após a passagem do fogo é possível devido às reservas de amidos e frutoses, que permitem que os indivíduos aloquem esses recursos para reprodução.

Muitas dessas características também são vantajosas para sobreviver à seca, geada ou herbivoria[40] e, apesar de diversas espécies de ecossistemas dependentes apresentarem adaptações e relações benéficas com a passagem do fogo, é importante ressaltar que não são todas que possuem esses mecanismos. Dessa forma, as espécies que não apresentam mecanismos adaptativos são influenciadas negativamente pelos incêndios, podendo perder componentes vegetativos importantes para o seu desenvolvimento e, até mesmo, atingir a mortalidade. Além disso, ao ganhar tais adaptações,

as espécies vegetais desses ambientes podem ter perdido características para lidar com outros cenários, como a tolerância à sombra e o crescimento rápido para competir por luz[40].

Outro ponto a ser observado em ecossistemas dependentes é que a exclusão do fogo pode resultar em altas taxas de acúmulo de material combustível e, consequentemente, no fortalecimento da severidade do fogo[41]. No Brasil, a “política de fogo zero” do Cerrado resultou em frequentes (intervalo de retorno do fogo de 2 a 5 anos) e grandes incêndios florestais (geralmente > 50.000 ha)[42]. Nesse bioma, a distribuição esparsa das árvores e arbustos faz com que mais espécies herbáceas se desenvolvam nos espaços não sombreados e formem um estrato combustível altamente inflamável e favorável à ocorrência de incêndios florestais (Fig. 4). A completa supressão de incêndios é economicamente e ambientalmente insustentável[20].

Com a supressão do fogo, os ambientes dependentes tendem, com o passar dos anos, a ter a distribuição de nichos afetadas. Um estudo conduzido no Cerrado por[43] demonstra que a exclusão do fogo por 30 anos resultou em um processo de arborização. O aumento da biomassa de árvores ao longo do gradiente de vegetação foi acompanhado por diminuições na riqueza de espécies de plantas (27%) e formigas (35%), principalmente espécies especialistas em savanas.

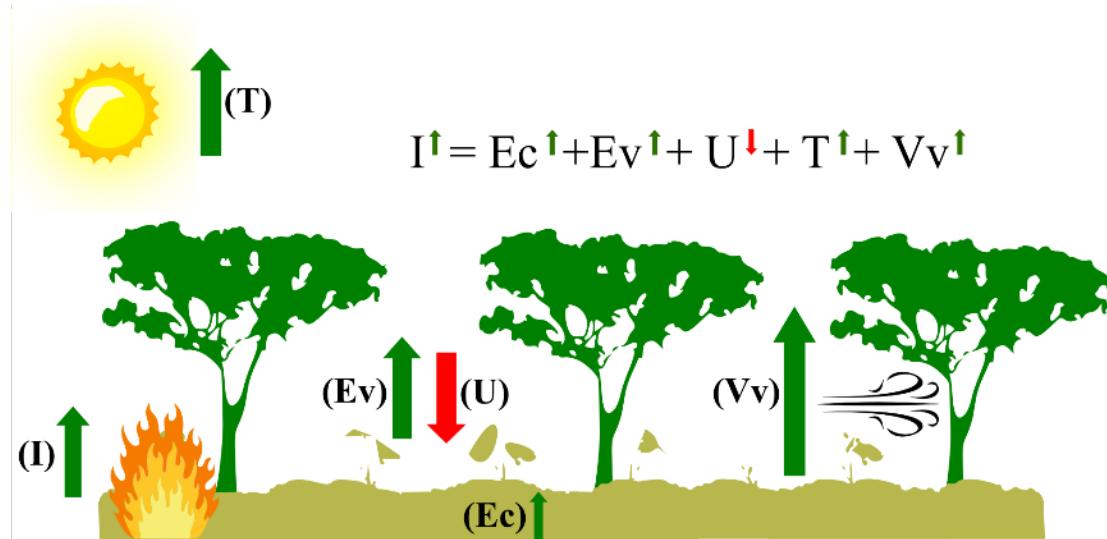


Figura 4 – Influência da distribuição espacial das árvores do Cerrado na ocorrência de incêndios de superfície. Onde: I = Ocorrência de incêndios; Ec = Estrato combustível; Ev = Evaporação; U = Umidade; T = Temperatura; Vv = Velocidade do vento.

Fonte: (30)

Tentando erradicar o viés de fogo “mau” e possibilitar o uso do fogo para garantia dos processos ecológicos dos ambientes dependentes, o manejo integrado do fogo (MIF) entra em cena. O programa foi implementado com objetivo de diminuir o número e o tamanho dos incêndios florestais no final da estação seca que afetam a vegetação sensível e que exigem altos custos de combate a incêndios. Os programas de MIF consideram o uso do fogo pelas comunidades locais e promovem queimas controladas no início da estação seca, com objetivos tanto produtivos quanto conservacionistas, em áreas onde a vegetação é resistente ao fogo. Isso cria uma variedade de áreas com diferentes históricos de queimadas e protege tipos de vegetação sensíveis ao fogo[44].

As queimas prescritas implementadas pelo MIF têm demonstrado redução efetiva da ocorrência de megaincêndios, colaborando com a redução de grandes cicatrizes, intensidade e emissões de gases do efeito estufa (GEE)[45]. Hoje, quase 200 unidades de conservação (UCs) elaboraram plano de manejo integrado do fogo (PMIF). Os principais objetivos do programa foram expressos no projeto de lei PL 11276/2018.

Incêndios florestais em ecossistemas brasileiros sensíveis ao fogo

A relação entre fogo e florestas tropicais como Amazônia e Floresta Atlântica parecia não existir até

o século passado, no entanto, a ilusória ideia de que essas florestas, por suas características ambientais, não apresentariam alterações no regime de fogo, vem sendo refutada com a recorrência de incêndios florestais de grande impacto[46]. Por muitos anos as florestas densas cumpriram a importante função de “interrupção do fogo”, no entanto, esse bloqueio tem se diminuído com as expansões das atividades humanas.

O desmatamento cria uma porta de entrada, uma vez que a fragmentação, juntamente com o efeito de borda, torna o microclima mais seco e mais propenso a ignição. Mas, apesar das mudanças na concepção acerca das ocorrências de incêndios em florestas tropicais, é importante reforçar que a inflamabilidade (característica do material combustível que define sua capacidade de entrar em combustão) e a combustibilidade (característica do material combustível que define sua capacidade de permanecer em combustão) desses ecossistemas são inegavelmente menores que os ambientes savânicos [28][47].

Pelo fato de as espécies desses ecossistemas não apresentarem histórico evolutivo de adaptações que favoreçam a resistência (capacidade dos indivíduos do ecossistema de se manterem inalterados diante de perturbação) e resiliência (disposição dos indivíduos de se recuperarem dos danos causados por uma perturbação)[48], após a ocorrência de incêndios, ainda que de baixa intensidade, alterações no regime

de fogo podem se tornar empecilhos consideráveis na sobrevivência e manutenção da biodiversidade[25] [49].

Dentre as adversidades do fogo em ambientes sensíveis, destaca-se a eliminação da camada de serapilheira que protege o solo contra erosão e promove a ciclagem de nutrientes[25], a eliminação de bancos de sementes e de mudas presentes na área, danos às raízes das árvores[50], abertura de dossel[51][52] alteração no *habitat* de espécies da fauna[25] e até morte em massa de espécies endêmicas do ecossistema[53].

As mudanças climáticas, o crescimento populacional e a consequente evolução dos padrões socioeconômicos têm sido responsáveis pelas alterações no regime de fogo em regiões muito úmidas, onde a presença de incêndios era rara, como

na Floresta Atlântica e na Floresta Amazônica[46]. Na Floresta Atlântica a ocorrência de incêndios florestais é um dos maiores desafios para o sucesso do manejo da regeneração natural[54]. Diante desse cenário, a presença de áreas protegidas tem sido uma ferramenta importante para conter e reduzir a ocorrência de incêndios, principalmente na Amazônia.

Uma das principais causas de incêndios nas florestas tropicais é a expansão agrícola baseada no desmatamento[49]. Como pode ser visto na Tabela 1, esse fato decorre tanto de efeitos diretos, como a queima de limpeza para abertura de novas frentes[55–57], quanto indiretos, como abertura dos dosséis, que aliados à baixa precipitação, afetam drasticamente o microclima, aumentando a temperatura do ar e do solo e diminuindo a umidade do ar e do material combustível[46].

Tabela 1 – Provável causa dos incêndios florestais brasileiros categorizados de acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), no período de 2014-2019

Grupo	Causa	N	(%)
Raios	Raio	17	0,41
Subtotal		17	0,41
Incendiários	Vandalismo	1.052	25,43
Subtotal		1.052	25,43
Queimas para limpeza	Renovação de pastagem natural	301	7,28
	Limpeza de área para cultivo	539	13,03
	Renovação de pastagem plantada	295	7,13
	Queima de lixo	165	3,99
	Reignição	86	2,08
	Fagulha transportada pelo vento	134	3,24
	Confecção de aceiros	81	1,96
	Queima de restos exploratórios	46	1,11
	Limpeza de área para mineração	11	0,27
	Queima de cana	3	0,07
Subtotal		1.661	40,16
Fogos de recreação	Caça	124	3,00
	Extração de mel	24	0,58
	Fogueira de acampamento	12	0,29
Subtotal		160	3,87
Operações florestais	Fagulha de máquina	13	0,31
	Extração de madeira	14	0,34
Subtotal		27	0,65



	Cabo de alta tensão	20	0,48
Diversos	Ritual religioso	8	0,19
	Queda de balão	3	0,07
	Fogos de artifício	7	0,17
	Pessoa com deficiência	6	0,15
	Llicitação de órgão ambiental	4	0,10
Subtotal		48	1,16
Desconhecidos	Indeterminado	921	22,26
	NI	251	6,07
Total		4.137	100

N = total de ocorrências; NI = não informados. Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados disponibilizados pelo Sisfogo[58].

A combinação desses fatores cria condições favoráveis à ocorrência de incêndios severos no sub-bosque das florestas, provocando a morte de diversos indivíduos e a alteração no regime do fogo nesses ambientes[46].

No entanto, esse cenário não está associado apenas à antropização de forma direta. De acordo com [49], as adaptações aos períodos de estresse severo da seca desenvolvidos pelas espécies vegetais da Amazônia também podem resultar na alteração dos regimes de fogo. Os autores explicam que, para evitar a falha de seus sistemas hidráulicos nesses períodos, as plantas utilizam um mecanismo de derrubada de folhas e galhos para permitir melhor regulação do seu equilíbrio hídrico. Porém, apesar de ser uma estratégia funcional, essa técnica também permite a penetração de mais radiação solar a consequente criação de condições de microclima propício aos incêndios florestais [49][59].

Comportamento do fogo

As alterações nos regimes de fogo impactam toda a dinâmica do ecossistema, desde alterações nas propriedades do solo até morte de espécies típicas daquela região. Esses cenários (diminuição ou aumento na frequência de incêndios florestais) também influenciam nos parâmetros de comportamento do fogo[60]. Comportamento do fogo é o termo utilizado para descrever as características do fogo, a origem das chamas e a maneira como se desenvolvem e propagam em diferentes cenários[2][61].

O comportamento varia de acordo com a estação do ano[45] sendo fortemente influenciado pelas condições meteorológicas e carga de material

combustível. O conhecimento da maneira pela qual os incêndios liberam energia é importante para compreender os impactos ecológicos do fogo e no apoio na tomada de decisões quanto ao manejo e eventual combate[8][62]. Além disso, serve para descrever condições adequadas para realização de queimas prescritas.

Parâmetros de análise do comportamento do fogo

Durante uma análise de comportamento do fogo, alguns parâmetros devem ser levados em consideração, tais como:

- **Poder calorífico do material combustível:** também conhecido como calor de combustão, diz respeito à energia necessária para manter o fogo aceso. Os materiais combustíveis florestais têm um poder calorífico relativamente semelhantes, não se alterando de maneira brusca[2][63]. No entanto, por exemplo, é possível afirmar que o calor de combustão dos materiais derivados de plantios de coníferas é maior que o dos materiais de folhosas, em razão do maior teor de resina e lignina presentes neles[2][63]. O poder calorífico tem uma relação inversamente proporcional à umidade do material combustível, ou seja, quanto menor a umidade, maior o poder calorífico[64].
- **Velocidade de propagação:** esse é o termo utilizado para caracterizar a taxa de propagação linear[65]. Esse parâmetro é considerado como um dos mais importantes em relação ao comportamento do fogo[63]. Para definir a velocidade de propagação do fogo, o usuário



pode cronometrar o tempo que o fogo necessita para percorrer uma determinada distância linear[63]. Após essa coleta, procede-se com a aplicação da Equação 1, e os resultados são dados em metros por segundo.

$$v = \frac{C}{T_q} \quad (1)$$

Onde o v é a velocidade de propagação do fogo ($m.s^{-1}$), o C é o comprimento da área útil da parcela (metros) e o T_q é o tempo de queima do comprimento da área útil (segundos).

Duas variáveis que, de acordo com (66), têm forte influência sobre a velocidade de propagação dos incêndios florestais são a declividade e os tipos de material combustível.

- **Intensidade de queima:** a tradução clássica desse termo, elaborada por [67], diz que se

trata da taxa de energia liberada por unidades de tempo e comprimento da frente de fogo. A Intensidade de queima foi determinada por [67] por meio da Equação 2.

$$I = H \times W \times v \quad (2)$$

Onde I é a intensidade de queima ($kcal.m^{-1}.s^{-1}$), o H é o poder calorífico do material combustível dominante, o W é a carga de combustível florestal disponível ($kg.m^{-2}$) e a velocidade de propagação ($m.s^{-1}$).

A variável de intensidade de queima, utilizada na caracterização do comportamento do fogo, possui relação direta com a velocidade de propagação do fogo, ou seja, quanto mais rápido o avanço do fogo, maior a intensidade de queima[68]. Outras variáveis obtidas pós-fogo possibilitam estabelecer associações entre a passagem das chamas e o efeito produzido na comunidade florestal (Quadro 2).

Quadro 2 – Glossário de variáveis do comportamento do fogo

Altura de crestamento: a altura de crestamento diz respeito à altura média de secagem letal da folhagem das árvores durante um incêndio florestal[69]. Esse fenômeno ocorre pois, durante combustão, os gases e vapores liberados entram em ascensão e provocam a morte da vegetação acima da área de ocorrência do fogo. É importante para estimar os danos causados por um incêndio à floresta e deve ser inserida na análise da capacidade de sobrevivência das árvores a esse processo. Em geral, considera-se 60°C como sendo a temperatura letal da folhagem das árvores[2].

Altura de carbonização: refere-se à marca deixada pelas chamas no tronco das árvores; sendo assim, uma variável muito mais fácil de ser mensurada do que a altura da chama utilizada para estimar a intensidade de queima. Essa variável é importante pelo fato de ser uma resposta direta da ação do fogo sobre o tronco e permite fazer correlação com outras variáveis[2].

Tempo de residência: esse é o termo referente ao período em que a frente do fogo permanece no mesmo ponto[2]. É influenciada pela velocidade de propagação do fogo, quantidade de material combustível e intensidade de queima[70]. É importante para a compreensão do comportamento do fogo pois os danos causados pelas chamas são decorrentes tanto da temperatura a qual as plantas são submetidas quanto do tempo em que estas ficam expostas a elas.

O conhecimento dos fatores que influenciam na ignição e propagação dos incêndios florestais é extremamente importante para a delimitação dos planos de minimização de danos[65]. Eles podem ser divididas em biológicas (tipo de material combustível), topográficas (altitude, declividade e orientação do relevo), socioeconômicas (proximidade de estradas e de assentamentos) e meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos)[7][71–78].

Cada tipologia florestal, ou a combinação entre elas, produz material combustível oriundo de qualquer material orgânico, vivo ou morto, derivado de ambientes cobertos por vegetação, capaz de entrar em ignição[65], variando tipo, quantidade, tamanho, umidade, posição e arranjo[79]. Assim, o tipo de cobertura florestal influencia diretamente no comportamento do fogo, sendo classificado como uma variável indispensável para o entendimento dos padrões e possibilidades de ocorrência e propagação dos incêndios florestais[65].



As variáveis topográficas também exercem influência sobre o comportamento dos incêndios florestais devido à sua capacidade de alterar o microclima e, por vezes, a composição vegetal[79]. De acordo com [57], a propagação dos incêndios é mais rápida em aclives e mais lenta em declives. Isso ocorre porque a condição do terreno faz com que as chamas entrem em contato com o material combustível que se encontra à frente da linha de fogo, elevando a velocidade de propagação[65].

A altitude também é uma variável que influencia, sobremaneira, o comportamento do fogo durante um incêndio florestal, haja vista que quanto maior é a altitude, menor é a disponibilidade de oxigênio no ar e, consequentemente, menor a pressão atmosférica e a temperatura e velocidade do vento[65]. [79] afirma que em altitudes elevadas o ar se apresenta mais rarefeito e as temperaturas mais baixas, tornando essas regiões menos suscetíveis à ocorrência e propagação de incêndios florestais. [80] explicam que as variações nas quantidades de radiação solar, velocidade e quantidade de ventos que ocorrem em diferentes faces de exposição do terreno fazem com que a orientação do relevo se torne uma variável importante sobre o comportamento dos incêndios florestais.

As principais causas dos incêndios florestais no mundo são as atividades antrópicas nas mais variadas formas[4][5]. A proximidade das áreas naturais com áreas antropizadas (malha viária, centros urbanos, propriedades rurais e áreas industriais) resulta em uma maior propensão à ocorrência de incêndios, devido à interferência contínua de atividades humanas[7][8][81].

As variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos) estão relacionados à taxa de propensão ao fogo[79], devido à sua influência sobre a umidade e secagem dos tipos de materiais combustível[7]. Temperaturas elevadas e ventos muito frequentes aumentam a evapotranspiração e a velocidade de secagem da vegetação, tornando os ambientes mais suscetíveis à ocorrência de incêndios florestais[82] [83]. A precipitação e a umidade relativa do ar, assim como a temperatura, têm influência sobre a umidade do material combustível, apresentando, então, uma relação inversamente proporcional à probabilidade de ocorrência de incêndios[7][57].

Incêndios florestais, queimas prescritas e as emissões de carbono

Devido ao avanço nos estudos relacionados aos efeitos dos incêndios florestais no meio ambiente, estabeleceu-se uma máxima de que o fogo em vegetação proporciona elevação das concentrações dos principais gases do efeito estufa na atmosfera, em especial o carbono[84]. Essa afirmação é, naturalmente, verdadeira, pois, após um incêndio, o carbono que havia sido absorvido pelas plantas é novamente liberado para a atmosfera[85].

A quantidade e a taxa de liberação de carbono de um incêndio dependem dos estoques de carbono pré-fogo, da frequência dos incêndios e do tamanho, gravidade e extensão das ocorrências[86]. É plausível dizer que a redução da quantidade de biomassa florestal, ou material combustível, em uma determinada área, reduz, sobremaneira, a frequência e intensidade de incêndios florestais, haja vista que existe uma relação inversa nesses cenários. No entanto, paradoxalmente, a eliminação total dos incêndios florestais favorece o acúmulo de material combustível e eleva a propensão à ocorrência de incêndios de grandes proporções, intensidade e, consequentemente, poder destrutivo. Dependendo do regime de fogo, o carbono pode se acumular por décadas ou séculos em um local, mas será eventualmente perdido, pelo menos parcialmente, quando ocorrer um incêndio[86].

Os incêndios são importantes modeladores da paisagem e uma ferramenta significativa na conversão de terras. Somente no ano de 2020 (Tabela 2), o setor de mudanças no uso da terra e florestas foi responsável pela maior emissão de GEE do país, com 998 milhões de toneladas de CO₂ que equivalem a 46% do valor nacional[87]. Estima-se que queimas não associadas ao desmatamento totalizaram 3,16 GtCO₂ de emissões imediatas entre 1990 e 2020. A maior contribuição foi oriunda do Cerrado com estimativa de 64,2% seguido pela Amazônia com 26,1% das emissões[87]. Comparado ao ano de 2019 e o ano de 2020, foi observado aumento de 23,7% das emissões associadas à mudança de uso da terra e floresta.

Estudando a relação entre incêndios e emissão de gases, [88] verificaram correlação linear positiva entre o aumento nos focos de incêndio e as emissões de carbono em todos os biomas brasileiros. Vários estudos alertam sobre os impactos que essas emissões têm para as alterações climáticas e como tornam o Brasil mais distante de atingir as metas dos acordos climáticos[88].



Tabela 2 – Emissões de GEE entre os setores brasileiros de 2019 e 2020 (tCO₂e – GWP-AR5)

Setores	2019	%	2020	%	Variação 2019-2020 (%)
Agropecuária	562.987.702	29	577.022.998	27	2,5
Energia	412.466.747	21	393.705.260	18	-4,5
Processos industriais	99.472.616	5	99.964.389	5	0,5
Resíduos	90.399.714	5	92.047.812	4	1,8
Mudança de uso da terra e floresta	806.996.124	41	997.923.296	46	23,7
Total de emissões brutas	1.972.322.903		2.160.663.755		9,5
Total de emissões líquidas	1.336.61.09		1.524.954.161		14,1

Fonte: [87].

A mudança climática já está causando incêndios florestais sem precedentes e, embora para algumas regiões a frequência de ocorrências esteja na faixa esperada, as modelagens preditivas relatam agravamento de eventos. Como falado anteriormente, o risco de ocorrência de incêndio florestal depende de um conjunto de fatores, incluindo temperatura, umidade e presença do material combustível. Todos esses fatores têm forte ligação com a sazonalidade e as mudanças climáticas.

As atividades associadas ao MIF entram como importante aliado para reduzir as emissões de GEE. Uma das ações conduzidas no MIF é a queima prescrita, que corresponde a uma queima precoce (início do período seco), que, quando planejada adequadamente (horário e condições meteorológicas), tende a ser de baixa intensidade, consumindo menor quantidade de material combustível e reduzindo, assim, as chances de incêndios catastróficos atingirem ambientes sensíveis e emitirem grandes concentrações de carbono na atmosfera[89].

A implantação do MIF pelo mundo tem apresentado bons resultados na redução da emissão de carbono. Na Austrália o programa foi implementado em 2006 e já reduziu mais de 10 milhões de toneladas de GEE. Aqui no Brasil, o programa piloto implementado em 2014 mitigou até 39% das emissões de GEE. Com a aprovação da política nacional do manejo do fogo, o Brasil tenderá a reduzir grandes incêndios e minimizar ainda mais as emissões, gerando emprego, renda, áreas produtivas e oportunidade para investimentos externos[90].

Considerações finais

Mediante as informações compiladas no presente artigo, foi possível compreender conceitos e entender as diferenças existentes entre a relação do fogo e os ecossistemas brasileiros. Observou-se que, no Brasil, as ecorregiões são diferenciadas em função das manchas de sensibilidade dentro de suas fitofisionomias, apresentando diferentes respostas à passagem do fogo. Isso mostra que o MIF, ainda que no mesmo ecossistema, deve ser planejado levando em consideração as características da composição vegetal presentes na área, as variáveis de influência sobre o comportamento do fogo e a interação entre o fogo e os ecossistemas.

Para compreender as condições e restrições de manejo a ser seguido em quaisquer ambientes, o conhecimento da ecologia do fogo é indispensável, pois é uma ciência que estuda a dinâmica do fogo nos ecossistemas, com o objetivo de determinar as maneiras pelas quais esses eventos afetam os organismos da Terra e como eles se relacionam. Nessa concepção, é importante ressaltar que as alterações climáticas e os regimes incêndios possuem influência cíclica e crescente. Por esse motivo, é relevante que as autoridades brasileiras desenvolvam metodologias de políticas públicas para efeitos a curto e longo prazo de maneira a popularizar a conservação e o uso sustentável desses ecossistemas, mitigando e reduzindo as emissões de GEE.

O desenvolvimento de novas pesquisas precisa ser incentivado para preencher as lacunas existentes



na compreensão dessa temática, principalmente em ambientes dependentes do fogo pouco investigados como o Pampa e Pantanal. Como pode ser observado nos manuscritos citados, há esforços de pesquisadores brasileiros para compreender e planejar o uso sustentável do fogo, e essa abordagem deve ser amplamente divulgada, pois é crucial para apoiar os processos ecológicos e promover o desenvolvimento social.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código de Financiamento 001; à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

1. Gale MG, Cary GJ, Van Dijk AJM, Yebra M. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2021; 255: 112282. doi: 10.1016/j.rse.2020.112282
2. Sant'Anna C de M, Fiedler NC. Características do fogo. In: Fiedler NC, Sant'Anna C de M, Ramalho AHC. Incêndios Florestais. Jerônimo Monteiro, ES: UFES; 2020. p. 47-54.
3. Gomes L, Miranda HS, Bustamante MM da C. How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome? *For Ecol Manage* [Internet]. 2018; 417: 281-90. doi: 10.1016/j.foreco.2018.02.032
4. Barradas ACS, Borges MA, Costa MM, Ribeiro KT. Paradigmas da gestão do fogo em áreas protegidas no mundo e o caso da Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins. *Biodiversidade Brasileira* [Internet]. 2020; 10(2): 71-86. doi: 10.37002/biodiversidadebrasileira.v10i2.1474
5. Fiedler NC, Lacerda GR, Ramalho AHC, Berude LC, das Neves FP, Rodrigues CK. Firefighting combat with fire retardants at different concentrations. *Floresta* [Internet]. 2020; 50(1): 1107-12. doi: 10.5380/rf.v50 i1.61609
6. Sant'Anna C de M, Fiedler NC, Ramalho AHC, Menezes RAS. Características do fogo. Origem e utilização do fogo. In: Fiedler NC, Sant'Anna C de M, Ramalho AHC. Incêndios Florestais. Jerônimo Monteiro, ES: UFES; 2020. p. 9-16.
7. Sari F. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *For Ecol Manage* [Internet]. 2021; 480: 118644. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118644
8. Tebaldi ALC, Fiedler NC, Juvanhol RS, Dias HM. Ações de prevenção e combate aos incêndios florestais nas unidades de conservação estaduais do Espírito Santo. *Floresta e Ambiente* [Internet]. 2013; 20(4): 538-49. doi: 10.4322/floram.2013.036
9. De la Rosa JM, Jiménez-Morillo NT, González-Pérez JA, Almendros G, Vieira D, Knicker HE et al. Mulching-induced preservation of soil organic matter quality in a burnt eucalypt plantation in central Portugal. *J Environ Manage*. 2019 February; 1(231): 1135-44. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.114
10. Barradas ACS, Ribeiro KT. Manejo integrado do fogo: Trajetória da Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins (2001 a 2020). *Biodivers. Bras.* [Internet]. 2021 maio; 6(2): 139-52. doi: 10.37002/biobrasil.v11i2.1739
11. He T, Lamont BB. Baptism by fire: The pivotal role of ancient conflagrations in evolution of the Earth's flora. *Natl Sci Rev*. 2018; 5(2): 237-54. doi: 10.1093/nsr/nwx041
12. McLaughlan KK, Higuera PE, Miesel J, Rogers BM, Schweitzer J, Shuman JK et al. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*. 2020; 108(5): 2047-69. doi: 10.1111/1365-2745.13403
13. Pausas JG, Bond WJ. Alternative biome states in terrestrial ecosystems. *Trends Plant Sci* [Internet]. 2019; 25(3): 250-63. doi: 10.1016/j.tplants.2019.11.003
14. Archibald S, Lehmann CER, Belcher CM, Bond WJ, Bradstock RA, Daniau AL et al. Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth system. *Environmental Research Letters* [Internet]. 2018; 13: 033003. doi: 10.1088/1748-9326/aa9ead
15. Pausas JG, Keeley JE, Schwilk DW. Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology* [Internet]. 2017; 105(2): 289-97. doi: 10.1111/1365-2745.12691
16. He T, Lamont BB, Pausas JG. Fire as a key driver of Earth's biodiversity. *Biological Reviews* [Internet]. 2019; 94(6): 1983-2010. doi: 10.1111/brv.12544
17. Castillo M, Plaza Á, Garfias R. A recent review of fire behavior and fire effects on native vegetation in Central Chile. *Glob Ecol Conserv* [Internet]. 2020 December; 1(24): e01210. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01210
18. Krebs P, Pezzatti GB, Mazzoleni S, Talbot LM, Conedera M. Fire regime: History and definition of a key concept in disturbance ecology. *Theory in Biosciences* [Internet]. 2010; 129(1): 53-69. doi: 10.1007/s12064-010-0082-z



19. Feurdean A, Tonkov S, Pfeiffer M, Panait A, Warren D, Vannière B et al. Fire frequency and intensity associated with functional traits of dominant forest type in the Balkans during the Holocene. *Eur J For Res* [Internet]. 2019; 138(6): 1049-66. doi: 10.1007/s10342-019-01223-0
20. Myers RL. Convivendo com o fogo – Manutenção dos ecossistemas & subsistência com o manejo integrado do fogo [Internet]. Tallahassee, FL: The Nature Conservancy; 2006. Disponível em: https://www.conservationgateway.org/Documents/convivendo_com_o_fogo.pdf
21. Rodrigues M, Jiménez-Ruano A, de la Riva J. Fire regime dynamics in mainland Spain. Part 1: Drivers of change. *Science of the Total Environment* [Internet]. 2020; 721: 135841. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135841
22. Sommers WT, Colof SG, Conard SG, editores. Synthesis of knowledge: Fire history and climate change [Internet]. Boise, ID, USA, 2011. Disponível em: digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1018&context=jfssynthesis
23. Alves DB, Alvarado ST. Variação espaço-temporal da ocorrência do fogo nos biomas brasileiros com base na análise de produtos de sensoriamento remoto. *Geografia* [Internet]. 2019; 44(2): 321-45. doi: 10.5016/geografia.v44i2.15119
24. Hardesty J, Myers R, Fulks W. Fire, ecosystems and people: A preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *Fire Management* [Internet]. 2005; 22(4): 78-87. Available from: <http://www.georgewright.org/224hardesty.pdf>
25. Pivello VR, Vieira I, Christianini AV, Ribeiro DB, da Silva Menezes L, Berlinck CN et al. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Perspect Ecol Conserv* [Internet]. 2021; 19(3): 233-55. doi: 10.1016/j.pecon.2021.06.005
26. Adeney JM, Christensen NL, Vicentini A, Cohn-Haft M. White-sand ecosystems in amazonia. *Biotropica* [Internet]. 2016; 48(1): 7-23. Available from: <https://www.jstor.org/stable/48574854>
27. Flores BM, Holmgren M. White-Sand savannas expand at the core of the amazon after forest wildfires. *Ecosystems* [Internet]. 2021; 2021: 1-14. doi: 10.1007/s10021-021-00607-x
28. Cintra L da S, Oliveira GIS de, Silva F de CS da, Souza IV, Giango M, Batista AC. Inflamabilidade de espécies florestais do Cerrado *Sensu Stricto* e seu potencial para implantação de cortina de segurança. *Journal of Biotechnology and Biodiversity* [Internet]. 2020; 8(4): 290-6. doi: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v8n4.cintra
29. Simon MF, Pennington T. Evidence for adaptation to fire regimes in the tropical savannas of the Brazilian Cerrado. *Int J Plant Sci* [Internet]. 2012; 173(6): 711-23. doi: 10.1086/665973
30. Ramalho AHC, Menezes RAS. Comportamento das espécies vegetais com os incêndios florestais. In: Fiedler NC, Sant'Anna C de M, Ramalho AHC. Incêndios Florestais. Jerônimo Monteiro, ES: UFES; 2020. p. 75-84.
31. Americo N, Epifanio MLFG, Sousa HG de A, Souza PB de, Silva F de CS da, Batista AC et al. Avaliação da inflamabilidade de espécies vegetais do Cerrado. *Journal of Biotechnology and Biodiversity* [Internet]. 2021; 9(2): 187-91. doi: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v9n2.americo
32. Pausas JG, Lamont BB, Paula S, Appezato-da-Glória B, Fidelis A. Unearthing belowground bud banks in fire-prone ecosystems. *New Phytologist* [Internet]. 2018; 217(4): 1435-48. doi: 10.1111/nph.14982
33. Kauffman J, Cummings D, Ward D. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. *J Ecol* [Internet]. 1994; 82(3): 519. doi: 10.2307/2261261
34. Pausas JG. Evolutionary fire ecology: Lessons learned from pines. *Trends Plant Sci* [Internet]. 2015; 20(5): 318-24. doi: 10.1016/j.tplants.2015.03.001
35. Miranda HS. Temperatura do câmbio de espécies lenhosas do Cerrado durante queimadas prescritas. In: Miranda HS. Efeitos do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de cerrado: Resultados do Projeto Fogo. Resultados do Projeto. Brasília/DF: IBAMA/MMA; 2010. p. 1-145.
36. Oliveira GF, Garcia ACL, Montes MA, Jucá JCLDA, Valente VLDS, Rohde C. Are conservation units in the Caatinga biome, Brazil, efficient in the protection of biodiversity? An analysis based on the drosophilid fauna. *J Nat Conserv* [Internet]. 2016; 34: 145-50. doi: 10.1016/j.jnc.2016.10.006
37. Zirondi HL, Silveira FAO, Fidelis A. Fire effects on seed germination: Heat shock and smoke on permeable vs impermeable seed coats. *Flora* [Internet]. 2019; 253: 98-106. doi: 10.1016/j.flora.2019.03.007
38. Miranda HS, Bustamante MMC, Miranda AC. The fire factor. In: Oliveira PS, Marquis RJ. The Cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna. Columbia University Press; 2002. p. 51-68.
39. Fidelis A, Zirondi HL. And after fire, the Cerrado flowers: A review of post-fire flowering in a tropical savanna. *Flora* [Internet]. 2021; 280: 151849. doi: 10.1016/j.flora.2021.151849
40. Durigan G. Zero-fire: Not possible nor desirable in the Cerrado of Brazil. *Flora* [Internet]. 2020; 268: 151612. doi: 10.1016/j.flora.2020.151612
41. Halofsky JE, Peterson DL, Harvey BJ. Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Fire Ecology* [Internet]. 2020; 16(4): 1-26. doi: 10.1186/s42408-019-0062-8



42. Santos AM dos, Silva CFA da, Almeida Junior PM de, Rudke AP, Melo SN de. Deforestation drivers in the Brazilian Amazon: Assessing new spatial predictors. *J Environ Manage* [Internet]. 2021; 15(294): 113020. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113020
43. Abreu RCR, Hoffmann WA, Vasconcelos HL, Pilon NA, Rossatto DR, Durigan G. The biodiversity cost of carbon sequestration in tropical savanna. *Forest Ecosystems* [Internet]. 2017; 30; 3(8): e1701284. doi: 10.1126/sciadv.1701284
44. Schmidt IB, Eloy L. Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. *Flora* [Internet]. 2020; 268: 151613. doi: 10.1016/j.flora.2020.151613
45. Santos AC dos, Montenegro S da R, Ferreira MC, Barradas ACS, Schmidt IB. Managing fires in a changing world: Fuel and weather determine fire behavior and safety in the neotropical savannas. *J Environ Manage* [Internet]. 2021; 1(289): 112508. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112508
46. Liesenfeld MVA, Vieira G, Miranda IP de A. Ecologia do fogo e o impacto na vegetação da Amazônia. *Pesqui. Florest. Bras.* [Internet]. 2017; 36(88): 505. doi: 10.4336/2016.pfb.36.88.1222
47. Pivello VR. The use of fire in the cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. *Fire Ecology* [Internet]. 2011; 7(1): 24-39. doi: 10.4996/fireecology.0701024
48. Torres J, Gonçalves J, Pinto AT, Proença V, Honrado JP. Fogo, resiliência e dinâmica em espaços florestais do Norte de Portugal. In: Tereso JP, Honrado JP, Pinto AT, Rego FC. Florestas do Norte de Portugal: História, Ecologia e Desafios de Gestão. Porto: InBio - Rede de Investigação em Biodiversidade e Biologia Evolutiva; 2011. p. 248-82.
49. Brando P, Macedo M, Silvério D, Rattis L, Paolucci L, Alencar A et al. Amazon wildfires: Scenes from a foreseeable disaster. *Flora* [Internet]. 2020; 268: 151609. doi: 10.1016/j.flora.2020.151609
50. Flores BM, Piedade MTF, Nelson BW. Fire disturbance in Amazonian blackwater floodplain forests. *Plant Ecol Divers* [Internet]. 2014; 7(1-2): 319-327. doi: 10.1080/17550874.2012.716086
51. Almeida DRA de, Nelson BW, Schietti J, Gorgens EB, Resende AF, Stark SC et al. Contrasting fire damage and fire susceptibility between seasonally flooded forest and upland forest in the Central Amazon using portable profiling LiDAR. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2016; 184: 153-160. doi: 10.1016/j.rse.2016.06.017
52. Ziccardi LG, dos Reis M, Graça PML de A, Gonçalves NB, Pontes-Lopes A, Aragão LEOC, et al. Forest fires facilitate growth of herbaceous bamboos in central Amazonia. *Biotropica* [Internet]. 2021; 53(4): 1021-1030. doi: 10.1111/btp.12915
53. Staver AC, Brando PM, Barlow J, Morton DC, Paine CET, Malhi Y et al. Thinner bark increases sensitivity of wetter Amazonian tropical forests to fire. *Ecol Lett* [Internet]. 2020; 23(1): 99-106. doi: 10.1111/ele.13409
54. Santos JM dos, Queiroz DL, Fernandes CC. Produção de dióxido de carbono: Sugestão para aulas experimentais utilizando materiais alternativos. *Scientia Naturalis* [Internet]. 2019; 1(1): 109-17. Available from: <http://revistas.ufac.br/revista/index.php/SciNat/index>
55. Alencar AA, Brando PM, Asner GP, Putz FE. Landscape fragmentation, severe drought and the New Amazon Forest Fire Regime. *Ecological Applications* [Internet]. 25(6): 1493-505. doi: 10.1890/14-1528.1.
56. Barlow J, Berenguer E, Carmenta R, França F. Clarifying Amazonia's burning crisis. *Glob. Chang. Biol.* [Internet]. 2020; 26: 319-21. doi: 10.1111/gcb.14872.
57. Ramalho AHC, Silva EF da, Silva JPM, Fiedler NC, Maffioletti FD, Biazatti LD et al. Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. *J Environ Manage* [Internet]. 2021; 296: 113122. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113122
58. Sisfogo – ROI [homepage na internet]. Registro de Ocorrências de Incêndio verificadas pelas brigadas Prevfogo [acesso em 21 mar 2021]. Disponível em: <http://dadosabertos.ibama.gov.br/dataset/sisfogo-registro-de-ocorrencias-de-incendio-roi>.
59. Ray D, Nepstad D, Brando P. Predicting moisture dynamics of fine understory fuels in a moist tropical rainforest system: Results of a pilot study undertaken to identify proxy variables useful for rating fire danger. *New Phytologist* [Internet]. 2010; 187(3): 720-32. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03358.x
60. Rodrigues CA, Zirondi HL, Fidelis A. Fire frequency affects fire behavior in open savannas of the Cerrado. *For Ecol. Manage* [Internet]. 2021; 482: 118850. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118850
61. Williams RJ, Gill AM, Moore PHR. Fire Behavior. In: Andersen AN, Cook GD, Williams RJ. *Fire in Tropical Savannas - The Kapalga Experiment*. New York: Springer; 2003. p. 33-46.
62. Batista AC, Beutling A, Pereira JF. Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliottii*. *Revista Árvore* [Internet]. 2013; 37(5): 779-87. doi: 10.1590/S0100-67622013000500001
63. de Camargos VL, Ribeiro GA, da Silva AF, Martins SV, Carmo FM da S. Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta estacional semidecídua no município de Viçosa, Minas Gerais. *Ciencia*



- Florestal [Internet]. 2015; 25(3): 537-45. doi: 10.5902/1980509819605
64. Barros SV dos S, Pio N da S, do Nascimento CC, Costa S de S. Avaliação do potencial energético das espécies florestais *Acacia auriculiformis* e *Ormosia paraensis* cultivadas no município de Iranduba/Amazonas, Brasil. *Madera y Bosques* [Internet]. 2009; 15(2): 59-69. Available from: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712009000200004
65. Sant'Anna C de M, Fiedler NC, Ramalho AHC. Métodos de propagação dos incêndios florestais e fatores influentes. In: Fiedler NC, Sant'Anna C de M, Ramalho AHC. Incêndios Florestais. 1st ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020. p. 33-46.
66. Barni PE, Martins AC, Nunes AMD, Santos DO, Reis EP, Crisóstomo ES, Silva FS, Pereira FR, Moreira GG, Santana LB, Oliveira TM, Moreira VB. Inclinação do terreno e tipo de material do fogo em condições experimentais. Ambiente: Gestão e desenvolvimento [Internet]. 2020; 13(2): 44-54. Available from: <https://periodicos.uerr.edu.br/index.php/ambiente/article/view/368>
67. Byram GM. Combustion of forest fuels. In: Davis KP, Byrum G, Krumm WR. Forest Fire: Control and Use. 1st ed. New York: NY: McGraw Hill; 1959. p. 77-84.
68. Fiedler NC, Canzian WP, Mafia RG, Ribeiro GA, Krause Junior J. Intensidade de queima de diferentes retardantes de fogo. *Revista Arvore* [Internet]. 2015; 39(4): 691-6. doi: 10.1590/0100-67622015000400011
69. Torres FTP, Silva Júnior MR da, Lima GS. Influência dos Elementos Meteorológicos Sobre o Comportamento do Fogo. *Revista Brasileira de Meteorologia* [Internet]. 2019; 34(1): 33-41. doi: 10.1590/0102-7786334014
70. McArthur AG, Cheney NP. The Characterization of fires in relation to ecological studies. *Fire Ecology* [Internet]. 2015; 11(1): 3-9. doi: 10.4996/fireecology.1101001
71. Ajin RS, Loghin AM, Jacob MK, Vinod PG, Krishnamurthy RR. The Risk assessment study of potential forest fire in idukki wildlife sanctuary using RS and GIS Techniques. *International Journal of Advanced Earth Science and Engineering* [Internet]. 2016; 5(1): 308-18. doi: 10.23953/cloud.ijaese.201
72. Canzian WP, Fiedler NC, Pezzopane JEM, Oliveira CHR, Silva ECG. Análise de causa e influência de elementos meteorológicos em ocorrências de incêndios em florestas de produção. *Ciência Florestal* [Internet]. 2020; 30(3): 835-44. doi: 10.5902/1980509837802
73. Juvanhol RS, Fiedler NC, dos Santos AR, da Silva GF, Omena MO, Eugenio FC et al. Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. *An Acad Bras Cienc* [Internet]. 2021; 93(suppl 3): 1-18. doi: 10.1590/0001-3765202120190726
74. Eugenio FC, dos Santos AR, Fiedler NC, Ribeiro GA, da Silva AG, dos Santos ÁB et al. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. *J Environ Manage* [Internet]. 2016; 173: 65-71. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.02.021
75. Oliveira VFR, Silva ER dos S da, Silva BHM da, Vick EP, Lima CG da R, Bacani VM. Geoprocessamento aplicado ao mapeamento de risco a incêndios. *Revista Brasileira de Geografia Física* [Internet]. 2020; 13(3): 1194-212. doi: 10.26848/rbgf.v13.3.p1194-1212
76. Ramalho AHC, Neder E de C, Fiedler NC, Moreira TR, Silva JPM. Geotechnology applied to predict the risk of occurrence of fire in the Atlantic Forest. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* [Internet]. 2021; 12(1): 707-720. doi: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0057
77. White LAS, White BLA, Ribeiro GT. Modelagem espacial de risco de incêndio florestal para o município de Inhambupe, Bahia, Brasil. *Pesqui Florest Bras* [Internet]. 2016; 36(85): 41. doi: 10.4336/2016.pfb.36.85.850
78. Zeferino JA, Rosa RJ. Modelo matemático para otimizar a localização de aeronaves para combate a incêndios florestais. *Ciência Florestal* [Internet]. 2019; 29(4): 1516. doi: 10.5902/1980509833185
79. Prudente TD. Risco integrado de incêndio florestal em áreas de Cerrado: contribuições metodológicas [tese]. Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia; 2016. 132 f.
80. Torres FTP, Ribeiro GA, Martins SV, Lima GS. Influência do relevo nos incêndios em vegetação em Juiz de Fora (MG). *GEOgraphia* [Internet]. 2016; 18(36): 170. doi: 10.22409/GEOgraphia2016.v18i36.a13748
81. Suryabagavan K V, Alemu M, Balakrishnan M. Gis-based multi-criteria decision analysis for forest fire susceptibility mapping: A case study in Hareenna forest, southwestern Ethiopia. *Trop Ecol.* 2016; 57(1): 33-43.
82. Amraoui M, Pereira MG, DaCamara CC, Calado TJ. Atmospheric conditions associated with extreme fire activity in the Western Mediterranean region. *Science of the Total Environment* [Internet]. 2015; 524-525: 32-9. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.032
83. Bonora L, Claudio Conese C, Marchi E, Tesi E, Montorselli NB. Wildfire occurrence: Integrated model for risk analysis and operative suppression aspects management. *Am J Plant Sci* [Internet]. 2013; 4: 705-10. doi: 10.4236/ajps.2013.43A089
84. Silva Junior CHL, Anderson LO, Aragão LEO e C de, Rodrigues BD. Dinâmica das queimadas no Cerrado



- do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. Revista do Departamento de Geografia [Internet]. 2018; 35: 1-14. doi: 10.11606/rdg.v35i0.142407
85. Vasconcelos SS de, Fearnside PM, Graça PML de A, Dias DV, Correia FWS. Variability of vegetation fires with rain and deforestation in Brazil's state of Amazonas. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2013; 136: 199-209. doi: 10.1016/j.rse.2013.05.005
86. Loehman RA, Reinhardt E, Riley KL. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Seeing the forest and the trees - A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone, forested ecosystems. *For Ecol Manage* [Internet]. 2014; 317: 9-19. doi: 10.1016/j.foreco.2013.04.014
87. Potenza RF, Quintana G de O, Cardoso AM, Tsai DS, Cremer M dos S, Silva FB et al. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil (1970-2020). In: IEEMA. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. 1st ed. 2021. p. 1-55.

88. da Silva Junior CA, Teodoro PE, Delgado RC, Teodoro LPR, Lima M, de Andréa Pantaleão A, Baio FHR, Azevedo GB, Azevedo GTOS, Capristo-Silva GF, Arvor D, Facco CU. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. *Sci Rep* [Internet]. 2020; 10: 16246. doi: 10.1038/s41598-020-72571-w
89. Schmidt IB, Fonseca CB, Ferreira MC, Sato MN. Implementação do Programa Piloto de Manejo Integrado do Fogo em três unidades de conservação do Cerrado. *Biodivers. Bras.* [Internet]. 2016; 6(2): 55-70. doi: 10.37002/biodiversidadebrasileira.v6i2.656
90. ISPN. Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo [homepage na internet]. Controlar Fogo é possível [acesso em 28 dez 2023]. Disponível em: <https://ispn.org.br/site/wp-content/uploads/2021/12/E-possivel-controlarfogo-vs-site.pdf>

Biodiversidade Brasileira – BioBrasil.
Fluxo Contínuo
n.1, 2024

<http://www.icmbio.gov.br/revistaelectronica/index.php/BioBR>

Biodiversidade Brasileira é uma publicação eletrônica científica do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) que tem como objetivo fomentar a discussão e a disseminação de experiências em conservação e manejo, com foco em unidades de conservação e espécies ameaçadas.

ISSN: 2236-2886



Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Biodiversidade Brasileira, 14(1): 8-25, 2024
<https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v14i1.2180>