



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA**

**COMPORTAMENTO E EFEITO DO FOGO SOBRE OS
ECOSSISTEMAS DO BIOMA CERRADO: MODELOS
BASEADOS EM PROCESSOS**

Letícia Gomes da Silva

Brasília - DF,
Março de 2018



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA**

**COMPORTAMENTO E EFEITO DO FOGO SOBRE OS
ECOSSISTEMAS DO BIOMA CERRADO: MODELOS
BASEADOS EM PROCESSOS**

Letícia Gomes da Silva

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ecologia.

Orientadora:

Prof^ª. Dr^ª. Mercedes M. C. Bustamante

Brasília - DF,
Março de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Dra. Mercedes Bustamante que nunca mediu esforços para me ajudar, sempre atenciosa, justa e dedicada. Um exemplo de professora, de profissional e de mulher a ser seguido. A maior parte do meu crescimento intelectual e profissional eu dedico à ela.

Ao Laboratório de Ecologia do Fogo coordenado pela profa. Dra. Heloisa Miranda e ao Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) coordenado pelo prof. Dr. Britaldo Soares-Filho, pelo apoio nas análises e construção dos modelos da presente tese.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia (UnB), à CAPES, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa, apoio logístico e financeiro para realização da presente tese.

À Eddie Lenza, Leandro Maracahipes, Marco Túlio Furtado, Karina Dias, Leandro Brasil e Bárbara Zimbres que contribuíram com sugestões importantíssimas para a redação da tese. Bem como aqueles que me ajuda na construção dos delineamentos amostrais e nas análises estatísticas da tese como Divino Silvério, Lucas Rodrigues e Luísa Carvalheiro.

Aos integrantes do Laboratório de Ecologia de Ecossistemas (UnB) que me ajudaram na apresentação gráfica da tese, em especial Regina Sartori, Francisco Calaça, Rafaella Silveira, Elisa Alvim, Thiago Mello, Maria Mendes e José Salomão. Juntos somos mais fortes, contem sempre comigo.

Aos meus pais, Teobaldo e Norma, que sempre me apoiaram mesmo nos momentos mais difíceis de nossas vidas, pelos quais não foram e não são poucos. Vocês são a razão do meu viver, a minha inspiração para continuar firme lutando!

À minha segunda família “República Tapera do Lago” de Brasília e a “República Ouro Preto” de Belo Horizonte pelo apoio e pela amizade. Em especial minha querida amiga Denise Nogueira que me aguentou em Belo Horizonte durante o meu “Sanduiche Nacional” por longos três meses.

Enfim, agradeço a todos que me ajudaram diretamente ou indiretamente na elaboração da presente tese. Acreditem! vocês fizeram a diferença na minha carreira. Gratidão!!!

*As árvores são poemas que a
terra escreve para o céu.*

-Kahlil Gibran

*Aos meus pais Teobaldo e
Norma, dedico todas as
minhas conquistas...*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
RESUMO GERAL	1
GENERAL ABSTRACT.....	2
INTRODUÇÃO GERAL	3
ESTRUTURA E OBJETIVOS GERAIS DA TESE.....	7
CAPÍTULO 1 - HOW CAN WE ADVANCE THE KNOWLEDGE ON THE BEHAVIOR AND EFFECTS OF FIRE IN THE CERRADO BIOME?.....	8
Abstract.....	9
Introduction	9
Gaps in the current knowledge of fire	15
Research challenges and priorities	22
Conclusion.....	25
CAPÍTULO 2 - DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DO FOGO E EMISSÕES DE CARBONO NO CERRADO BRASILEIRO	26
Resumo	27
Introdução.....	28
Material e Métodos.....	32
Resultados.....	39
Discussão	52
Conclusão	54
Material Suplementar	56
CAPÍTULO 3 - INTERAÇÕES ENTRE VEGETAÇÃO, MICROCLIMA E FOGO EM SAVANA BRASILEIRA: MODELOS BASEADOS EM PROCESSOS.....	61
Introdução.....	62
Material e Métodos.....	65
Resultados.....	74
Discussão	77
Conclusão	84
Material Suplementar	85
REFERÊNCIAS	99

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Fig. I- 1 Studies describing prescribed burns in the Cerrado (1990–2017) were conducted in (1) Ecological Reserve of the Brazilian Institute of Geography and Statistics, DF; (2) Serra do Tombador Natural Reserve, GO; (3) Serra Geral Ecological Station and Jalapão State Park, TO; (4) Chapada das Mesas National Park, MA; and (5) Chapada Diamantina National Park, BA, which is outside the geographic boundaries of the Cerrado biome but has Cerrado vegetation. 12
- Fig. I- 2 Relationships between the main types of plant formations, relative extent of land cover (%), and fire frequency in the Cerrado biome. Arrows show the direction of change in vegetation structure due to increased fire frequency (1) or total fire exclusion (2). 15
- Fig. I- 3 Advancing current knowledge of fire in the Cerrado biome requires (a) addressing challenges related to paradigm shifts around study scales; (b) Systemic and integrative approach linking fire behavior and its effects; (c) fire drivers (adapted from Moritz et al., (2005)); and (d) effects of fire across multiple temporal and spatial scales. 24

Capítulo 2

- Fig. II- 1 Relações entre as variáveis preditoras e resposta do comportamento do fogo e emissões resultantes no bioma Cerrado. Sinais (+) representam relações positivas e (–) relações negativas entre as caixas. Vegetação (■): Formação = gradiente categórico crescente de cobertura arbórea (campestre, savânica e florestal) e Combustível Fino = quantidade de material combustível fino disponível para a queima (kg/m^2). Microclima (■): Temperatura = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), Umidade = umidade relativa do ar (%), DPV = déficit de pressão de vapor d’água (kPa) e Vento = velocidade do vento (m/s). Comportamento do fogo (■): Velocidade = velocidade de propagação do fogo (m/s), Intensidade = intensidade da frente de fogo ($\text{kJ}/(\text{ms})$) e Calor Liberado = calor liberado por unidade de área (kJ/m^2). Efeito do fogo sobre as emissões (■): Combustível Fino Consumido = quantidade de material combustível fino consumido (kg/m^2), Fator de Combustão = fração de biomassa consumida (%) e Carbono Liberado = quantidade de carbono liberado (kg/m^2). 31
- Fig. II- 2 Mapa da vegetação pretérita do bioma Cerrado (Fonte: Third National Inventory (Brazil, 2016), modificado de PROBIO I (MMA) e TM/Landsat-5 imagens) e localização das queimadas prescritas realizadas no bioma Cerrado entre os anos de 1990-2016. Referência dos números estão descritos na Tab. II- 1. 34
- Fig. II- 3 Velocidade do fogo em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo. 41
- Fig. II- 4 Intensidade do fogo em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$).

- R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo..... 42
- Fig. II- 5 Calor liberado em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo..... 43
- Fig. II- 6 Combustível fino consumido em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo. 44
- Fig. II- 7 Fator de combustão em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Cor r= Correlação de Spearman, NS = não significativo..... 45
- Fig. II- 8 Carbono liberado em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo..... 46
- Fig. II- 9 Importância relativas da vegetação (■), microclima (■) e comportamento do fogo (■) em formações vegetais e para cada tipo formação vegetal do bioma Cerrado. IMP = Importância relativa da variável explicativa. As barras que tocam as linhas (---) representam os parâmetros selecionados para compor o melhor modelo. 51
- Fig. S II- 1 Preditores selecionados para compor o modelo de comportamento do fogo (velocidade do fogo (A), intensidade do fogo (B) e calor liberado (C)), classificados em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado..... 57
- Fig. S II- 2 Preditores selecionados para compor o modelo de emissões (combustível fino consumido (A), fator de combustão (B) e carbono liberado (C)), classificados em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado..... 58

Capítulo 3

Fig. III- 1 Mapa da vegetação pretérita do bioma Cerrado, classificado em formações campestres, savânicas e florestais (Fonte: Third National Inventory (Brazil, 2016), modificado de PROBIO I (MMA) e TM/Landsat-5 imagens).....	67
Fig. III- 2. Principais estratos vegetais e suas contribuições para a composição do combustível fino disponível para a queima em savanas brasileiras.	67
Fig. III- 3 Descrição (A) e diagrama conceitual (B) do modelo BEFIRE.....	69
Fig. III- 4 Dinâmica mensal A) antes e B) depois do fogo da biomassa de herbáceas (----) e gramíneas (—), ao longo do gradiente de déficit de pressão de vapor d'água (DPV) (□) em uma savana brasileira (cerrado típico) na Reserva Ecológica do IBGE, Distrito Federal (Modificado de Batmanian & Haridasan (1985)).	70
Fig. III- 5 Dinâmica anual depois do fogo da biomassa de arbustos (----) e árvores (—) em uma savana brasileira (cerrado rupestre) no Parque do Bacaba, Mato Grosso (modificado de Gomes et al. (2014)).	70
Fig. III- 6 Simulações da recuperação pós-fogo (uma queimada) da biomassa de A) árvore, B) arbustos, C) herbáceas, D) gramíneas e E) balanço de carbono atmosférico (<i>Uncommitted emissions</i>) para savanas brasileiras (cerrado típico) pelo modelo BEFIRE.	75
Fig. III- 7 Simulações da recuperação pós-fogo (duas queimadas bienais) da biomassa de A) árvore, B) arbustos, C) herbáceas, D) gramíneas e E) balanço de carbono atmosférico para savanas brasileiras (cerrado típico) pelo modelo BEFIRE.....	76
Fig. III- 8 Recuperação pós-fogo da vegetação em uma savana brasileira (cerrado típico) no Parque do Bacaba, Mato Grosso.	81
Fig. III- 9 Queimadas bienais realizadas nos períodos modal (agostos) e tardio (setembro) e seus efeitos sobre a estrutura de A) árvores, B) arbustos e C) combustível fino em uma savana brasileira (cerrado típico) na Reserva Ecológica do IBGE, Distrito Federal (modificado de Sato (2003)).	82
Fig. S III- 1 Elementos básicos de um modelo de estoque e fluxos.....	85
Fig. S III- 2. Diagrama do modelo BEFIRE na interface do software Vensim.....	87

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tab. I- 1 Studies derived from prescribed burning experiments in the Cerrado (1992–2017) focusing on fire drivers, behavior, and effects.	18
Tab. I- 2 Studies focusing on fire frequency and timing of prescribed burns in the Cerrado from 1992 to 2017.	19
Tab. I- 3 Main results of prescribed burning experiments in the Cerrado from 1992 to 2017.	20
Tab. I- 4 Studies focusing on fire modeling in the Cerrado published between 1990 and 2017. * Qualitative models.	21

Capítulo 2

Tab. II- 1 Localização e número de queimadas prescritas (n) realizadas no bioma Cerrado entre os anos de 1990-2016. FV= Formação vegetal C= formação campestre, S= savânica, F= florestal, n = número de parcelas.	35
Tab. II- 2 Equações utilizadas para a determinação da intensidade da frente do fogo, calor liberado, déficit de pressão vapor d'água e emissão de carbono.	36
Tab. II- 3 Variáveis respostas de comportamento e efeito do fogo sobre as emissões de carbono entre as formações campestres, savânicas e florestais do bioma Cerrado. Asteriscos (*) representam diferenças entre as formações pelo teste ANOVA (1 fator) e letras diferentes representam diferenças pelo teste <i>post hoc</i> de Tukey, considerando o intervalo de confiança de 95%.	40
Tab. II- 4 Seleção de modelos para o comportamento e emissões de carbono entre formações vegetais em função das variáveis explicativas vegetais e microclimáticas. LogLik = Máxima verossimilhança; AICc = Critério de Informação de Akaike para amostras pequenas; Δ = delta AICc; w = pesos de Akaike (em negrito estão os melhores modelos). Formação = tipo de formação vegetal (campestre, savânica, florestal), Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento.	49
Tab. II- 5 Modelos lineares generalizados construídos para prever o comportamento do fogo e as emissões de carbono entre as formações vegetais (FV) do bioma Cerrado. C = campestre, s = savânica, f= florestal, Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento.	50
Tab. S II- 1 Seleção de modelos para o comportamento do fogo para cada formação vegetal em função das variáveis explicativas vegetais e microclimáticas. FV = Formação Vegetal; C= formação campestre, S= savânica, F= florestal, LogLik = Máxima verossimilhança; AICc = Critério de Informação de Akaike para amostras pequenas; Δ = delta AICc; w = pesos de Akaike (valores $\Delta < 2$ estão em negrito). Formação = tipo de formação vegetal, Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento. .	59
Tab. S II- 2 Seleção de modelos para as emissões de carbono para cada formação vegetal em função das variáveis explicativas vegetais, microclimáticas e de comportamento do	

fogo. FV= Formação Vegetal; C= formação campestre, S= savânica, F= florestal, LogLik = Máxima verossimilhança; AICc = Critério de Informação de Akaike para amostras pequenas; Δ = delta AICc; w = pesos de Akaike (valores < 2 estão em em negrito). Formação = tipo de formação vegetal, Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento..... 60

Capítulo 3

Tab. III- 1 Equações utilizadas no modelo BEFIRE.	71
Tab. III- 2 Valores iniciais e constantes utilizadas no modelo BEFIRE para simular a dinâmica dos estoques de biomassa vegetal e balanço de carbono atmosférico em savanas brasileiras (cerrado típico).	72
Tab. III- 3 Simulações do comportamento do fogo e emissões de carbono para savanas brasileiras (cerrado típico) pelo modelo BEFIRE utilizando três cenários (entradas 1,2,3*) de combustível fino e microclima.	77

RESUMO GERAL

O Cerrado, é o segundo maior bioma da América do Sul e o que contém a savana de maior biodiversidade do mundo. Entretanto, nas últimas décadas a fragmentação de habitats, o aumento da temperatura e a intensificação da seca têm alterado a frequência do fogo nessa região e provocado mudanças na estrutura da vegetação, na biodiversidade e no funcionamento dos ecossistemas. Queimadas frequentes implicam principalmente em reduções da biomassa vegetal, invasão de espécies exóticas e aumento das emissões de gases do efeito estufa. Por outro lado, ausência do fogo também tem ameaçado a vegetação savânica, provocando o adensamento e a homogeneização das espécies arbóreas. Apesar dessas ameaças, ainda sabemos pouco sobre as relações entre o comportamento do fogo e seus determinantes, bem como os seus efeitos sobre o ecossistema. Neste trabalho, foi compilado informações a partir de estudos existentes no Cerrado sobre o comportamento do fogo em formações campestres, savânicas e florestais. Os objetivos desse estudo foi: **1)** definir como podemos avançar no conhecimento sobre o comportamento e o efeito do fogo; **2)** definir quais são os determinantes do comportamento do fogo e emissões de carbono e **3)** construir um modelo ecológico para prever o comportamento e o efeito do fogo sobre a dinâmica temporal da biomassa da vegetação e emissões de carbono com diferentes frequências de fogo. Para avançar no conhecimento estudos em ecologia do fogo no Cerrado precisam expandir em escala preditiva (mudança de driver único para múltiplos), em escala espacial (mudança de site para bioma) e em escala de tempo (mudança de curto para longo prazo). Os principais determinantes do comportamento do fogo (velocidade do fogo, intensidade do fogo e calor liberado) e emissões de carbono (combustível fino consumido, fator de combustão e carbono liberado) foram a quantidade de combustível fino e o vapor de déficit de pressão d'água. As simulações do modelo construído demonstraram que queimadas bienais mantêm constante a biomassa de herbáceas e gramíneas. No entanto, esse intervalo de tempo não permite a recuperação da biomassa de arbustos e árvores e o retorno do carbono emitido durante a queimada. Os resultados deste estudo poderão auxiliar na compreensão do comportamento e efeito do fogo sobre o ecossistema do bioma Cerrado, auxiliando na elaboração de planos de manejo do fogo.

Palavras-chave: Combustível fino, emissão de carbono, manejo do fogo, savana, velocidade do fogo

GENERAL ABSTRACT

The Cerrado is the second largest biome in South America and it contains the world's most biodiversity savanna. However, in recent decades habitat fragmentation, rising temperatures, and drought intensification have changed the frequency of fire in that region and have led to changes in vegetation structure, biodiversity, and ecosystem functioning. Frequent fires reduce plant biomass, increase invasion of exotic species, and increase of greenhouse gas emissions. Conversely, absence of fire has also threatened the structure and biodiversity of savanna vegetation, causing tree encroachment and homogenisation of the floristic component. Despite these threats, we still know little about the relationship between fire behavior and its determinants, as well as the relationship between fire and its effects on the ecosystem. In this work, information was compiled from existing studies about fire behavior in open savanna, savanna and forest formations in the Cerrado. The objectives of this study were: 1) to define how we can advance the knowledge about behavior and effects of fire; 2) define the determinants of fire behavior and carbon emissions, and 3) make an ecological model to predict the behavior and effect of fire on the temporal dynamics of vegetation biomass and carbon emissions with different fire frequencies. In order to advance the knowledge, studies in fire ecology in the Cerrado need to expand in a predictive scale (change from single to multiples driver), spatial scale (change from site to biome) and time scale (change from short- to long-term). The main determinants of fire behavior (rate of spread, fire intensity, and heat release) and carbon emissions (fuel consumed, combustion factor, and carbon emission) were the amount of fine fuel load and vapor pressure deficit. The simulations of the model demonstrated that biannual burns maintain the herbaceous and grass biomass constant. However, this time interval does not allow the recovery of biomass from shrubs and trees and the return of the carbon emitted during the fire. The results of this study may help to understand the behavior and effect of fire on the ecosystem of the Cerrado biome, helping in the elaboration of fire management strategies.

Keywords: Carbon emission, fine fuel, fire management, savanna, fire spread

INTRODUÇÃO GERAL

O fogo em ecossistemas terrestres

O fogo é um evento global e de longa ocorrência histórica, que atua como um filtro ambiental na distribuição e composição de vários ecossistemas do mundo (Kraft et al., 2015), mesmo antes da presença humana (Bond et al., 2005; Bowman et al., 2009). As primeiras evidências da presença de fogo no mundo, por registros fósseis, datam 420 milhões de anos, logo após o aparecimento das plantas terrestres no período Siluriano (Scott and Glasspool, 2006). Análises de isótopos estáveis de carbono em sedimentos mostraram que a expansão das gramíneas se deu por cerca de 7 a 8 milhões de anos AP, coincidindo com o aumento substancial do carvão vegetal em sedimentos (Keeley and Rundel, 2005), evidenciando a origem das savanas (Cerling et al., 1997). Assim, o fogo tem sido considerado como um mantenedor da estrutura, biodiversidade e funcionalidade dos ecossistemas savânicos (Bond et al., 2005; Bowman et al., 2009).

As savanas estão entre os tipos de vegetação mais propensas a ocorrência de fogo, sendo a presença de gramíneas uma das principais causas da sua alta flamabilidade (Bond, 2008; Hoffmann et al., 2012b; Pausas and Ribeiro, 2013). As gramíneas produzem grande quantidade de combustível fino e aerado que se tornam altamente inflamáveis durante os períodos secos (Bond and Keeley, 2005; Bowman et al., 2009). Essa alta flamabilidade pode ser mantida por um mecanismo de retroalimentação (*feedback*) positivo, onde o fogo diminui a cobertura arbórea, favorecendo a expansão de gramíneas, e conseqüentemente aumentando a flamabilidade do ecossistema, favorecendo assim a ocorrência de novas queimadas (Beerling and Osborne, 2006; Hoffmann et al., 2012b). Além disso, o aumento da frequência de queimadas também afeta o componente climático (Bowman et al., 2009). Beerling & Osborne (2006) descrevem um *feedback* positivo entre fogo-clima, onde o fogo permite a liberação de aerossóis negros, pelo qual afeta o níveis de precipitação regional, que por sua vez intensifica a seca sazonal, aumentando ainda mais a flamabilidade.

Ao contrário das florestas a vegetação arbórea savânica consegue manter sua estabilidade por apresentar adaptações morfológicas que lhe garante resistência, ou seja, capacidade de resistir às ações imediatas do fogo, e/ou resiliência, capacidade de recuperação após a passagem de fogo (Coutinho, 1990; Hoffmann, 2005; Hoffmann et al., 2012b; Pivello, 2011). Entre essas adaptações podemos mencionar, para a maior *capacidade de resistência*, cortiça espessa com função de proteção térmica contra

temperaturas elevadas (Hoffmann et al., 2012b) e para a maior resiliência, maior investimento em biomassa de raízes (Hoffmann, 2005) ou xilopódios (órgãos subterrâneos), permitindo maior disponibilidade de carboidratos para rebrota após a passagem de fogo (Coutinho, 1990). Segundo Bowman et al. (2009) esse conjunto de estratégias reprodutivas e de sobrevivência em função do regime de fogo, sugere que este seja um filtro ambiental potente que influencia na quantidade de biomassa, na distribuição das espécies e conseqüentemente na flamabilidade da vegetação.

Entretanto, as incertezas associadas aos efeitos do fogo sobre os ecossistemas, sejam eles positivos ou negativos, ainda são um desafio para a ciência (Bowman et al., 2009; Durigan and Ratter, 2015), e podem se tornar ainda mais difíceis no futuro, com o aumento da frequência de fogo frente às alterações da cobertura vegetal e mudanças climáticas previstas (Bowman et al., 2009). Embora haja um amplo consenso da relação entre a longa história evolutiva do fogo e as adaptações da vegetação savânica, na história recente, ações antrópicas (como o uso do fogo para fins agropecuários) têm intensificado a frequência deste evento (Bowman et al., 2009; Pausas and Keeley, 2009). Desta forma, não podemos prever se todas as espécies conseguirão se adaptar aos atuais regimes de fogo (Pausas and Keeley, 2009). Assim, pesquisadores têm se preocupado com o futuro das relações entre vegetação, clima e fogo e têm buscado compreender os vetores desse evento e seus efeitos sobre o ecossistema (Pausas and Keeley, 2009). Esse conhecimento limitado do comportamento do fogo em função de seus vetores atuais e das respostas futuras da vegetação reforça a necessidade de estudos que avaliem esses vetores de forma conjunta.

O fogo no bioma Cerrado

O bioma Cerrado é caracterizado por um mosaico de formações vegetais, definidas principalmente por um gradiente vegetal de cobertura arbórea, que vão desde formações mais abertas à formações mais fechadas (Ribeiro and Walter, 2008). As formações abertas são subtipos naturais de savana (Sarmiento, 1983). Essas são classificadas em “campestre”, caracterizada pelo predomínio de plantas herbáceas e gramíneas e “savânica” caracterizada pela presença árvores esparsas sobre estrato gramíneo. Enquanto que as formações mais fechadas são denominadas como “florestal”, caracterizada pelo predomínio de árvores com formação de dossel (Ribeiro and Walter, 2008). Ainda, essas formações são subclassificadas em fitofisionomias, de acordo com a

estrutura, composição florística, tipo de solo, cobertura arbórea, formação de dossel, associação a curso d'água e deciduidade.

As formações savânicas ocupam a maior parte do bioma (~76 milhões de hectares) e se concentram na região central. Enquanto que formações florestais ocupam menores proporções (~40 milhões de hectares) e se concentram ao norte. Já as formações campestres ocorrem em pequenos fragmentos (~8 milhões de hectares) distribuídos ao longo do bioma (Sano et al., 2010). Juntas essas ocupam 23% do território nacional (Ribeiro and Walter, 2008) e 11 estados brasileiros localizados na região central do Brasil (Silva et al., 2008). Esta posição central determina transições com os demais biomas brasileiros, como Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Amazônia (Coutinho, 2006, 1990; Ribeiro and Walter, 2008). Essa alta heterogeneidade de habitats do bioma Cerrado, somada a sua grande extensão, divisa com outros biomas e alta sazonalidade têm possibilitado a um maior estabelecimento de espécies diferentes, resultando na savana tropical mais rica do mundo (Fernandes et al., 2016; Klink and Machado, 2005).

Apesar dessa alta biodiversidade o bioma Cerrado está na lista dos “*hotspots*” globais de biodiversidade (Myers et al., 2000). Estima-se a extinção de 397 espécies de plantas endêmicas até 2050 em função da perda de habitat pelo desmatamento (Strassburg et al., 2017). O desmatamento juntamente com as mudanças climáticas tem aumentado a frequência de fogo (Prichard et al., 2017). Bustamante *et al.* (2012) avaliando a área de pastos queimados no Cerrado entre os anos 2003-2008 também observaram um aumento significativo na extensão de pastagem queimadas, principalmente no ano de 2007. Além disso, no ano de 2017, as queimadas alcançaram número recorde no Brasil, com 272 mil focos, representando cerca de 46% a mais em relação ao ano anterior (INPE, 2017). Esse aumento na frequência de fogo tem sido associado a reduções da biomassa da vegetação arbórea, aumentos da biomassa de gramíneas e invasão de espécies *exóticas* (Sato, 2003; Silvério et al., 2013). Assim, estudos têm se preocupado com o futuro dessas interações vegetação, fogo e clima (Pausas & Keeley 2009).

Por outro lado a supressão total também prejudica a vegetação campestre e savânica do bioma. Por exemplo, um maior intervalo de queima e conseqüentemente um maior acúmulo de material combustível, resulta em queimadas descontroladas e intensas, que não são benéficas para a vegetação e podem causar perda de espécies, inclusive aquelas endêmicas, invasão de espécies exóticas e mudanças na estrutura da

fitofisionomia (Fidelis and Pivello, 2011; Pivello, 2011). Além disso, a exclusão do fogo também pode levar ao adensamento da vegetação e a homogeneização de espécies (Abreu et al., 2017; Pinheiro and Durigan, 2009; Pinheiro et al., 2016). Bond et al. (2005) mostraram por meio de simulações que a exclusão do fogo levaria a uma expansão das formações florestais entre 27 - 56% sobre as formações savânicas (Bond et al., 2005).

Diante das constantes ameaças descritas, torna-se necessário compreender melhor o comportamento e o efeito do fogo no bioma Cerrado, seja para definir medidas de prevenção ao fogo ou para elaborar estratégias de manejo do fogo. Assim, a presente tese teve como objetivo unificar as informações existentes na literatura sobre o comportamento e o efeito do fogo sobre os ecossistemas do bioma Cerrado, afim de responder as seguintes perguntas: **1)** Quais são as tendências e lacunas do conhecimento atual sobre o comportamento e o efeito do fogo no Cerrado e como podemos avançar no conhecimento? **2)** Quais são os determinantes (vegetais e microclimáticos) do comportamento do fogo e emissões de carbono durante a queima? e **3)** Como podemos prever o comportamento e o efeito do fogo sobre a dinâmica temporal da biomassa da vegetação e emissões de carbono com diferentes frequências de fogo?

ESTRUTURA E OBJETIVOS GERAIS DA TESE

A tese foi estruturada em três capítulos que buscam compreender o fator fogo no bioma Cerrado por abordagens diferentes e complementares (Fig. 1). O **CAPÍTULO I (Como podemos avançar no conhecimento sobre o comportamento e os efeitos do fogo no bioma Cerrado?)** foi desenvolvido com base em uma revisão crítica que contextualiza o conhecimento atual do comportamento e efeito do fogo no bioma, adquirido a partir de informações reportadas na literatura, tanto por queimadas quanto por modelos matemáticos. As lacunas do conhecimento também foram descritas, visando direcionar o caminho de pesquisas futuras. O **CAPÍTULO II (Determinantes do comportamento do fogo e emissões de carbono no Cerrado brasileiro)** foi desenvolvido com o objetivo de definir os padrões de comportamento e efeito do fogo em função da seleção de suas principais variáveis preditoras. Todas essas variáveis foram extraídas a partir das queimadas considerada no capítulo I. Os resultados dos capítulos I e II deram suporte ao **CAPÍTULO III (Interações entre vegetação, microclima e fogo em savana brasileira: Modelos baseados em processos)**. Pelo qual, foi construído um protótipo de um modelo ecológico para prever o comportamento e o efeito do fogo sobre a dinâmica temporal da biomassa da vegetação e emissões de carbono, considerando diferentes cenários de frequência de fogo.

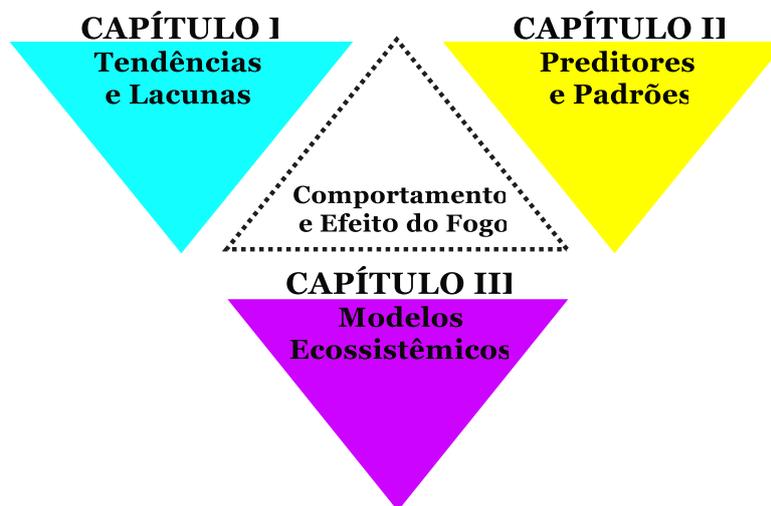


Fig. 1 Fluxograma esquemático da estrutura da tese, representada por três capítulos e tendo como tema central o comportamento e o efeito do fogo sobre os ecossistemas do bioma Cerrado.



Capítulo 1 - How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome?

Como podemos avançar no conhecimento sobre o comportamento e os efeitos do fogo no bioma Cerrado?

¹Letícia Gomes¹*, Heloisa Sinátora Miranda¹, Mercedes Maria da Cunha Bustamante¹
¹Departamento de Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal 70919-900, Brazil

*Corresponding author. Tel.: +55-66-99228-2598; fax: +55-61-3107-2925.

E-mail address: leticiagomesbio@gmail.com (L. Gomes), mercedes@unb.br (M. M. C. Bustamante), hmiranda@unb.br (H. S. Miranda)

Artigo publicado na revista “Forest Ecology and Management”

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.032>



Abstract

The indiscriminate use of fire represents one of the most significant environmental threats to the Cerrado, the second largest biome in South America. However, the impacts of fire on ecological, cultural, and economic processes remain poorly understood, making it difficult to create effective action plans for fire prevention, control, or management. We extensively reviewed the literature on fire behavior and effects in the Cerrado biome to identify current knowledge gaps and ways to advance research on fire ecology to improve the efficacy of current policies for fire use in this biome. The knowledge gaps reflect the absence of a systemic and integrative approach linking fire behavior and its effects. To fill current knowledge gaps, there are three major challenges related to interactive effects and spatial and temporal scales of the analyses: 1) predictive scale (change from single to multiple drivers); 2) spatial scale (change from site to biome); and 3) time scale (change from short- to long-term dynamics). Considering the difficulty of changing all three scales in a single experiment, we propose the following priorities: 1) increasing the scientific effort, even if independently, to include at least one of the three proposed scale changes; 2) interdisciplinary proposals that integrate different study tools; and 3) studies that assess which ecological processes are more sensitive or more resilient to fire and consequently have major impacts on ecosystem services. The continuation of existing long-term studies can be an opportunity to address these priorities in addition to new sites, which can represent different landscape configurations or environmental changes.

Keywords: Cerrado, Ecosystem services, Fire drivers, Fire management, Fire use, Savanna.

Introduction

Fire is a disturbance with a long history of occurrence and plays a fundamental role in the patterns and processes of the global ecosystem (Beerling and Osborne, 2006; Bond, 2015). Fire influences the structural and floristic dynamics of vegetation (Kraft et al., 2015), the carbon cycle (Bond and Midgley, 2012), and climate (Bowman et al., 2009; Jin, 2010). Over paleoecological time scales, fire has shaped biotic characteristics and ecosystem processes of savanna biomes (Beerling and Osborne, 2006; Cerling et al., 1997), but in recent history, anthropogenic activities, such as the use of fire for agricultural purposes, have changed its natural frequency (Bowman et al., 2009). Thus,

it cannot be presumed that all species will be able to adapt to current fire regimes (Pausas and Keeley, 2009).

The Brazilian Cerrado, the savanna with the richest flora in the world (Myers et al., 2000), is severely threatened by the indiscriminate use of fire (Durigan and Ratter, 2015). Between 2002 and 2010, the area burned in the Cerrado represented approximately 73% (545,000 km²) of the total burned area in Brazil (Araújo et al., 2012). The Forest Code (Law number 12651), the main environmental law in Brazil that has been in effect since May 2012, addresses fire management in protected areas of the Cerrado (Article 38), declaring illegal the burning of native vegetation outside reserves. However, the national policy on Integrated Fire Management proposed by the Ministry of the Environment is still under discussion. The challenge is to create action plans for fire prevention, control, and management that promote balanced prescription of fire regimes that considers the trade-offs of fire impacts on ecological, economic, and cultural processes (**Box 1**).

Efficient use of fire depends on understanding the relationships between fire and its drivers, and relationships between fire and the multiple ecological processes affected by fire (Archibald et al., 2017). Experimental studies evaluating these relationships in the Cerrado biome (**Fig. I- 1**) include the “Fire Project”¹ (Miranda, 2010), which was implemented in 1991 and is considered the largest project involving prescribed fires in Latin American savannas (Dias and Miranda, 2010). More recent projects include “Fire as a management tool in Cerrado conservation units”² (Gorgone-Barbosa et al., 2015; Rissi, 2016) which was implemented in 2011 as well as the “Prevention, control and monitoring of irregular fires and forest fires in the Cerrado”³ project (Schmidt et al., 2016b) and the “Effects of fire and its suppression on the structure, composition and biodiversity of the ecosystem in the Cerrado physiognomic gradient”⁴ project (Durigan, 2017; Hoffmann, 2018), both implemented in 2014. Although these studies have achieved major advances in the understanding of fire ecology in the Cerrado, gaps remain due to the absence of a systemic approach that links the behavior, effects, and drivers of fires.

¹ Coordinated by Professor Heloisa Sinátorá Miranda (University of Brasília)

² Coordinated by Professor Alessandra Fidelis (São Paulo State University)

³ Coordinated by Professor Isabel Schmidt (University of Brasília)

⁴ Coordinated by Professor William Hoffmann (North Carolina State University)

A fire event involves complex interactions and feedbacks between biotic and abiotic processes (Harris et al., 2016). Mathematical models are useful to simulate these multiple and complex ecological processes (Rothermel, 1972), select primary predictors, and predict fire behavior and its impacts (Alexander and Cruz, 2012). However, fire modeling studies for the Cerrado are rare and need to be improved to develop a more systemic approach (Pereira et al., 2014). In addition, most of the models that have been tested for this biome were originally developed for temperate regions with different vegetation and physiological characteristics (White et al., 2013, 2016), which reduces the accuracy of their predictions (Mistry and Berardi, 2005).

Compared with studies in Australia, Europe, and North America, the literature about fire in South America is less abundant (Prichard et al., 2017). In this context, we performed a broad literature review of studies evaluating the relationships between fire behavior and predictive environmental variables (biotic and abiotic) and between fire behavior and its effects in the Cerrado biome. The studies considered for this review were related to prescribed burns or mathematical models and were reported in scientific journals, books, theses, and dissertations published between 1990 and 2017. We searched the databases Web of Science, Science Direct, Google Scholar, and Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations using the following keywords: (prescribed fire* OR fire* OR burning) AND (behavior * OR effect* OR management* OR regime* OR dynamic). Our goals for this review were to 1) identify trends and gaps in the current knowledge of the ecological role of fire in the Cerrado; and 2) determine how this knowledge can progress to improve the efficacy of current policies of fire use in the Cerrado. This analysis will be then used to identify research challenges and priorities for the improvement of current studies and design of future initiatives considering different scales (temporal and spatial), drivers and fire effects

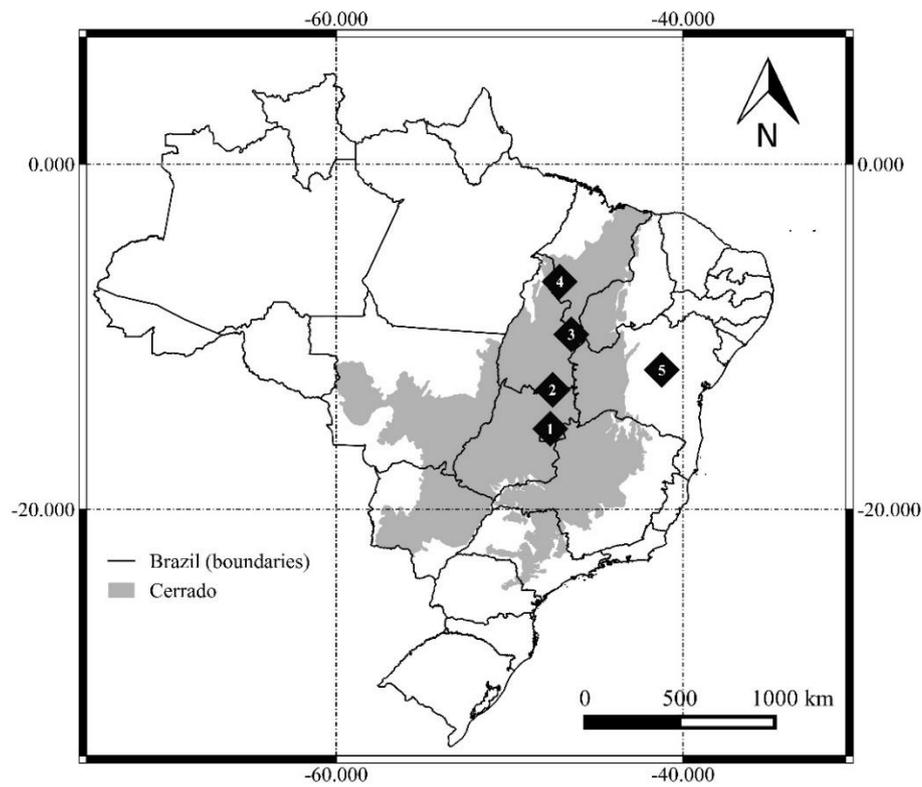


Fig. I- 1 Studies describing prescribed burns in the Cerrado (1990–2017) were conducted in (1) Ecological Reserve of the Brazilian Institute of Geography and Statistics, DF; (2) Serra do Tombador Natural Reserve, GO; (3) Serra Geral Ecological Station and Jalapão State Park, TO; (4) Chapada das Mesas National Park, MA; and (5) Chapada Diamantina National Park, BA, which is outside the geographic boundaries of the Cerrado biome but has Cerrado vegetation.

Box 1. *Fire use trade-offs*

In the Cerrado biome, anthropogenic fire has been an efficient and inexpensive tool (Pivello, 2011) for removing native vegetation before pasture or crop cultivation, stimulating the regrowth of native grasses for cattle grazing, hunting and dispersing venomous animals, and indigenous rituals (Mistry, 1998). However, these practices result in large emissions of carbon and other trace gases, contributing to the increase in greenhouse gas emissions and global warming (Pivello, 2011). The Cerrado represents approximately 50% (1.69 Mt CO₂eq) of the total CO₂ emissions for pasture management in Brazil (Bustamante et al., 2012). In addition, fire used for these purposes can escape control and burn surrounding natural areas, exemplified by the large and catastrophic fire that burned 93% (1,236 km²) of Emas National Park in 1994 (França et al., 2007).

Between 2002 and 2010, the burned area of the Cerrado was concentrated mainly in the northern part of the biome, especially at the “Arc of Deforestation” in the Amazon-Cerrado transition (Araújo et al., 2012). The highest proportion of natural vegetation remaining in the biome is also concentrated in its northern part (Sano et al., 2010). This region also has a high concentration of recent land conversions (2002–2009) (Rocha et al., 2011), which involve biennial or triennial burns to clear the area within a period of 10 to 20 years. The extensive use of anthropic fire and its threat to the remaining native vegetation are apparent at the level of spatial pattern.

Cerrado vegetation occurs heterogeneously in space, forming vegetation mosaics due to the high environmental heterogeneity (soil and climate) and transitions with other Brazilian biomes (Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal, and Amazônia) (Coutinho, 1990; Felfili et al., 2008). The specific effects of fire on native Cerrado vegetation depend on the type of vegetation (**Fig. I- 2**). Open savanna and savanna formations are more flammable and fire-tolerant than forest formations (Hoffmann et al., 2012b). The higher flammability of open savannas and savannas is attributed mainly to lower tree cover and high grass cover, which promotes a microclimate with higher temperatures and sun exposure, which acts as a fuel source and allows fire to spread rapidly (Hoffmann et al., 2012b; Miranda et al., 2010, 2002). Because of the shorter residence time of the fire front, trunk temperature does not significantly increase resulting in less damage to trees (Kayll, 1968). Higher fire tolerance is attributed to morphological adaptations, such as thick bark that protects vascular tissues against high temperatures and a greater investment in root biomass as a source of carbohydrates for regrowth (Hoffmann, 2005). These adaptations are less evident in forest formations, making these environments highly vulnerable to changing fire regimes (Hoffmann and Franco, 2003). Despite the lower flammability of forests, fire occurrence is not inhibited, especially

where ecotones are formed with open savanna and savanna formations (França et al., 2007) or during severe droughts (Brando et al., 2014).

Despite the relative fire tolerance of open savanna and savanna formations, fire can threaten these formations, especially where the natural fire regime has been altered (Miranda et al., 2010). For example, unlike natural fires that occur during the dry-rainy season transition, anthropogenic fires that occur during the dry season cause greater damage to vegetation; because they are more intense and burn larger areas because of the abundance of fine fuel load and the absence of rainfall (Miranda et al., 2010; Ramos-Neto and Pivello, 2000). Anthropogenic fires are also more frequent, which prevents the recovery of individual plants to heights sufficient to avoid the direct effect of the flames. This increases mortality rates, especially of smaller individuals (Sato, 2003); decreases recruitment of woody species, species richness, and diversity (Hoffmann et al., 2012a; Medeiros and Miranda, 2005); and promotes the invasion of exotic grasses (Silvério et al., 2013). These changes may convert forest formations to savanna formations (Henriques, 2005) (**Fig. I- 2, Arrow 1**). Increased fire frequency also causes an imbalance between CO₂ emission and consumption by vegetation, since a shorter burn interval does not allow vegetation to reabsorb carbon released during the fire (Sato et al., 2010)

Conversely, total fire exclusion is also a potential threat to open savanna and savanna formations, since they depend on the fire regime to maintain their structure, microclimate, diversity, and function (Medeiros and Fiedler, 2011). Thus, without fire, savanna formations might become denser (Abreu et al., 2017; Pinheiro and Durigan, 2009), and forest formations may encroach on savannas that have the climate and soil able to support forests (Henriques, 2005) (**Fig. I- 2, Arrow 2**). The increased vegetation density can reduce species richness and diversity (Abreu et al., 2017; Cardoso et al., 2009; Pinheiro and Durigan, 2009). Fire also stimulates reproductive mechanisms of some Cerrado species, including flowering (Fidelis and Blanco, 2014) and fruiting (Conceição and Orr, 2012). Thus, fire is one of the factors maintaining coexistence between savanna and forest, which are considered alternative stable states (Dantas et al., 2016). Damage caused by the indiscriminate use of fire not only alters plant and climate processes but also affects economic and cultural processes (Durigan and Ratter, 2015). Therefore, criteria for the use of fire in the Cerrado must consider the type of vegetation cover and the natural fire regime. It is necessary to determine efficient techniques to control and fight fire, when it is needed, to prevent its use from threatening surrounding areas.

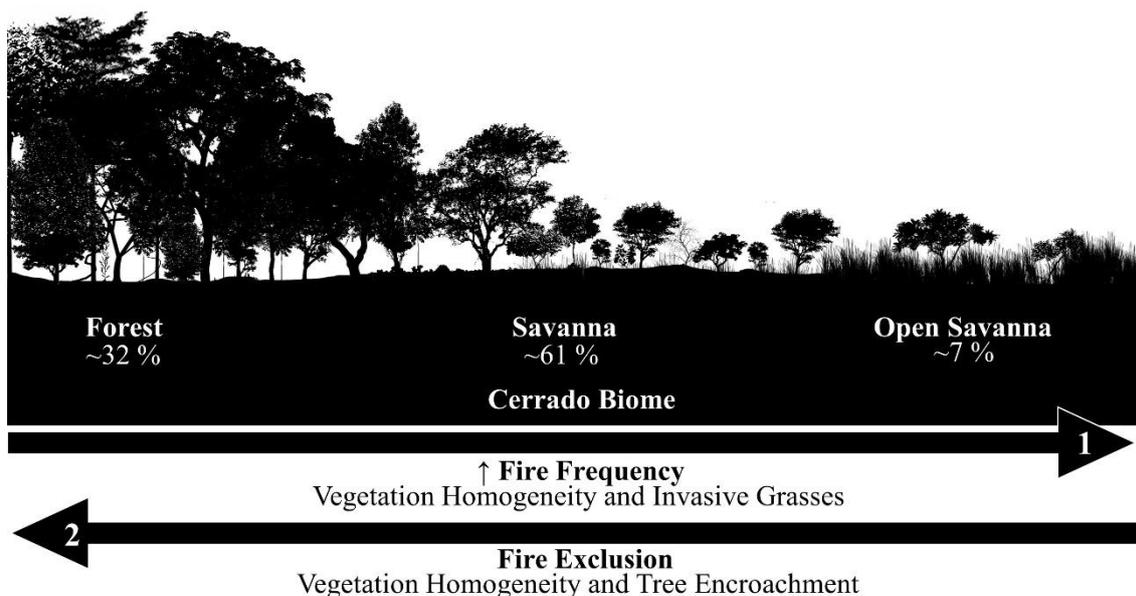


Fig. I- 2 Relationships between the main types of plant formations, relative extent of land cover (%), and fire frequency in the Cerrado biome. Arrows show the direction of change in vegetation structure due to increased fire frequency (1) or total fire exclusion (2).

Gaps in the current knowledge of fire

Prescribed burning

The 16 studies reporting prescribed burn experiments in the Cerrado biome ([Fig. I- 1](#); [Tab. I- 1](#)) assessed the effect of microclimatic (e.g., air temperature, air relative humidity, and wind speed) and vegetation type on fire behavior (rate of spread, flame height, and flame width). Fifteen of the studies quantified the fine fuel load, which is an important predictor of flammability in the environments (Hoffmann et al., 2012b). The fine fuel load consists of all material (living or dead) up to 2 m tall including grasses, leaves, and branches (up to 6 mm in diameter) (Luke and McArthur, 1978); however, the consumption of leaves is low even at this height (Krug et al., 2002). There are knowledge gaps in terms of fire behavior predictors, such as declivity and general post-fire processes in forest formations, as fire drivers, fire behavior and fire effect on loss and recovery biomass. There is also a shortage of studies investigating the relationship between fire behavior and its effects, especially over longer time scales, and the dynamics of different plant carbon stocks. For example, few studies have attempted to quantify post-fire carbon losses, recovery of trees and shrubs, or post-fire nutrient cycling ([Tab. I- 1](#)).

It is important to note that some of these studies evaluated fire behavior in the Cerrado based on satellite data (Araújo et al., 2012; França et al., 2007; Riggan et al.,

2010). Other studies have evaluated the effects of fire on woody vegetation (Gomes et al., 2014; Sato et al., 2010), herbaceous vegetation (Munhoz and Amaral, 2010), seed banks (Andrade and Miranda, 2010; Fichino et al., 2016), grass invasion (Rossi et al., 2014), and the seasonal trend of litterfall (Nardoto et al., 2006). Mammals (Henriques, 2010) and insects (Diniz and Morais, 2010; Massochini Frizzo et al., 2011) have also been evaluated. However, these studies do not consider the systemic relationships between fire behavior and its effects on these processes.

The Cerrado is highly seasonal with a well-defined rainy season (October–March) and dry season (April–September) (Silva et al., 2008). During the rainy season or the dry-rainy season transition, fires occur naturally through lightning, but these burns are less severe than dry-season fire and cover smaller areas because their propagation is inhibited by the moisture content of the soil and vegetation (Ramos-Neto and Pivello, 2000). During the dry season, fires occur mainly through anthropic activity and are more severe (Pivello, 2011). Therefore, experimental studies in the Cerrado investigated different fire regimes, defined by fire frequency and time of year, as a function of fire behavior, and their effects (**Tab. I- 2** and **I- 3**). Regarding the timing of burns: (1) burns performed at the beginning of the dry season (May–June) test the hypothesis that these burns have less effect on native vegetation, since the amount of dead fine fuel load is lower, thus reducing fire severity; (2) burns performed in the mid-dry season (August) simulate traditional fire management for agricultural purposes; and (3) burns performed in the late-dry season (September) test the hypothesis that these burns have greater impacts on native vegetation since the quantity and quality of the fine fuel load are higher, which increases fire severity (Dias and Miranda, 2010). Studies of fire frequency seek to determine optimal burn intervals for each type of vegetation formation to reduce damage and allow for the recovery of biomass and nutrients (Pivello and Coutinho, 1992). However, gaps in understanding the effects of fire regimes are even greater than the gaps in understanding of the variables shown in **Tab. I- 1**, because few studies have evaluated annual, triennial, or quadrennial burns, which are rare.

Fire models

Current models of fire behavior and effects in the Cerrado are based on different approaches and demonstrate varying degrees of complexity (**Tab. I- 4**). Most of these studies used climatic and anthropogenic variables to simulate fire risk (Justino et al., 2011; Koproski et al., 2011; Mélo et al., 2012, 2011; Pereira, 2002; Silva et al., 2016).

Other studies used plant and climatic variables to predict fire behavior (Almeida, 2012; Hoffmann et al., 2012b; Mistry and Berardi, 2005; Pereira et al., 2014) or fire effects (Pivello and Coutinho, 1996; Riggan et al., 2010). Only Neto (2005) developed a model to predict both fire behavior and effects, but this model was based solely on qualitative information. Thus, models that are currently used to evaluate fire events in the Cerrado are incipient and do not quantitatively represent or predict the relationships, in space or time, between fire behavior and its effects on vegetation and the atmosphere.

In Brazil, joint simulations of fire risk, behavior, and impacts over time have been developed only for the Amazon using fire ignition, spread, and carbon components (FISC) and carbon and land use change (CARLUC) models (Silvestrini et al., 2011; Soares-Filho et al., 2012, 2009). These models simultaneously evaluate multiple predictors of fire occurrence (e.g. climatic, anthropogenic, and biophysical variables) and are therefore considered satisfactory for predicting fire behavior and impacts in both savanna (Berjak and Hearne, 2002) and forest formations (Soares-Filho et al., 2012, 2002). A similar approach would be important for fire studies in the Cerrado.

The process-based fire regime model SPread and InTensity of FIRE (SPITFIRE) has been developed and coupled with ecosystem dynamics in the Dynamic Global Vegetation Models (LPJ-DGVMs), these models included the Cerrado biome (Lasslop et al., 2014; Thonicke et al., 2010). SPITFIRE and DGVMs were used to simulate the effects of climate change on fire regimes and emissions, considering the feedback between fire and vegetation, with climate influencing both fire and vegetation (Sitch et al., 2008; Thonicke et al., 2010). Specifically, these models consider the influence of fuel characteristics, weather, and ignition sources to simulate fire ignition, fire spread, and fire intensity, as well as consider fuel characteristics and fuel consumption to simulate emissions (Thonicke et al., 2010). Different DGVMs (JSBACH, LPJ-GUESS-SPITFIRE, and aDGVM) were used to simulate ecological mechanisms and feedbacks that determine the forest, savanna, and grassland biomes (Baudena et al., 2015). A novel DGVM, aDGVM2 was used to simulate interactions between precipitation, tree rooting depth, and fire effects on the distribution of vegetation in South America (Langan et al., 2017). Although there are many models today, it is not yet known what kind of model or degree of complexity is required to simulate ecological processes adequately at regional or global scales (Hantson et al., 2016). Global models can help design regional models, just as information from Cerrado regional surveys can also contribute to adjusting global models.

1 **Tab. I- 3** Main results of prescribed burning experiments in the Cerrado from 1992 to 2017.

Topic	Main Results	Effects of Burning Regime	Management Implications
Fire Behavior	<p>Rate of spread: Spread is rapid (1), reaching 1.4 ms⁻¹ in the open savanna (2) and 1.1 ms⁻¹ in the savanna (3).</p> <p>Fire line intensity: Medium in relation to other types of vegetation (1), reaching 16,000 kWm⁻¹ in open savanna (4) and 14,396 kWm⁻¹ in savanna (3).</p> <p>Flame height: Flames can reach 4.8 m in open savanna (5) and 2.9 m in savanna (6).</p>	<p>Period: Lower tree cover contributes to a drier microclimate favoring the occurrence and propagation of fire. During the dry season, these patterns are even more severe (6 and 7).</p> <p>Frequency: Long periods without burning can increase fire intensity and severity (1 and 8).</p>	Lower intensity burnings can be obtained at lower temperatures (performed 6:00 p.m. or later) and with relative humidity > 30% (8).
Fine Fuel Load Dynamic	<p>Fuel consumption: Most of the fine fuel load (about 90%) is consumed during burning in open savanna and savanna formations (1).</p> <p>Fuel recovery: 70% of pre-fire value can be recovered in 1 year after the fire, allowing a new burn (9).</p>	<p>Period: During the dry season, the fine fuel load becomes highly flammable (4).</p> <p>Frequency: Fire exclusion can lead to a large increase in fine fuel load available for burning, whereas more frequent burning reduces the amount of fuel (1).</p>	The use of prescribed fires in a mosaic arrangement is recommended to reduce the amount of fuel and avoid wildfires (10).
Nutrient Cycling	<p>Cycling rates: Fire accelerates nutrient cycling and promotes the temporary enrichment of mineral nutrients on the soil surface (4 and 11).</p> <p>Nutrient losses: More than ~90% of nitrogen, ~60% of sulfur, and 50% of phosphorus is lost to the atmosphere during Cerrado fires (4 and 10).</p>	<p>Frequency: The availability of nutrients in the soil is not affected by a single fire event, but by lower burn intervals (12). Increases in fire frequency reduce the amount of nutrients in aboveground biomass and increase nutrient concentration in fine roots (13).</p>	Burn intervals are recommended to be at least 3 years to allow recovery of nutrients lost during the burning (12 and 13).
Plant Dynamics	<p>Plant Damage: Damage is greater in smaller individuals with thinner bark (3), due to lower thermal protection of the stem at high temperatures (14).</p> <p>Plant Recovery: In larger individuals, damage is moderate, and aerial regrowth is the most usual response to fire (3).</p>	<p>Timing and Frequency: The timing of the burn in isolated fire events causes little damage to vegetation, but when associated with smaller fire intervals, this damage increases (3). Frequent burnings that occur in the same period of the year may favor some phenological groups (15).</p>	The use of mosaic burning in different seasons is recommended to favor different phenological groups (15 and 16), and a burn interval longer than 4 years can allow for the recovery of woody biomass (10).

2 (1) (Miranda et al., 2010), (2) (Silva, 1999), (3) (Sato, 2003) (4) (Kauffman et al., 1994), (5) (Gorgone-Barbosa
3 et al., 2015), (6) (Castro and Kauffman, 1998), (7) (Ward et al., 1992), (8) (Schmidt et al., 2016b), (9) (Andrade,
4 1998), (10) (Pivello and Coutinho, 1992), (11) (Resende, 2001), (12) (Pivello et al., 2010), (13) (Oliveras et al.,
5 2013), (14) (Silva and Miranda, 1996), (15) (Rissi, 2016), (16) (Durigan and Ratter, 2015).

Tab. I- 4 Studies focusing on fire modeling in the Cerrado published between 1990 and 2017. * Qualitative models.

Variables		Studies	(Pereira, 2002)	(Justino et al., 2011)	(Mélo et al., 2011)	(Koproski et al., 2011)	(Mélo et al., 2012)	(Silva et al., 2016)	(Fernandes, 2003)	(Mistry and Berardi, 2012)	(Almeida, 2012)	(Hoffmann et al., 2012b)	(Pereira et al., 2014)	(Silva, 2016)	(Pivello and Coutinho, Neto, 2005)*	(Riggan et al., 2010)
Input	Microclimate	13	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Fine Fuel Load	6														
	Altitude	4				■						■				
	Firebreak/Highways	3	■			■				■						
	Radiance (Remote Sensing)	1														■
	Burned Area Maps	1											■			
Vegetation	Open Savanna	14	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Savanna	13	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Forest	11								■				■		
Output 1 (fire behavior)	Risk	7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Intensity	7							■	■	■	■	■	■	■	■
	Rate of Spread	6							■	■	■	■	■	■	■	■
	Heat Release	4							■	■	■	■	■	■	■	■
	Flame Height	5							■	■	■	■	■	■	■	■
	Burned Area	4							■	■	■	■	■	■	■	■
	Fire Return Intervals	2							■	■	■	■	■	■	■	■
Output 2 (fire effect)	Vegetation Structure	2												■	■	■
	Carbon Flux	2												■	■	■
	Nutrient Cycling	1												■	■	■

Research challenges and priorities

Despite the substantial contribution of prescribed burn experiments to our knowledge of fire ecology in the Cerrado biome, many gaps remain. To fill these gaps, three major challenges must be addressed (**Fig. I- 3 a**) requiring changes to the 1) predictive scale (from single to multiple predictors), 2) spatial scale (from local to biome level), and 3) temporal scale (from short- to long-term evaluations).

Advancing ecological knowledge of fire in the Cerrado requires shifting from considering a single driver to considering multiple drivers (**Fig. I- 3 a and b**). Because predictive variables for a particular ecological process may interact, evaluating these variables individually can lead to erroneous conclusions. For example, in Australian, topography strongly affects fire behavior (Price et al., 2013). Rate of spread increases in the ascending direction of a slope and increases in the descending direction because of changes in distance between the flames and vegetation (Soares, 1985; Whelan, 1995). However, wind direction can modify these relationships: wind moving opposite to the slope direction decreases the rate of spread, whereas wind direction matching that of the slope increases the rate of spread (Pyne et al., 1996).

Fire also affects climate and plant processes (Beerling and Osborne, 2006), with different effects across vegetation formations (open savanna, savanna and forest) (Hoffmann et al., 2009) and vegetation strata (Munhoz and Amaral, 2010; Sato, 2003). In a single-event fire, tree mortality is low (Sato et al., 2010), but about 90% of the herbaceous stratum biomass is consumed (Kauffman et al., 1994). Because the flammability of an environment is determined by multiple plant and microclimatic factors (Beerling & Osborne, 2006; Hoffmann et al., 2012a), the inclusion of multiple predictors and their interactions can increase the predictive power of fire behavior models and facilitate the development of fire policies that can greatly reduce the impacts of fire on an ecosystem.

Advancing ecological knowledge of fire in the Cerrado also requires long-term evaluations on a biome-level scale (**Fig. I- 3 a**) to obtain information about ecosystem functioning (**Fig. I- 3 c and d**). Often, the fire regime and effects cannot be observed in the short term or after a single burn event. In a study to determine the impacts of different fire regimes on a savanna formation, Sato (2003) observed similar seasonal effects (early, mid, and late dry season) on the loss of tree biomass after a single prescribed burn. However, after five biannual fires, the effects differed according to timing with carbon stock reductions of 26% (1.8 t C/ha) in the early dry season, and 50% and 48% (3.8 and 4.1 t C/ha) in the mid and late dry season, respectively. Changes in species composition and

vegetation structure in response to fire are even more difficult to assess in the short term, because processes such as the invasion of grasses and exotic species, exclusion of fire-sensitive species, and recruitment of new individuals occur over the longer term (Bond, 2008). Thus, to understand the role of fire on vegetation structure and composition, long-term studies on larger spatial scales are needed to determine the time required for a possible floristic and structural recovery of both the fine fuel load and tree and shrub vegetation.

The extent of the Cerrado (2,000,000 km²), floristic and climatic influence of transitions with other biomes, and mosaics of vegetation types across the biome result in high environmental heterogeneity (Ribeiro and Walter, 2008) and different fire dynamics (Pereira, 2002), requiring analyses on a regional scale. Ecological processes such as climate change, land use change, and biodiversity loss also require large-scale studies (Peters et al., 2007; Turner et al., 1995). These studies are facilitated by advanced analytical tools, especially improvements in satellite image processing and spatial analysis for the evaluation of fire activity, deforestation and regrowth, and land use changes (Ferreira et al., 2012) and fire scar mapping (Araújo and Ferreira, 2015; Pereira, 2002).

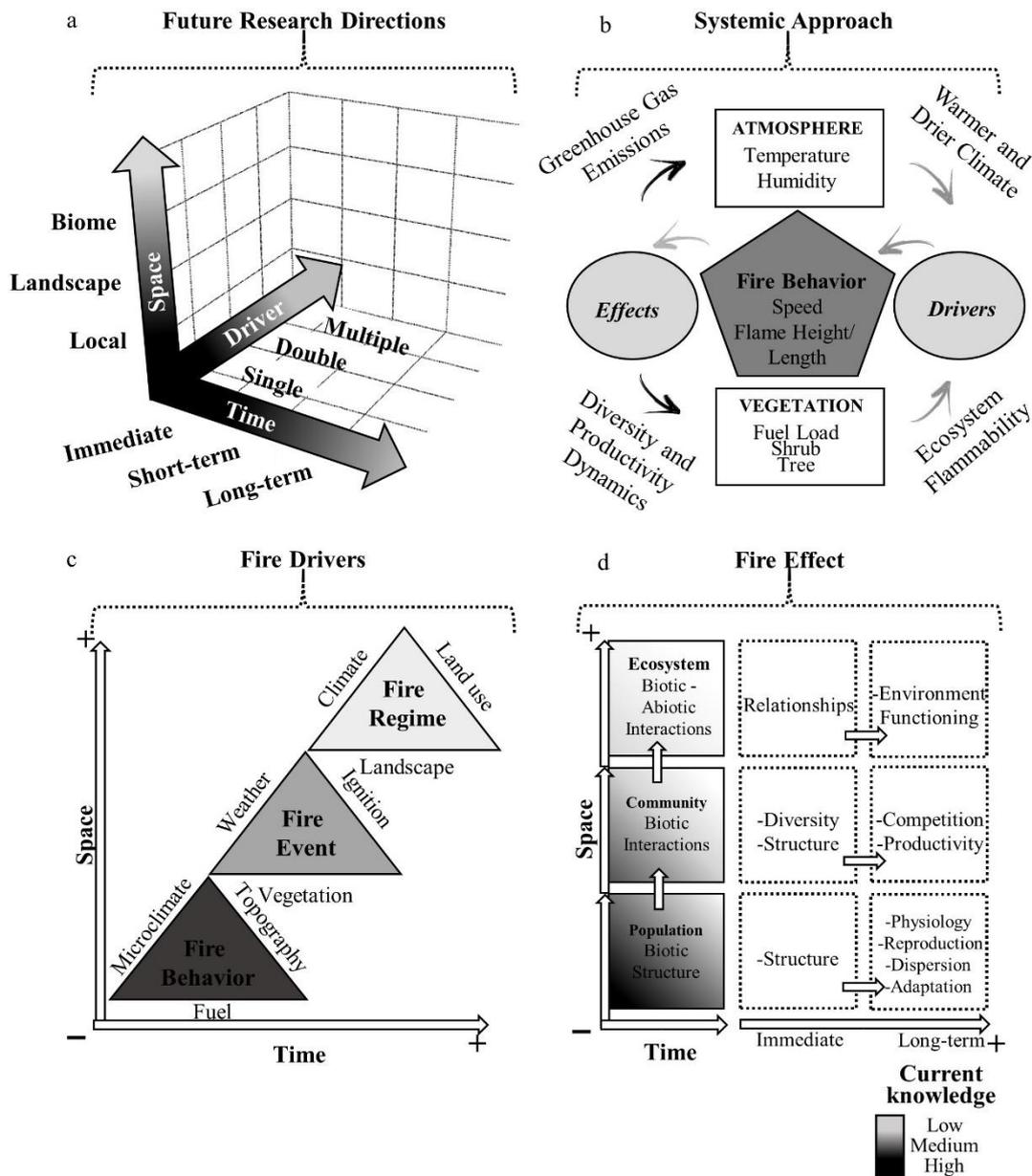


Fig. I- 3 Advancing current knowledge of fire in the Cerrado biome requires (a) addressing challenges related to paradigm shifts around study scales; (b) Systemic and integrative approach linking fire behavior and its effects; (c) fire drivers (adapted from Moritz et al., (2005)); and (d) effects of fire across multiple temporal and spatial scales.

Operational difficulties of combining multiple vectors and ecological processes in long-term studies and single experiments need to be overcome, as these experiments require a high degree of replication and financial support. Therefore, we propose the following priorities and strategies to maximize knowledge and optimize costs: **1)** invest in a greater scientific effort, even if independently, in each of the three paradigms described here (changes in temporal and spatial scales, single versus multiple drivers); **2)** elaborate

interdisciplinary, integrated, and complementary proposals such as field experiments, laboratory experiments, and modeling; **3**) prioritize research and evaluation of ecological processes associated with burning that have major impacts on ecosystem services (e.g., carbon emissions and changes biomass production) or the most sensitive and fire-resilient processes (e.g., mortality of woody plants and grass invasion); **4**) integration of regional and global modeling efforts. The continuation of existing long-term studies could be an opportunity to address these priorities in addition to new sites that can represent different landscape configurations or environmental changes.

Lessons learned on fire management in other countries should also be considered for future research in the Cerrado, especially in protected areas. For example, the Kruger Park in South Africa excels in long-term studies in fire ecology, where prescribed fires have been carried out since 1954 (Van Wilgen et al., 2007, 2004). Currently, the knowledge on fire ecology in this region is advanced, because these studies are long term and consider large spatial scales as well as multiple drivers of fire occurrence (Beale et al., 2013; Van Wilgen et al., 2007). One limitation was that these studies adopted fire regimes with fixed seasons and at fixed return intervals that did not allow the evaluation of temporal and spatial variability of fires (Van Wilgen et al., 2007). Thus, new strategies could help plan the execution of prescribed fires in mosaics with different fire regimes (Beale et al., 2013; Van Wilgen et al., 2007). It is also important to consider the need for an interaction between research and the communities that live close to protected areas (Beale et al., 2013). The role of the indigenous community and their knowledge about fire management has also been highlighted in savannas in Australia (Whitehead et al., 2008) and Venezuela (Mistry et al., 2016).

Conclusion

Advancing ecological knowledge of fire in the Cerrado requires the following changes in the scales of study: predictive scale (from single to multiple drivers), spatial scale (from local to biome level), and temporal scale (from short- to long-term). Immediate advancements can be achieved if future studies focus on at least one of these proposed changes. Interdisciplinary studies and prioritizing research that investigates the most sensitive and fire-resilient processes and those with major impacts on ecosystem services can also contribute to improved understanding of fire ecology. Only then will it be possible to establish better public policies regarding the proper use of fire in the Cerrado to minimize losses and maximize ecological, cultural, and economic gains.



Capítulo 2 - Determinantes do comportamento do fogo e emissões de carbono no Cerrado brasileiro

¹Leticia Gomes, ¹Heloisa S. Miranda, ²Divino V. Silvério, ¹Mercedes M. C. Bustamante

¹Departamento de Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF 70919-900, Brazil; ²Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, Canarana, MT 78640-000, Brazil

Autor para correspondência: leticiagomesbio@gmail.com

Revista pretendida para submissão:
Journal of Applied Ecology (qualis A1)



Resumo

1. Nas últimas décadas, o regime de fogo tem sido alterado pelas mudanças climáticas e de uso da terra, provocando mudanças no funcionamento dos ecossistemas. No Brasil, registrou-se número recorde de focos de queimadas em 2017, e cerca de 75% dessas queimadas ocorreram dentro de unidades de conservação do Cerrado. Apesar desse aumento na ocorrência do fogo, ainda sabemos pouco sobre como o comportamento do fogo é influenciado por cada variável do clima e entre os diferentes tipos de vegetação do Cerrado brasileiro, bem como seus impactos sobre as emissões de carbono.

2. Compilamos informações de estudos com queimadas prescritas no Cerrado para avaliarmos os padrões de comportamento do fogo (velocidade do fogo, intensidade do fogo e calor liberado) e emissões de carbono (combustível fino consumido, fator de combustão e carbono liberado) em diferentes formações vegetais (campestre, savânica e florestal). Também avaliamos a importância relativa dos parâmetros da vegetação (quantidade de combustível fino) e do microclima (temperatura do ar, umidade do ar, déficit de pressão vapor d'água (DPV) e velocidade do vento) em determinar o comportamento do fogo e as emissões de carbono, utilizando modelos lineares generalizados.

3. Os padrões de comportamento do fogo e as emissões de carbono foram diferentes entre os tipos de formação vegetal. As formações campestres e savânicas apresentaram maior velocidade do fogo, intensidade do fogo, calor liberado, consumo de combustível fino, fator de combustão e carbono liberado, em relação às formações florestais.

4. Tanto os parâmetros da vegetação quanto do microclima foram importantes para determinar o comportamento do fogo e as emissões de carbono. Entretanto, o DPV foi o fator mais importante em determinar a velocidade e a intensidade do fogo. Já a quantidade de combustível fino foi o fator mais importante em determinar o calor liberado, consumo de combustível fino, fator de combustão e carbono liberado.

5. *Síntese e aplicação.* Recomendamos o monitoramento da quantidade de combustível fino e do DPV em planos de manejo do fogo, pois essas medidas demonstraram ser essenciais para a predição do comportamento do fogo e seus potenciais impactos sobre as emissões de carbono no Cerrado.

Palavras-chave: Combustível fino, manejo do fogo, microclima, queimada prescrita, velocidade do fogo

Introdução

O fogo é um evento histórico e frequente (Bowman et al., 2009), que desempenha um papel fundamental nos processos e no funcionamento dos ecossistemas globais, influenciando a distribuição e a dinâmica da vegetação (Beerling and Osborne, 2006), os ciclos biogeoquímicos (Bond and Midgley, 2012) e o clima (Bowman et al., 2009; Jin, 2010). Na história recente o regime de fogo tem sido alterado principalmente devido a mudanças de uso da terra e climáticas, como o aumento da temperatura e a intensificação da seca (Enright et al., 2015; Pausas and Keeley, 2009). No Brasil, as queimadas alcançaram número recorde em 2017, com 272 mil focos de queimadas, que representam cerca de 46% a mais em relação ao ano anterior (INPE, 2017). Neste mesmo ano o bioma Cerrado, o segundo maior bioma em extensão na América do Sul e um dos *hotspots* globais de biodiversidade (Mittermeier et al., 2015; Myers et al., 2000), representou aproximadamente 75% do total de focos de queimadas em unidades de conservação, em relação aos outros biomas brasileiros (INPE, 2017).

A ocorrência de fogo em formações vegetais de Cerrado tem sido objeto de debate, constituindo-se em um dos problemas ambientais mais graves que afetam o bioma (Dias and Miranda, 2010; Durigan and Ratter, 2015). O Cerrado, por ter uma alta heterogeneidade vegetal, devido à presença de formações campestres, savânicas e florestais (Ribeiro and Walter, 2008) e alta sazonalidade climática (Silva et al., 2008), necessita de medidas de manejo de fogo específicas a cada tipo de ambiente. O uso descontrolado e frequente do fogo, principalmente durante a estação seca, tem ameaçado a recuperação das formações campestres (Medeiros and Miranda, 2005), savânicas (Sato, 2003) e florestais (Brando et al., 2014) e aumentado as emissões de gases do efeito estufa (Bustamante et al., 2012). Por outro lado, a exclusão do fogo tem ameaçado a conservação das formações campestres e savânicas (Durigan and Ratter, 2015), pois o fogo foi evolutivamente um fator seletivo importante para a manutenção da estrutura da vegetação, biodiversidade e funcionamento desses ecossistemas (Simon and Pennington, 2012). Portanto, medidas de uso do fogo baseadas em evidências robustas devem ser adotadas com urgência, seja para o manejo, prevenção ou combate ao fogo (Durigan and Ratter, 2015; Medeiros and Fiedler, 2011).

O atual Código Florestal brasileiro (Lei número 12651, de 2012) permite o uso do fogo em unidades de conservação do Cerrado, desde de que as características ecológicas da vegetação estejam associadas evolutivamente à ocorrência do fogo e mediante a aprovação prévia do órgão gestor da unidade de conservação (Artigo 38). Assim, Programas de

Manejo Integrado do Fogo vêm sendo implementados em algumas unidades de conservação do Cerrado desde 2014, visando conservar a biodiversidade e manter os processos ecológicos dos ecossistemas adaptados ao fogo através da realização de queimadas prescritas (Schmidt et al., 2016b, 2016c). Porém, esses programas são recentes e muitas incertezas ainda estão associadas às decisões de manejo (Schmidt et al., 2016b).

Uma forma de melhorar essas decisões de manejo é determinar quais são os principais fatores da vegetação e do microclima que podem ser utilizados para prever o comportamento do fogo. Estudos têm destacado a importância de ambos, vegetação e microclima, em determinar o comportamento do fogo (Price et al., 2013; Whitlock et al., 2003). Em termos de importância relativa estudos, em savanas africanas, têm considerado a presença de gramíneas como o principal determinante do comportamento do fogo (Bond et al., 2003; Price et al., 2013). Já em florestas amazônicas, onde as gramíneas são praticamente ausentes, o microclima tem se destacado (Ray et al., 2005; Uhl and Kauffman, 2012). Entretanto, essas relações de importância podem variar para cada bioma (Archibald et al., 2009; McKenzie and Kennedy, 2012) e não se tem até o momento estudos no Cerrado que quantifiquem a importância relativa dos fatores da vegetação e do microclima em determinar o comportamento do fogo.

Queimadas prescritas⁵ vêm sendo realizadas em diferentes formações vegetais ao longo do bioma Cerrado (Castro and Kauffman, 1998; Miranda et al., 2010; Sato et al., 2010). Esses experimentos têm contribuído substancialmente para a caracterização das queimadas em diferentes formações vegetais com características estruturais e microclimáticas distintas. Entretanto, tais estudos consideram, geralmente, apenas um tipo de formação vegetal e medidas únicas de microclima no momento da queimada (Gomes et al., 2018a), pois dificilmente experimentos de campo são capazes de considerar todas as variações em escala de paisagem em um único experimento. Adicionalmente, os custos e a burocracia para se obter permissão para queimadas prescritas são também limitantes importantes. Assim, a determinação dos padrões gerais e limiares ecológicos do comportamento e efeito do fogo ao longo dessas variações ambientais, bem como a definição dos principais determinantes desses processos de forma conjunta permanecem como lacunas significativas de conhecimento para o manejo dos ecossistemas.

Os modelos matemáticos são uma das ferramentas que permitem sintetizar e unificar as informações já disponibilizadas pelos diferentes estudos com queimadas prescritas

⁵ Queimadas controladas com objetivos pré-definidos, visando o manejo e a conservação da vegetação (Whelan, 1995).

existentes e assim realizar predições (Alexander and Cruz, 2012). Os modelos podem ser utilizados para selecionar principais preditores, prever o comportamento do fogo e os potenciais impactos das queimadas sobre o ambiente (Rothermel and Deeming, 1980; White, 2014). Entretanto, devido à ausência de modelos preditivos tanto de comportamento quanto de efeito do fogo (Gomes et al., 2018a), estudos de modelagem do fogo no bioma Cerrado são raros e precisam ser aprimorados. Além disso, as formações vegetais do Cerrado são muito distintas em termos estruturais, florísticos (Ribeiro and Walter, 2008) e microclimáticos (Hoffmann et al., 2012b). Portanto, requerem modelos específicos para cada tipo de ambiente e que considerem múltiplas variáveis preditoras.

Neste contexto, nós compilamos os resultados obtidos a partir de diferentes experimentos com queimadas prescritas realizadas em formações campestres, savânicas e florestais no bioma Cerrado, objetivando: 1) determinar, para cada tipo de formação vegetal, os padrões de comportamento do fogo (velocidade do fogo, intensidade do fogo e calor liberado) e emissões de carbono resultantes (combustível fino consumido, fator de combustão e carbono liberado); 2) quantificar a importância das características da vegetação (quantidade de combustível fino) e do microclima (temperatura do ar, umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor d'água e velocidade do vento) em determinar o comportamento do fogo e as emissões de carbono; e 3) selecionar os melhores modelos para prever o comportamento do fogo e as emissões de carbono resultantes. Testamos a hipótese que a importância relativa da vegetação e do microclima na determinação do comportamento e das emissões de carbono varia com o tipo de formação vegetal. Esperamos que em formações abertas a quantidade de combustível fino seja o fator mais importante, enquanto que em formações florestais esperamos que o déficit de pressão de vapor d'água seja o fator mais importante. As relações previstas entre as variáveis preditoras e resposta foram representadas na **Fig. II- 1**.

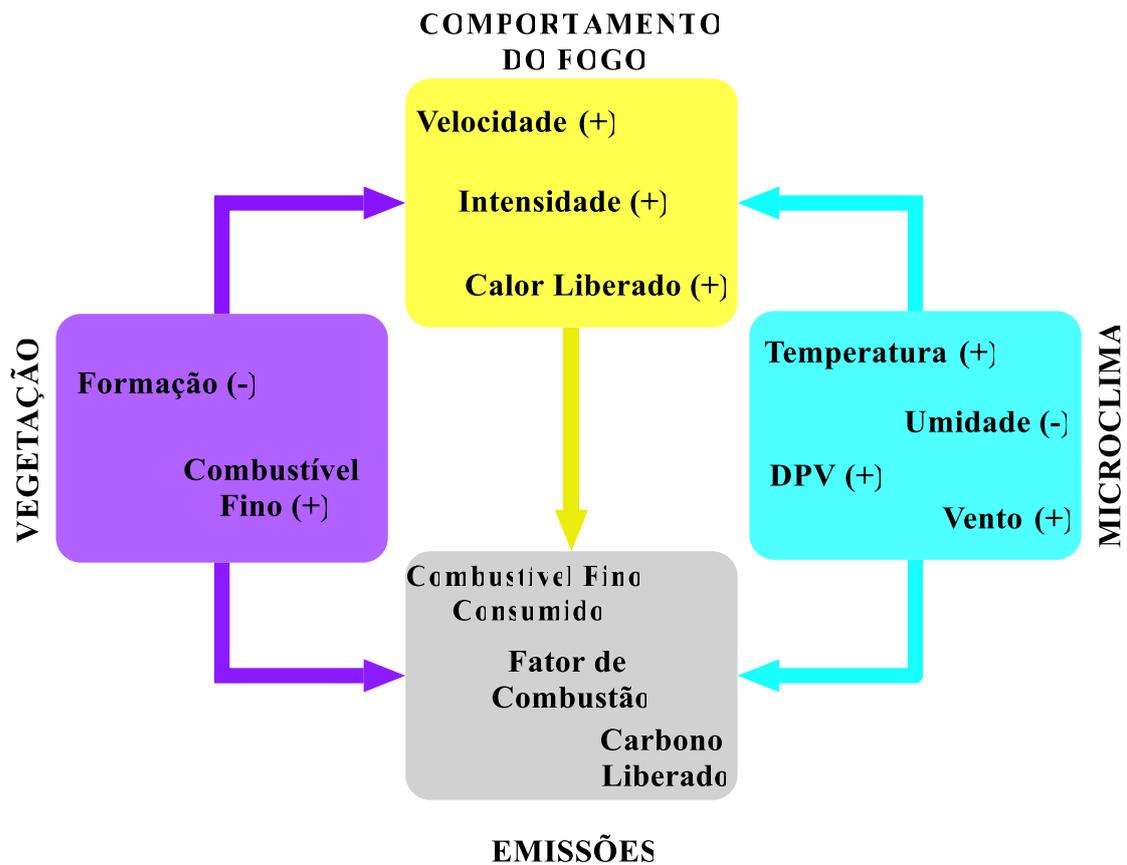


Fig. II- 1 Relações entre as variáveis predictoras e resposta do comportamento do fogo e emissões resultantes no bioma Cerrado. Sinais (+) representam relações positivas e (-) relações negativas entre as caixas. Vegetação (■): Formação = gradiente categórico crescente de cobertura arbórea (campestre, savânica e florestal) e Combustível Fino = quantidade de material combustível fino disponível para a queima (kg/m^2). Microclima (■): Temperatura = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), Umidade = umidade relativa do ar (%), DPV = déficit de pressão de vapor d'água (kPa) e Vento = velocidade do vento (m/s). Comportamento do fogo (■): Velocidade = velocidade de propagação do fogo (m/s), Intensidade = intensidade da frente de fogo ($\text{kJ}/(\text{ms})$) e Calor Liberado = calor liberado por unidade de área (kJ/m^2). Efeito do fogo sobre as emissões (■): Combustível Fino Consumido = quantidade de material combustível fino consumido (kg/m^2), Fator de Combustão = fração de biomassa consumida (%) e Carbono Liberado = quantidade de carbono liberado (kg/m^2).

Material e Métodos

Construção do banco de dados

Construímos o banco de dados a partir de uma extensiva revisão de literatura abrangendo trabalhos publicados entre 1994 e 2016. A pesquisa da literatura disponível foi realizada nas seguintes plataformas de pesquisa: Web of Science, Science Direct, Google Scholar e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. Usamos as seguintes palavras-chave: (queimada prescrita* OR fogo* OR queimada) AND (comportamento * OR efeito * OR manejo* OR regime* OR dinâmica* OR Emissões), tanto em inglês quanto em português. As variáveis de comportamento e efeito de fogo foram obtidas a partir de 65 parcelas com queimadas prescritas, distribuídas em seis regiões ao longo do bioma Cerrado (Distrito Federal, Goiás, Maranhão, Tocantins, Bahia e Mato Grosso) (**Fig. II- 2; Tab. II- 1**), entre os meses de abril e setembro, período que corresponde a estação seca do bioma (Silva et al., 2008). Todas as variáveis de relações de comportamento e efeito do fogo e seus determinantes foram estabelecidas para cada tipo de formação vegetal (campestre [parcelas = 36], savânica [parcelas = 19] e florestal [parcelas = 10]) definidas de acordo a classificação de Ribeiro & Walter (2008). Devido à falta de experimentos com queimada em formações florestais no bioma Cerrado, consideramos uma floresta estacional semidecidual localizada na transição entre os biomas Cerrado - Amazônia (Balch et al., 2008).

Consideramos a quantidade de combustível fino disponível para a queima (kg/m^2) nas diferentes formações vegetais (campestre, savânica e florestal) para representar os parâmetros da vegetação. Consideramos como combustível fino disponível para queima, todo o material vivo ou morto acumulado na superfície do solo, representado por gramíneas, folhas e ramos finos com até 0.6 cm de diâmetro até a altura de 2 m (Luke and McArthur, 1978). Sendo essa altura de 2 m, justificada pela baixa eficiência de consumo do combustível fino dos estratos arbóreo-arbustivos até essa altura (Krug et al., 2002). Os impactos sobre a vegetação lenhosa arbórea não foram avaliados devido ao reduzido número de estudos relacionando comportamento do fogo aos seus efeitos sobre esse estrato (Gomes et al., 2018a). Em alguns dos estudos aqui compilados o material combustível foi classificado de acordo com o intervalo de tempo ou “*time lag*”, que se refere ao período de tempo necessário para o combustível responder a um novo equilíbrio do conteúdo de umidade (Kauffman et al., 1994). As categorias “*time lag*” usadas para o comportamento do fogo são especificadas como [1], [10], [100], e [1000 horas], e correspondem as faixas

de diâmetro de [0-0,64], [0,64-2,54], [2,54-7,62] e [7,62-20,32 cm], respectivamente. Assim para a padronização das metodologias e possível comparação entre as amostras selecionamos a primeira classe de diâmetro [0-0,64 cm] ou o “*time lag*” de [1 hora], para os quais foram somados a quantidade de gramíneas e folhas vivas ou mortas.

Consideramos como parâmetros do microclima: 1) a temperatura média do ar (C°), 2) a umidade relativa do ar (%), 3) o déficit de pressão de vapor d'água - DPV (kPa) e 4) a velocidade do vento (m/s)). Como comportamento do fogo consideramos: 1) a velocidade com que o fogo se propaga (m/s), 2) a intensidade da frente de fogo (kJ/(ms)) e 3) o calor liberado por unidade de área (kJ/m²). Como variáveis de emissões consideramos: 1) o consumo de material combustível (kg/m²), 2) o fator de combustão = fração de biomassa consumida (%) e 3) a quantidade de carbono liberado (kg/m²) no momento da queimada (**Fig. II- 1**).

Calculamos a intensidade da frente do fogo por meio da equação proposta por Byram (1959), utilizando o calor efetivo de combustão de 15500 (kJ/ms) para formações campestres e savânicas e 20000 (kJ/(ms)) para formações florestais como sugerido por Griffin et al. (1984). O calor liberado foi calculado de acordo com a equação proposta por Luke & McArthur (1978) e Rothermel & Deeming (1980). A quantidade de carbono emitida foi calculada de acordo com as proporções sugeridas pelo IPCC (2002), dado a partir da quantidade de combustível fino consumido no momento da queima . O déficit de pressão de vapor d'água (DPV) foi calculado de acordo com Allen et al. (1998). Descrevemos todas essas equações na **Tab. II- 2**.

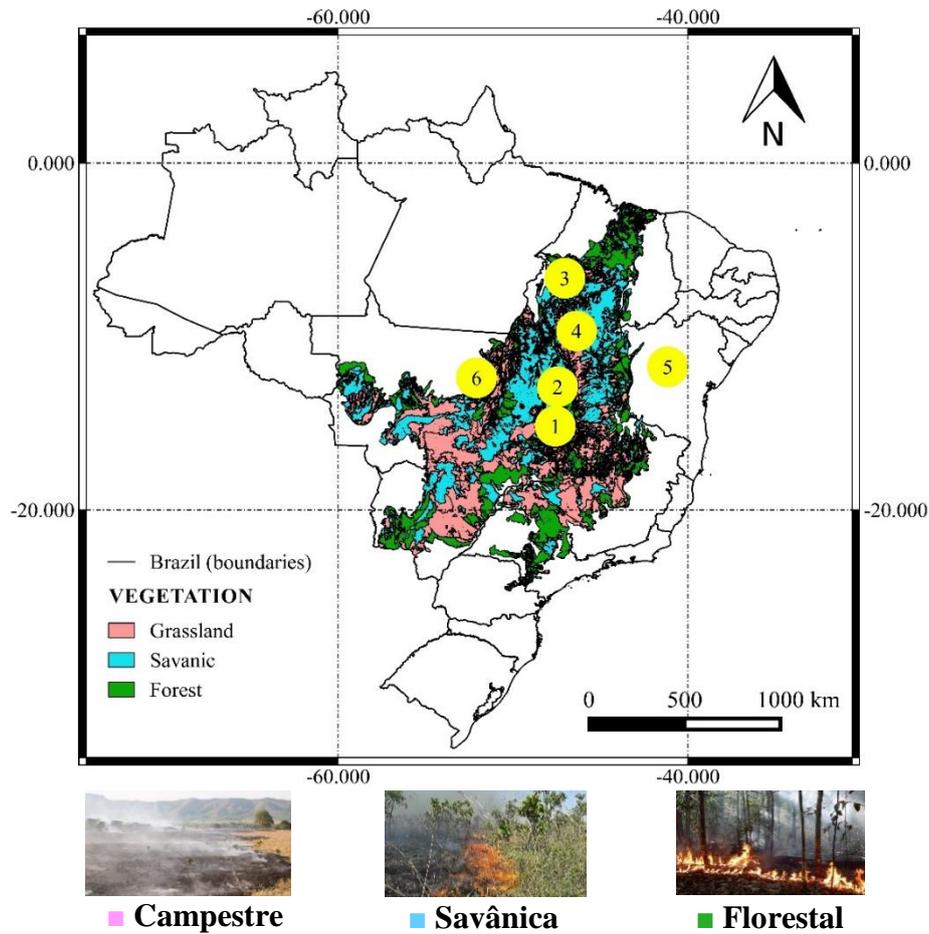


Fig. II- 2 Mapa da vegetação pretérita do bioma Cerrado (Fonte: Third National Inventory (Brazil, 2016), modificado de PROBIO I (MMA) e TM/Landsat-5 imagens) e localização das queimadas prescritas realizadas no bioma Cerrado entre os anos de 1990-2016. Referência dos números estão descritos na [Tab. II- 1](#).

Tab. II- 1 Localização e número de queimadas prescritas (n) realizadas no bioma Cerrado entre os anos de 1990-2016. FV= Formação vegetal
C= formação campestre, S= savânica, F= florestal, n = número de parcelas.

Local	FV	n	Lat. (S)	Long. (W)	Referência
1. Reserva Ecológica do IBGE, DF	C	13	15°51'	47°53'	(Castro-Neves, 2000; Castro and Kauffman, 1998; Kauffman et al., 1994; Medeiros, 2002; Miranda et al., 1996; Pivello, 2011; Sato, 2003, 1996; Silva, 1999)
	S	11			
	F	0			
2. Reserva Natural Serra do Tombador, GO	C	6	13°35'	47°45'	(Gorgone-Barbosa et al., 2015; Rissi, 2016)
	S	0			
	F	0			
3. Parque Nacional Chapada das Mesas, MA	C	0	7°19'	47°20'	(Schmidt et al., 2016b)
	S	8			
	F	0			
4. Parque Estadual do Jalapão, TO	C	16	10°22'	46°40'	(Schmidt et al., 2016a, 2016b)
	S	0			
	F	0			
5. Serra do Sincorá, BA	C	1	12°26'	41°27'	(Conceição and Pivello, 2011)
	S	0			
	F	0			
6. Fazenda Tanguro, MT	C	0	13°04'	52°23'	(Balch et al., 2008; Brando et al., 2014)
	S	0			
	F	10			
Total		65			

Tab. II- 2 Equações utilizadas para a determinação da intensidade da frente do fogo, calor liberado, déficit de pressão vapor d'água e emissão de carbono.

Parâmetros	Equação	Abreviação	Referência
Intensidade da frente de fogo (kJ/(ms))	$I = h \times w \times r$	h = calor efetivo da combustão (kJ/(ms)) w = combustível fino consumido (kg/m ²) r = velocidade do fogo (m/s)	(George M Byram, 1959)
Calor liberado (kJ/m ²)	$H = I/r$	I = intensidade da frente de fogo (kJ/(ms)) r = velocidade do fogo (m/s)	(Rothermel and Deeming, 1980)
Déficit de pressão de vapor d'água (kPa)	$VPS = 610.7 \times 10^{7.5T / (237.3+T)}$ $DPV = \{[1 - (UR/100)] \times VPS$	VPS= vapor de pressão saturado T = temperatura média do ar (°C) UR= umidade relativa do ar (%)	(Allen et al., 1998)
Emissão de Carbono (kg/m ²)	$C_e = [(FBVC \times FBVO) \times FCBV] + [(FBMC \times FBMO) \times FCBM]$	FBVC = fração de biomassa viva consumida FBVO = fração de biomassa viva oxidada ⁶ FCBV = fração de carbono na biomassa viva FBMC = fração de biomassa morta consumida FBMO = fração de biomassa morta oxidada FCBM = fração de carbono na biomassa morta	(Krug et al., 2002)

⁶ Biomassa oxidada = proporção de biomassa que efetivamente reage para produzir gases durante o processo de combustão (Carvalho et al., 1995)

Análise dos dados

Exploramos inicialmente as possíveis diferenças entre os parâmetros de comportamento e efeito do fogo sobre as emissões de carbono em cada tipo de formação vegetal a partir do teste ANOVA 1-fator (Gotelli and Ellison, 2011). Verificamos os pressupostos dessas análises testando a homogeneidade das variâncias (teste de Levene) e a distribuição normal pela avaliação dos resíduos (teste Shapiro-Wilk). Nos casos onde os pressupostos não foram atendidos os valores foram logaritmizados. Também testamos, de forma independente, as possíveis correlações entre os parâmetros de comportamento e efeito do fogo sobre as emissões de carbono em função de cada preditor associado à vegetação e ao microclima utilizando regressões lineares simples, e em casos onde os pressupostos da análise (homogeneidade e normalidade) não foram cumpridos realizamos correlações de Spearman (não-paramétrico) (Gotelli and Ellison, 2011). Para a realização dessas análises utilizamos as funções “*aov*”, “*lm*” e “*cor*” do pacote “*stats*” do programa R (R Core Team, 2017).

Construímos 24 modelos lineares generalizados (GLMs) para avaliar o comportamento e as emissões de carbono em função de variáveis do clima, das condições de combustível disponível e do tipo de vegetação estudada. Para cada tipo de formação vegetal (campestre, savânica e florestal) elaboramos um modelo para cada parâmetro de comportamento do fogo (velocidade do fogo, intensidade fogo e calor liberado), das emissões (combustível fino consumido, fator de combustão e carbono liberado) (**Fig. I- 1**). Ao todo realizamos 24 modelos. As variáveis preditoras consideradas nos modelos de comportamento de fogo foram: temperatura do ar, umidade do ar, DPV, velocidade do vento, combustível fino, tipo de formação vegetal e cinco das interações possíveis (entre o tipo de formação vegetal e cada uma das outras cinco variáveis). Para os modelos de emissões de carbono as variáveis preditoras consideradas foram: combustível fino, formação vegetal, temperatura do ar, umidade do ar, DPV, velocidade do vento, velocidade do fogo, intensidade do fogo, calor liberado e oito das interações possíveis (entre o tipo de formação vegetal e cada uma das outras oito variáveis).

Verificamos a multicolinearidade entre as variáveis explicativas, pela função “*vif*” do pacote “*car*” (Dormann et al., 2013; Draper and Smith, 1998). Neste caso, as variáveis de temperatura e umidade do ar não foram consideradas no modelo global pois apresentaram alta colinearidade, e então estas foram representadas pelo DPV.

Assumimos os pressupostos da análise testando a homogeneidade das variâncias e a distribuição normal dos resíduos do modelo final, e quando necessário foi aplicada a transformação logarítmica para dados contínuos e transformação inversa logit para dados de porcentagem (Burnham and Anderson, 2002). Utilizamos o Critério de Informação de Akaike corrigido para pequenas amostras (AICc) para selecionarmos os modelos, segundo o qual valores de $\Delta AICc < 2$ indicam a igualdade entre os modelos. Entre esses, selecionamos o melhor modelo considerando o maior peso Akaike (wAICc), que representa a probabilidade desse conjunto de variáveis ser o melhor (Burnham and Anderson, 2002). Determinamos a importância relativa de cada variável preditora selecionada para o modelo global, obtida a partir da soma dos pesos de Akaike (w), utilizando a função “*importance*” por meio dos pacotes “*glmulti*” e “*MuMin*” do R (R Core Team, 2017).

Resultados

Padrões de comportamento do fogo e emissões de carbono

Os parâmetros resposta do comportamento do fogo e emissões de carbono foram diferentes entre as formações vegetais (**Tab. II- 3**). A velocidade do fogo foi maior em formações abertas (0.25 m/s) em relação as formações florestais (0.01 m/s), bem como a intensidade do fogo (2208 > 21 kJ/(ms)), o calor liberado (9103 > 3828 kJ/m²), o combustível fino consumido (0.59 > 0.15 kg/m²), o fator de combustão (86 > 39 %) e o carbono liberado (0.22 > 0.05 kg/m²), respectivamente.

O padrões de correlação entre os parâmetros resposta de comportamento do fogo e emissões em função dos parâmetros da vegetação e do microclima variam de acordo com o tipo de formação vegetal considerada (campestre (C), savânica (S) e florestal (F)) e com o tipo de parâmetro resposta avaliado. Em relação aos parâmetros resposta de comportamento do fogo, a velocidade do fogo foi correlacionada negativamente com a umidade do ar (para as formações C, S e F) e positivamente com a temperatura do ar (para S e F), DPV (para C, S e F) e velocidade do vento (em C) (**Fig. II- 3**). A intensidade do fogo foi correlacionada negativamente com a umidade do ar (para C e S) e positivamente com o DPV (para C e S), velocidade do vento (para C e S) e combustível fino (para S e F) (**Fig. II- 4**). Já o calor liberado foi correlacionado positivamente com o combustível fino (para C e S) (**Fig. II- 5**).

Para os parâmetros de emissões, o combustível fino consumido foi correlacionado negativamente com a umidade do ar (para formação S) e negativamente com o combustível fino disponível (para C e S), intensidade do fogo (para S e F) e calor liberado (para C, S e F) (**Fig. II- 6**). O fator de combustão foi correlacionado positivamente com a intensidade do fogo (para S e F) e calor liberado (para C, S e F) (**Fig. II- 7**). Por último, a quantidade de carbono liberado foi correlacionada positivamente com a umidade do ar (para C e S), combustível fino (para C e S), intensidade completar (para S e F) e calor liberado (para C, S e F) (**Fig. II- 8**).

Tab. II- 3 Variáveis respostas de comportamento e efeito do fogo sobre as emissões de carbono entre as formações campestres, savânicas e florestais do bioma Cerrado. Asteriscos (*) representam diferenças entre as formações pelo teste ANOVA (1 fator) e letras diferentes representam diferenças pelo teste *post hoc* de Tukey, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Variáveis Resposta	Média (Desvio Padrão)			df	F	P
	Campestre	Savânica	Florestal			
Comportamento do Fogo						
Velocidade do Fogo (m/s)	0.25 (0.30) ^A	0.24 (0.14) ^A	0.01 (0.00) ^B	2	65.69	< 0.01*
Intensidade do Fogo (kJ/(ms))	2215 (1358) ^A	2201 (3065) ^A	21 (22) ^B	2	98.18	< 0.01*
Calor Liberado (kJ/m ²)	9192 (3065) ^A	9013 (3258) ^A	3028 (1591) ^B	2	18.01	< 0.01*
Emissões de Carbono						
Combustível Fino Consumido (kg/m ²)	0.59 (0.20) ^A	0.58 (0.21) ^A	0.15 (0.09) ^B	2	54.07	< 0.01*
Fator de Combustão (%)	87 (11) ^A	86 (10) ^A	39 (18) ^B	2	67.22	< 0.01*
Carbono Liberado (kg/m ²)	0.23 (0.08) ^A	0.21 (0.07) ^A	0.05 (0.03) ^B	2	62.00	< 0.01*

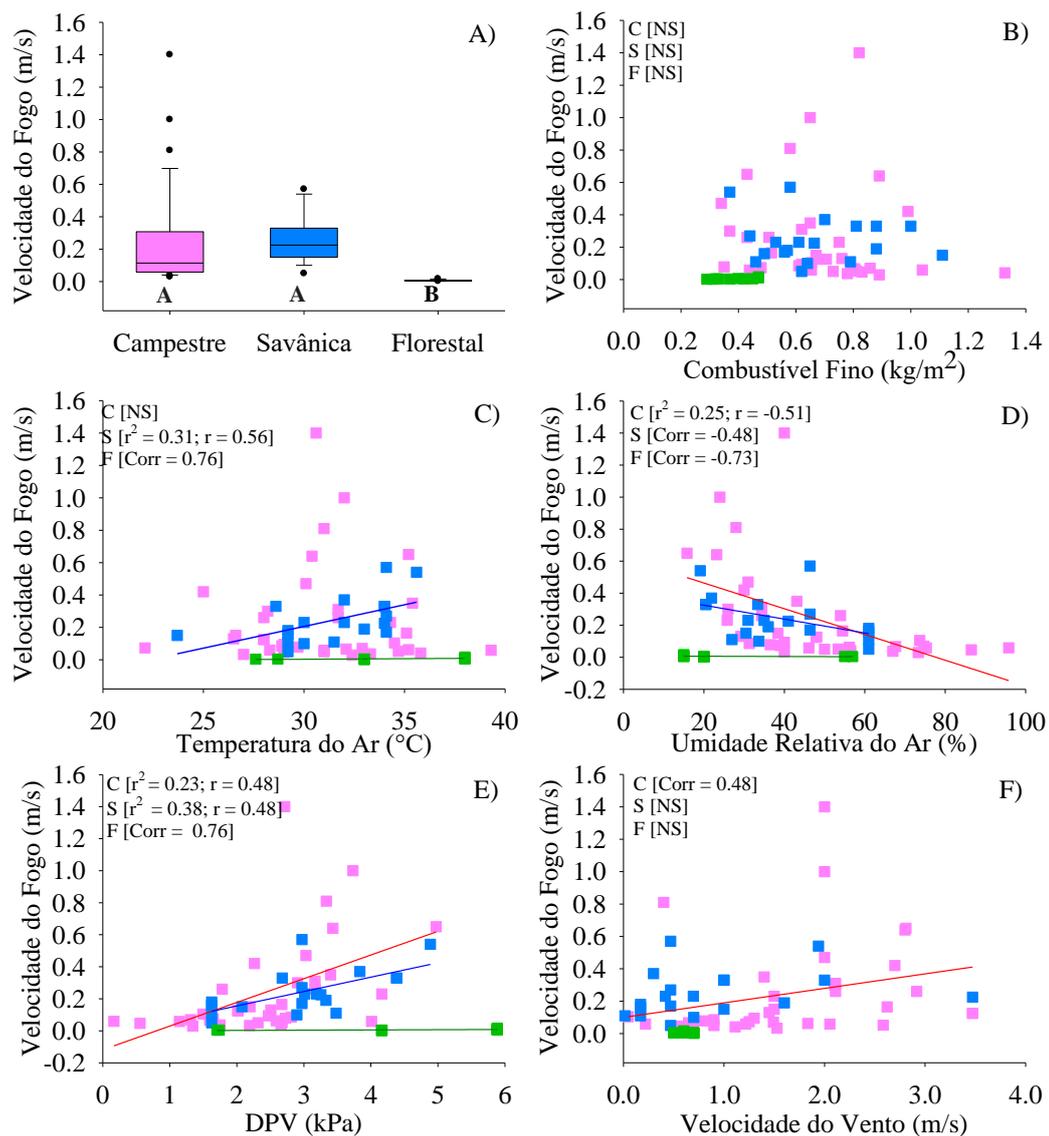


Fig. II- 3 Velocidade do fogo em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr= Correlação de Spearman, NS = não significativo.

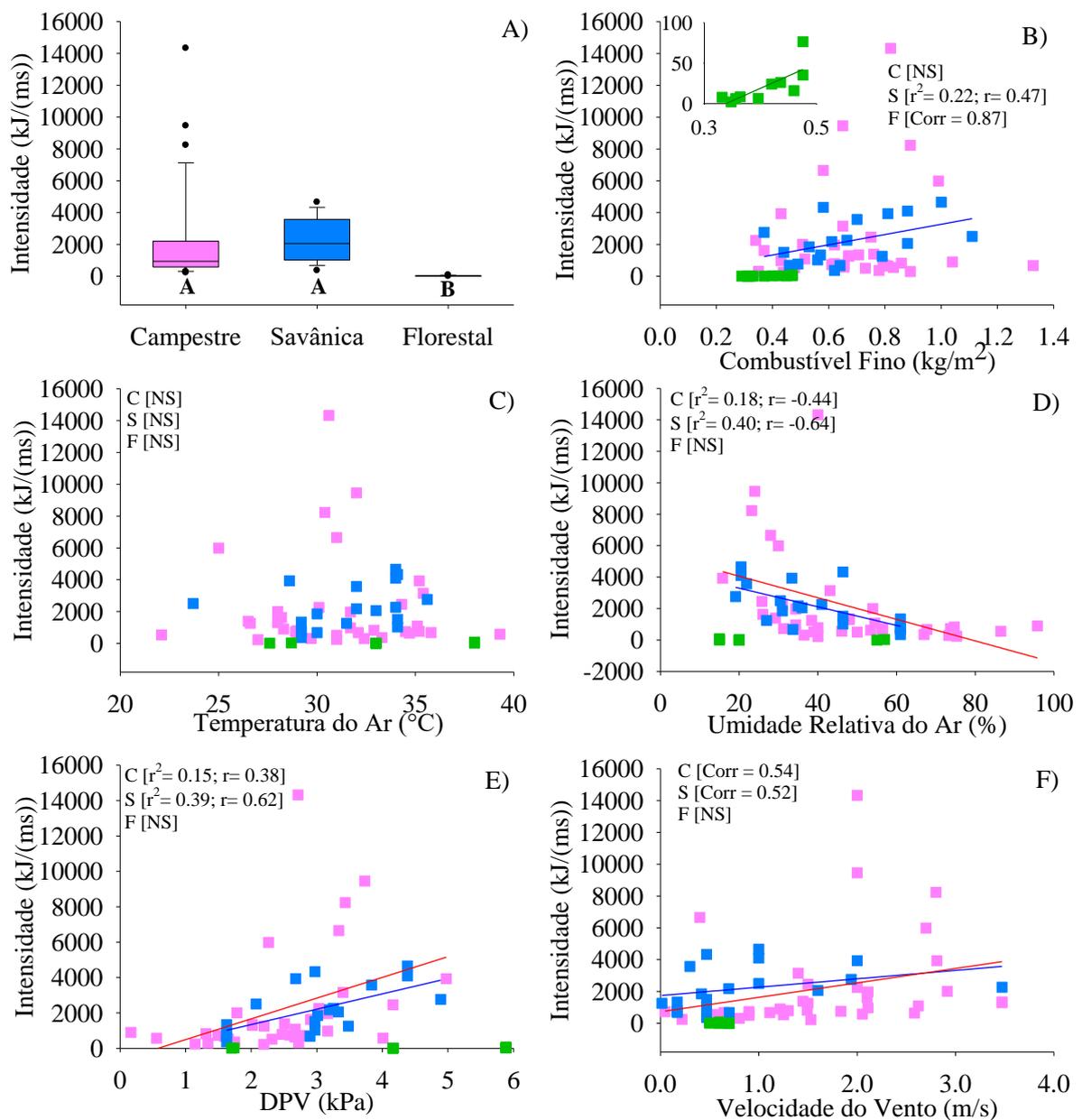


Fig. II- 4 Intensidade do fogo em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo.

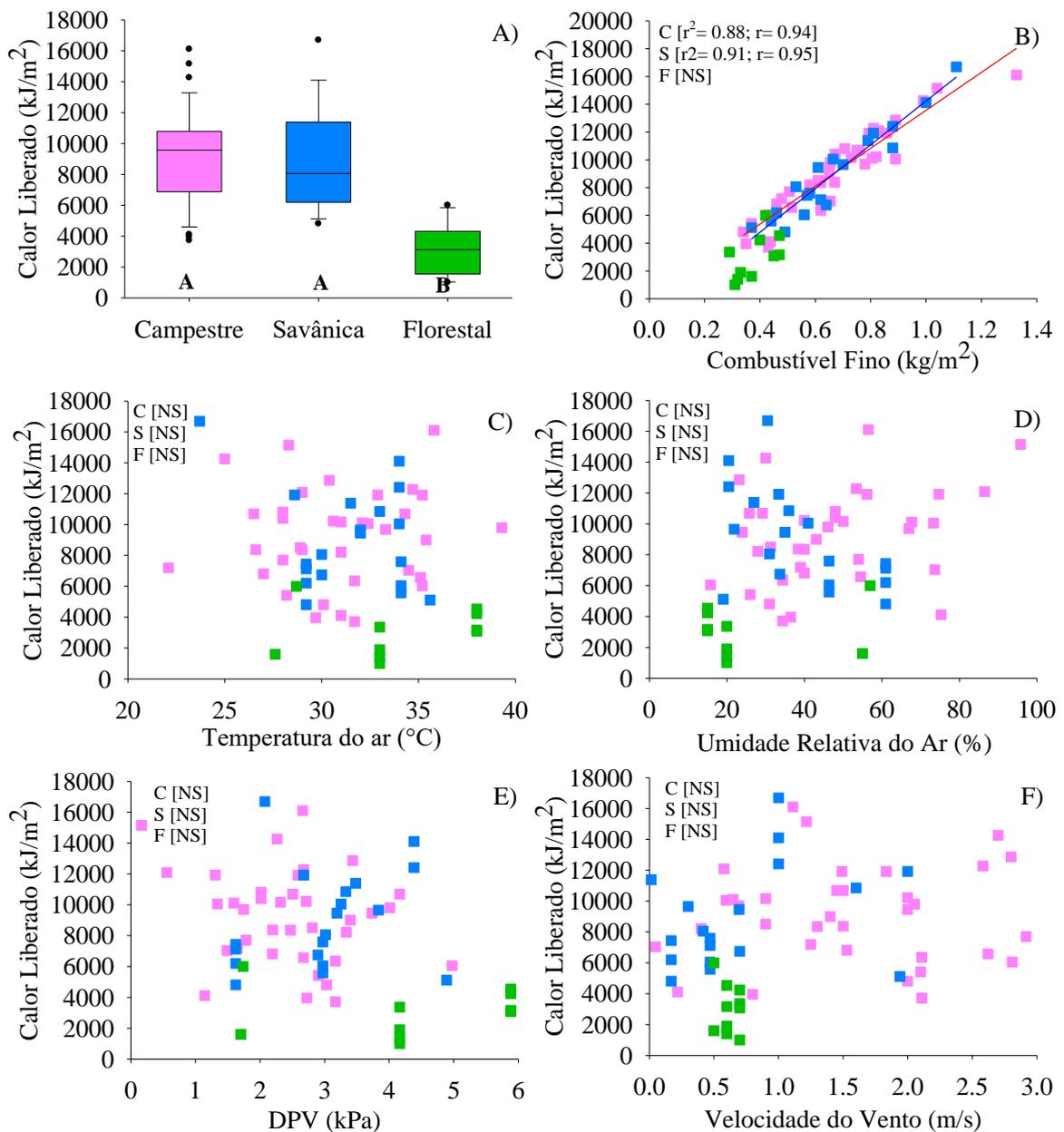


Fig. II- 5 Calor liberado em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo.

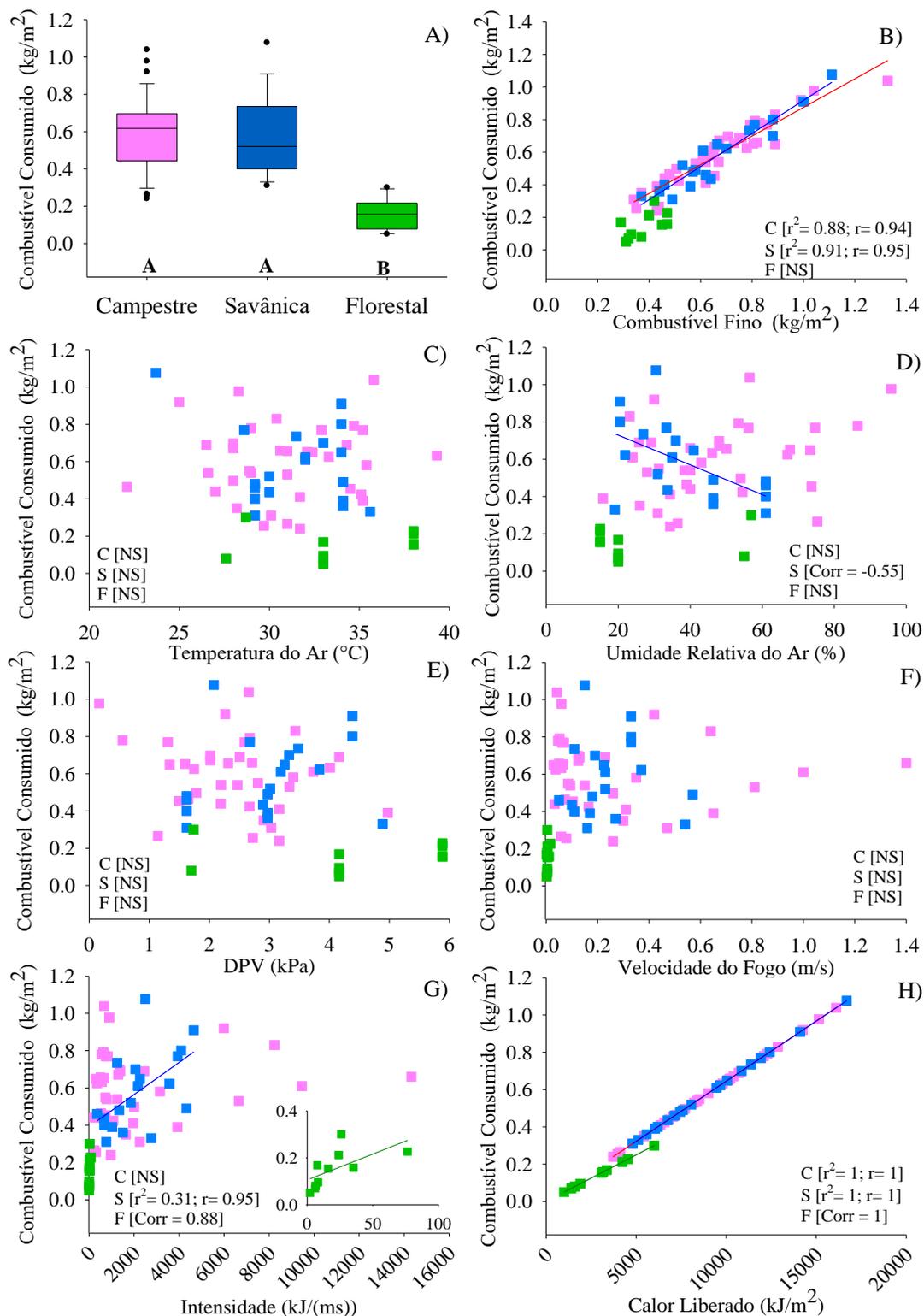


Fig. II- 6 Combustível fino consumido em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo.

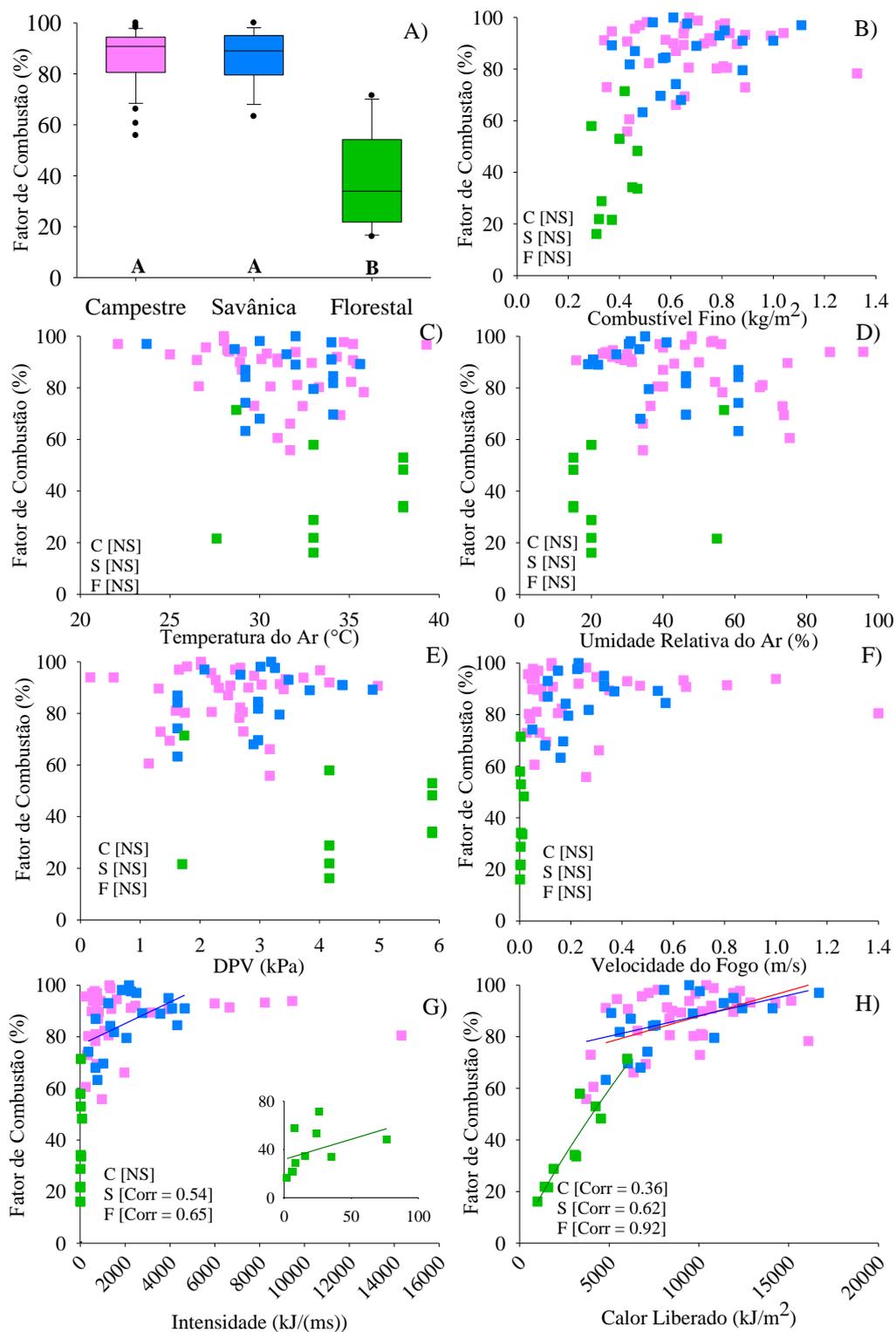


Fig. II- 7 Fator de combustão em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Cor r = Correlação de Spearman, NS = não significativo.

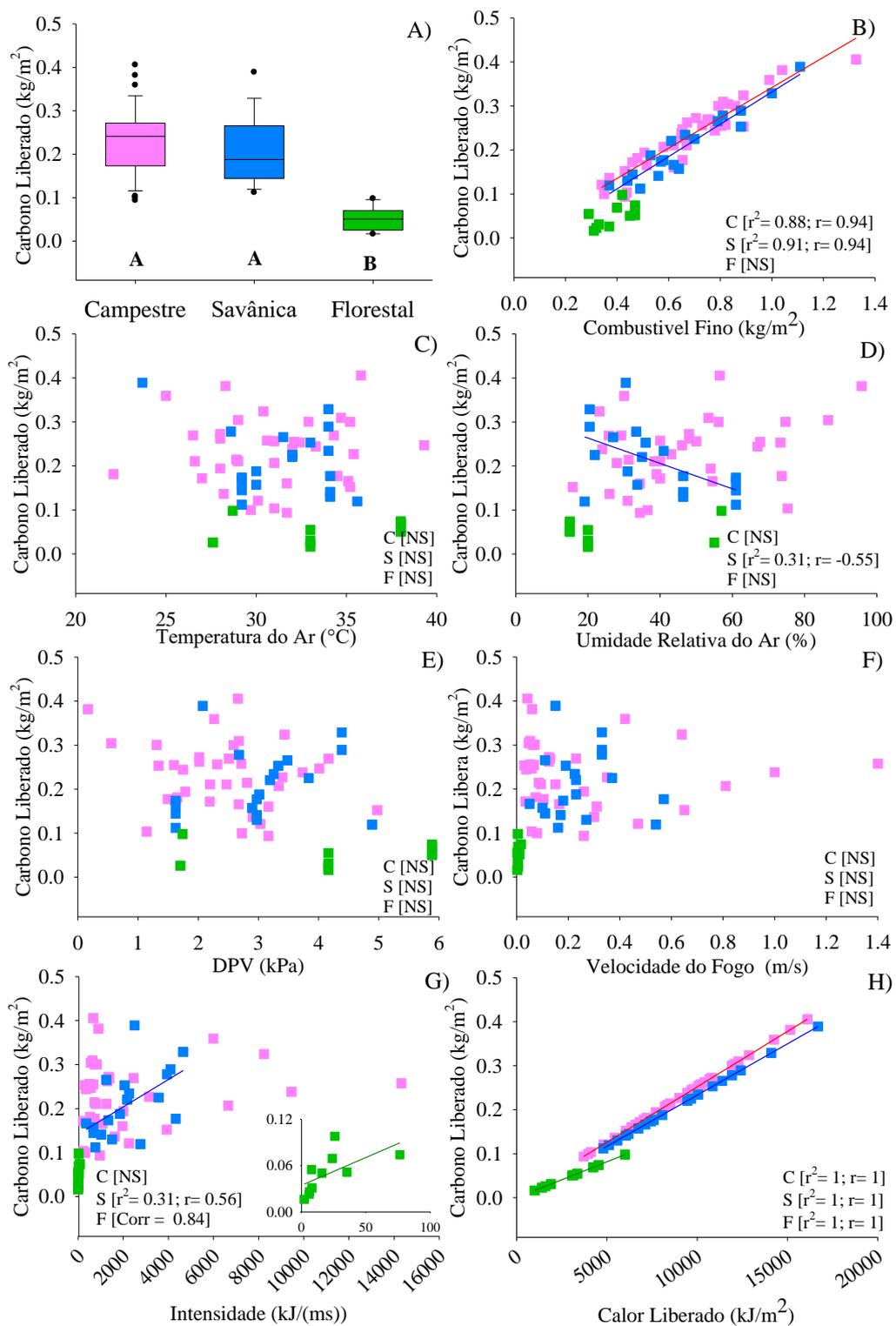


Fig. II- 8 Carbono liberado em função de seus determinantes em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado. Letras diferentes na figura “A” representam diferenças estatísticas ($p < 0.05$) pelo teste *post hoc* de Tukey antecipado por ANOVA (1 fator). As retas representam relações lineares significativas ($p < 0.05$). R^2 = coeficiente de determinação, r = Coeficiente de Correlação, Corr = Correlação de Spearman, NS = não significativo.

Comportamento do fogo e emissões de carbono: seleção de modelos

O resultado da seleção de modelos para avaliar a combinação de variáveis do microclima e da vegetação que melhor explicam o comportamento do fogo e emissões de carbono estão apresentados na **Tab. II- 4, Fig. S II- 1 e 2**. Para velocidade do fogo as variáveis que mais contribuíram para o ajuste do modelo foram: formação vegetal, DPV e velocidade do vento; para intensidade do fogo foram: formação vegetal, combustível fino, DPV e velocidade do vento. O tipo de formação vegetal e o DPV foram as variáveis mais importantes (>0.9) em explicar tanto a velocidade quanto a intensidade do fogo. Para o calor liberado o melhor modelo incluiu: formação vegetal, combustível fino e velocidade do vento, sendo que essas variáveis também foram as mais importantes (>0.9) (**Fig. II- 9 a e b**). Enquanto que o melhor modelo para o calor liberado foi obtido pela combinação: formação vegetal, combustível fino, velocidade do vento, sendo que essas variáveis também foram as mais importantes (>0.9) (**Fig. II- 9 c**). O melhor modelo para prever o combustível consumido e o carbono liberado se deu a partir da combinação: formação vegetal, combustível fino, sendo essas variáveis também as mais importantes (>0.9) (**Fig. II- 9 a e c**). Já o fator de combustão foi previsto de uma única variável: formação vegetal (**Fig. II- 9 b**). As equações geradas por essa seleção de modelos, para cada tipo de formações vegetal, estão descritas na **Tab. II- 5**.

A importância da vegetação e o clima em determinar o comportamento do fogo e as emissões de carbono

No geral, tanto em formações abertas (campestres e savânicas) quanto em florestais o comportamento do fogo e as emissões associadas ao carbono foram explicadas primariamente pelos mesmos preditores. Com relação aos parâmetros de comportamento do fogo, a velocidade do fogo, foi explicada primariamente pelo DPV em todas as formações vegetais (**Fig. II- 9 a**). A intensidade do fogo foi explicada primariamente pelo DPV em formações abertas enquanto que em formações florestais a quantidade de combustível fino foi mais importante (**Fig. II- 9 b**). Já o calor liberado foi explicado primariamente pelo combustível fino em todas as formações vegetais (**Fig. II- 9 c**). Com relação emissões de carbono, todos os parâmetros foram explicados primariamente pelo combustível fino em todas as formações vegetais (**Fig. II- 9 d e f**), inclusive na seleção dos melhores modelos (**Tab. S II- 1 e 2**). Assim, a importância relativa da estrutura da vegetação e do microclima em prever o comportamento do fogo e as emissões de carbono variaram mais com relação ao tipo de parâmetro resposta considerado

(comportamento do fogo e emissões associadas ao carbono) do que com o tipo de vegetação.

Tab. II- 4 Seleção de modelos para o comportamento e emissões de carbono entre formações vegetais em função das variáveis explicativas vegetais e microclimáticas. LogLik = Máxima verossimilhança; AICc = Critério de Informação de Akaike para amostras pequenas; Δ = delta AICc; w = pesos de Akaike (em negrito estão os melhores modelos). Formação = tipo de formação vegetal (campestre, savânica, florestal), Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento.

Modelos	LogLik	AICc	Δ	w	
Velocidade do Fogo					
1	Formação + DPV + Vento	-69.48	152.40	0.00	0.47
2	Formação + Combustível Fino + DPV + Vento	-68.81	153.60	1.19	0.26
3	Formação + DPV	-71.63	154.30	1.88	0.18
4	Formação + Combustível Fino + DPV	-71.09	155.60	3.23	0.09
Intensidade do Fogo					
1	Formação + Combustível Fino+ DPV + Vento	-73.76	163.50	0.00	0.64
2	Formação + DPV + Vento	-76.27	166.01	2.48	0.18
3	Formação + Combustível Fino+ DPV	-76.60	166.60	3.14	0.13
4	Formação + DPV	-79.07	169.20	5.66	0.04
Calor Liberado					
1	Formação + Combustível Fino +Vento	-540.3	1094.01	0.00	0.74
2	Formação + Combustível Fino + DPV + Vento	-540.2	1096.30	2.28	0.23
3	Formação + Combustível Fino	-545.4	1101.80	7.72	0.01
4	Formação + Combustível Fino + DPV	-545.2	1103.90	9.84	0.01
Combustível Fino Consumido					
1	Formação + Combustível Fino	84.25	-157.50	0.00	0.55
2	Formação + Combustível Fino + Velocidade	84.45	-155.50	2.03	0.19
3	Formação + Combustível Fino + DPV	84.40	-155.40	2.13	0.19
4	Formação + Combustível Fino + DPV + Velocidade	84.50	-153.00	4.45	0.06
Fator de Combustão					
1	Formação	-89.80	188.30	0.00	0.67
2	Formação + Combustível Fino	-89.33	189.70	1.41	0.33
3	Formação + DPV	-105.45	217.30	29.02	0.00
4	Formação + Propagação	-111.69	227.60	39.32	0.00
Carbono Liberado					
1	Formação + Combustível Fino	148.57	-286.10	0.00	0.56
2	Formação + Combustível Fino+ Velocidade	148.76	-284.10	2.05	0.20
3	Formação + Combustível Fino+ DPV	148.64	-283.80	2.29	0.18
4	Formação + Combustível Fino + DPV + Velocidade	148.77	-281.60	4.55	0.06

Tab. II- 5 Modelos lineares generalizados construídos para prever o comportamento do fogo e as emissões de carbono entre as formações vegetais (FV) do bioma Cerrado. C = campestre, S = savânica, F= florestal, Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento.

Resposta	FV	Equação do Modelo	F _{ANOVA}	p
Comportamento do Fogo				
Velocidade do Fogo	C	= 3.80	Formação (96.57); DPV (27.17); Vento (4.11)	< 0.05
	S	= 4.20		
	F	= -7.13		
		+ 0.38 * Ln (DPV) + 0.24 * Ln (Vento)		
Intensidade do Fogo	C	= 4.61	Formação (148.16); DPV (24.11); Vento (5.74); Combustível Fino (4.72)	< 0.05
	S	= 5.04		
	F	= 0.24		
		+ 0.39 * Ln (DPV) + 0.30 * Ln (Vento) + 1.14 * Ln (Combustível Fino)		
Calor Liberado	C	= 1407.2	Formação (149.87); Vento (10.15); Combustível Fino (445.48)	< 0.05
	S	= 1780.7		
	F	= -2754.3		
		+ 14275.6 * Combustível Fino + 507.7 * Vento		
Emissões de Carbono				
Combustível Fino Consumido	C	= 0.17	Formação (173.75); Combustível Fino (414.73)	< 0.05
	S	= 0.17		
	F	= -0.20		
		+ 0.92 * Combustível Fino		
Fator de Combustão	C			< 0.05
	S	Relação não-linear		
	F			
Carbono Liberado	C	= 0.08	Formação (204.59); Combustível Fino (432.55)	< 0.05
	S	= 0.06		
	F	= -0.08		
		+ 0.35 * Combustível Fino		

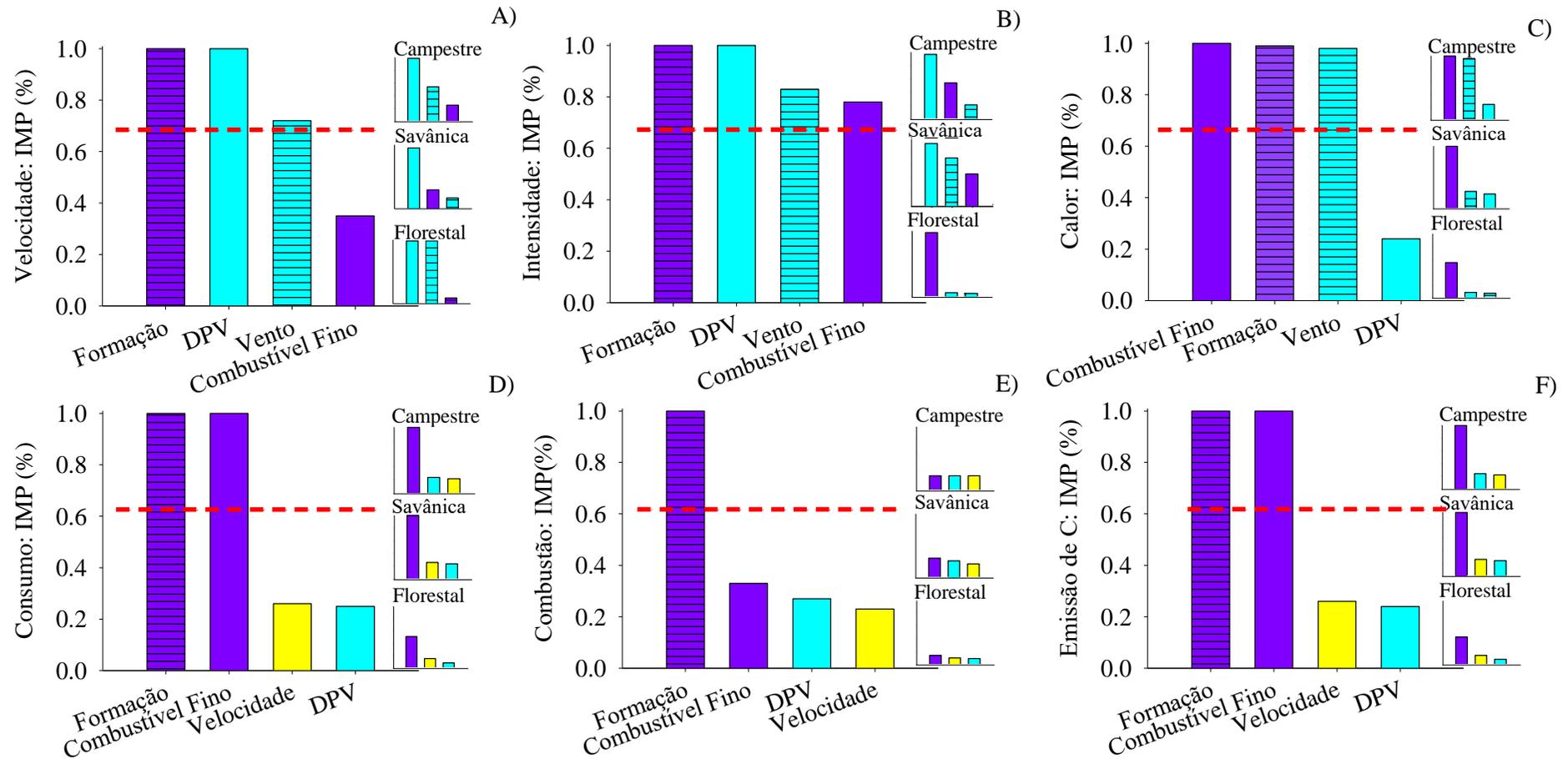


Fig. II- 9 Importância relativa da vegetação (■), microclima (■) e comportamento do fogo (■) em formações vegetais e para cada tipo formação vegetal do bioma Cerrado. IMP = Importância relativa da variável explicativa. As barras que tocam as linhas (---) representam os parâmetros selecionados para compor o melhor modelo.

Discussão

As diferenças encontradas entre formações abertas e florestais, com relação a maior velocidade do fogo, intensidade do fogo, calor liberado, consumo de combustível fino, fator de combustão e carbono liberado em formações abertas, podem ser justificadas pelas diferenças na estrutura e no microclima dos diferentes tipos de vegetação observado. As formações abertas apresentam vegetação mais esparsa, maior velocidade do vento, maior temperatura do ar e menor umidade do ar o que em geral favorece a propagação do fogo (Hoffmann et al., 2012b). Além disso, em formações abertas o combustível fino é composto por uma camada contínua de gramíneas que são altamente inflamáveis e facilitaram a propagação do fogo (Hoffmann et al., 2012b; Hoffmann and Franco, 2003), enquanto que em formações florestais, além da presença de gramíneas ser menor, o teor de umidade do combustível fino é maior (Hoffmann et al., 2012b), fato que dificulta a propagação do fogo e o consumo de combustível fino (Ray et al., 2005). Entretanto, essas medidas de proporção de gramíneas, continuidade e umidade do combustível fino não foram mensuradas nos estudos aqui compilados.

A hipótese de que a importância relativa da vegetação e do microclima em determinar o comportamento do fogo e as emissões de carbono varia com o tipo de formação vegetal, não foi aceita. De forma geral, tanto em formações abertas quanto em florestas, o comportamento do fogo e as emissões de carbono foram explicadas primariamente pelos mesmos preditores. Além disso, esperávamos que em formações abertas a quantidade de combustível fino fosse o fator mais importante, enquanto que em formações florestais esperávamos que seria o DPV. Entretanto, esses padrões não foram observados, pois, as variações na quantidade do material combustível tiveram pouco efeito sobre a velocidade e a intensidade do fogo em formações abertas, enquanto que os maiores valores de DPV resultaram em maior velocidade e intensidade de fogo nesses locais. Neste caso, a importância da quantidade de material combustível fino torna-se menos importante em determinar a velocidade do fogo quando se compara dois ambientes onde a qualidade do material combustível (como a proporção de gramíneas) é similar.

Apesar da importância relativa da vegetação e do microclima em prever o comportamento do fogo e as emissões de carbono não ter variado entre formações vegetais, essa importância variou em relação ao tipo de parâmetro resposta. E nesse caso, a quantidade de material combustível foi o principal preditor das emissões de carbono durante a queima. Assim, essas variações de preditores justificam a importância de se considerar, em planos de manejo fogo, os múltiplos preditores e variáveis resposta, pois

essas respostas representam implicações ecológicas diferentes. Por exemplo, entre os parâmetros de comportamento do fogo uma menor velocidade do fogo pode resultar em maiores reduções em biomassa do estrato arbóreo e arbustivo (Bova and Dickinson, 2005), pois o fogo em menor velocidade pode provocar a ignição do caule causando danos graves ao tecido do câmbio vascular e morte do indivíduo (Kayll, 1968; Silva and Miranda, 1996). Por outro lado, a intensidade do fogo e o calor liberado têm sido relacionados principalmente à estrutura do estrato herbáceo e graminoso, onde queimadas de maior intensidade e calor liberado do fogo podem resultar a uma maior redução em biomassa desse estrato (Trollope et al., 2002). Já o consumo de material combustível, fator de combustão, carbono liberado são as principais métricas para avaliar a poluição e as emissões de gases de efeito estufa relacionadas à ocorrência de fogo (Krug et al., 2002; Van Leeuwen et al., 2014).

Tanto fatores da vegetação quanto do microclima foram selecionados para compor os modelos de comportamento e efeito do fogo. A velocidade do fogo foi pouco explicada pelo combustível fino, nesse caso, o aumento da velocidade do fogo se dariam primariamente em função do DPV, com um efeito aditivo na velocidade do fogo com o aumento da velocidade do vento. A intensidade do fogo foi explicada primariamente pelo combustível fino, tendo um efeito aditivo na intensidade do fogo com o aumento dos valores de DPV e velocidade do vento. O calor liberado foi pouco explicado pelo DVP, nesse caso, o calor liberado durante o fogo se daria primariamente em função quantidade de combustível fino, e no caso formações abertas, obteve se um efeito aditivo no calor liberado com o aumento dos valores de velocidade do vento. O combustível fino consumido e as emissões de carbono foram explicados primariamente pela quantidade de combustível fino, sem modelo aditivo. Assim, essas mudanças nos conjuntos de preditores selecionados para compor os diferentes modelos justificam a importância de se considerar em estratégias de manejo do fogo múltiplos fatores vegetais e microclimáticos.

Em outros países, como na África do Sul (Van Wilgen et al., 2007, 2004) e na Austrália (Maraseni et al., 2016; Whitehead et al., 2008), esse conjunto de informações sobre os padrões de comportamento do fogo e emissões de carbono têm melhorado o conhecimento técnico e a capacidade de decisões relacionadas ao manejo do fogo. Sendo o manejo do combustível uma das principais estratégias empregadas para reduzir o risco de

incêndios florestais⁷ ou para reduzir a extensão de área queimada (Whitehead et al., 2008). No Parque Nacional Kruger no Sul da África, gestores monitoram o microclima, para que em condições extremas de alta temperatura ar ($\geq 30^\circ \text{C}$) e baixa umidade do ar ($\leq 30\%$), sejam realizadas queimadas de alta intensidade de fogo em alguns locais, com o objetivo de matar árvores e manter áreas de vegetação aberta para favorecer o pastoreio de grandes herbívoros (Van Wilgen et al., 2007). Já na Austrália, gestores realizam queimadas prescritas no início da estação seca, quando a temperatura é menor, como estratégia de mitigação e redução de emissões de gases de efeitos estufa (Price et al., 2012).

Os resultados obtidos no presente estudo podem ser utilizados para auxiliar tomadas de decisão nas recentes políticas de manejo do fogo no Cerrado. Neste caso, para formações abertas recomendamos: **1)** o monitoramento do DPV e do vento para realizar queimadas prescritas com maior velocidade do fogo, visando causar menores impactos sobre a vegetação lenhosa. Assim, para se obter queimadas com velocidade do fogo maior que 0.4 m/s, seria necessário um DPV em torno de 3 kPa, que corresponderia aproximadamente a uma temperatura do ar de 30°C e uma umidade do ar de 30%, e velocidade do vento maior que 2 (m/s). No caso de queimadas realizadas no início da estação seca, quando o DPV é menor, a velocidade do vento precisa ser ainda maior. Entretanto, para a realização de queimadas de alta velocidade os esforços para controlar o fogo e impedir que ele se propague além da área planejada são ainda maiores; **2)** a realização de queimadas configuradas em mosaicos com diferentes frequências e períodos de queima, para permitir o estabelecimento de espécies exclusivas de cada regime de fogo (Pivello, 2011) e construção de aceiros, para reduzir a extensão de área queimada e consequentemente as emissões totais de carbono na área. E para formações florestais recomendamos: **1)** O monitoramento da quantidade de combustível fino, do DPV e velocidade do vento, para determinar o risco de incêndios florestais.

Conclusão

A maior velocidade do fogo, intensidade do fogo, calor liberado, consumo de combustível fino, fator de combustão e carbono liberado foram principalmente associados às formações abertas (campestres e savânicas), enquanto que esses valores foram significativamente inferiores em formações florestais. A importância dos fatores vegetais e microclimáticos variaram entre os tipos de parâmetros resposta, onde em todas as formações vegetais o DPV foi o principal preditor do comportamento do fogo, enquanto

⁷ Queimada, natural ou antrópica, não planejada que queima a vegetação de forma descontrolada (Whelan, 1995).

que a quantidade de combustível fino foi o principal preditor das emissões de carbono. Dessa forma, o monitoramento da quantidade de combustível fino e do DPV, podem auxiliar nas tomadas de decisão em políticas de manejo do fogo no Cerrado, principalmente em áreas onde o plano manejo considerar a realização de mosaicos de queima. Seja para a realização de queimadas prescritas em locais caracterizados por formações abertas, visando manter os processos ecossistêmicos relacionados a passagem do fogo, ou para determinar o risco de fogo, visando proteger a ocorrência de incêndios em formações florestais ou abertas a serem estrategicamente protegidas do fogo.

Material Suplementar

Determinantes do comportamento do fogo e emissões de carbono no Cerrado brasileiro

¹Letícia Gomes, ¹Heloisa S. Miranda, ²Divino V. Silvério, ¹Mercedes M. C. Bustamante

¹Departamento de Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF 70919-900, Brazil; ²Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, Canarana, MT 78640-000, Brazil

Autor para correspondência: leticiagomesbio@gmail.com

Este documento fornece um material suplementar ao artigo correspondente. Onde, os preditores selecionados para compor o modelo de comportamento do fogo estão representados nas **Fig. S II- 1** e **II-2**. A seleção de modelos para cada formação vegetal está descrita nas tabelas **Tab. S II- 1** e **II- 2**.

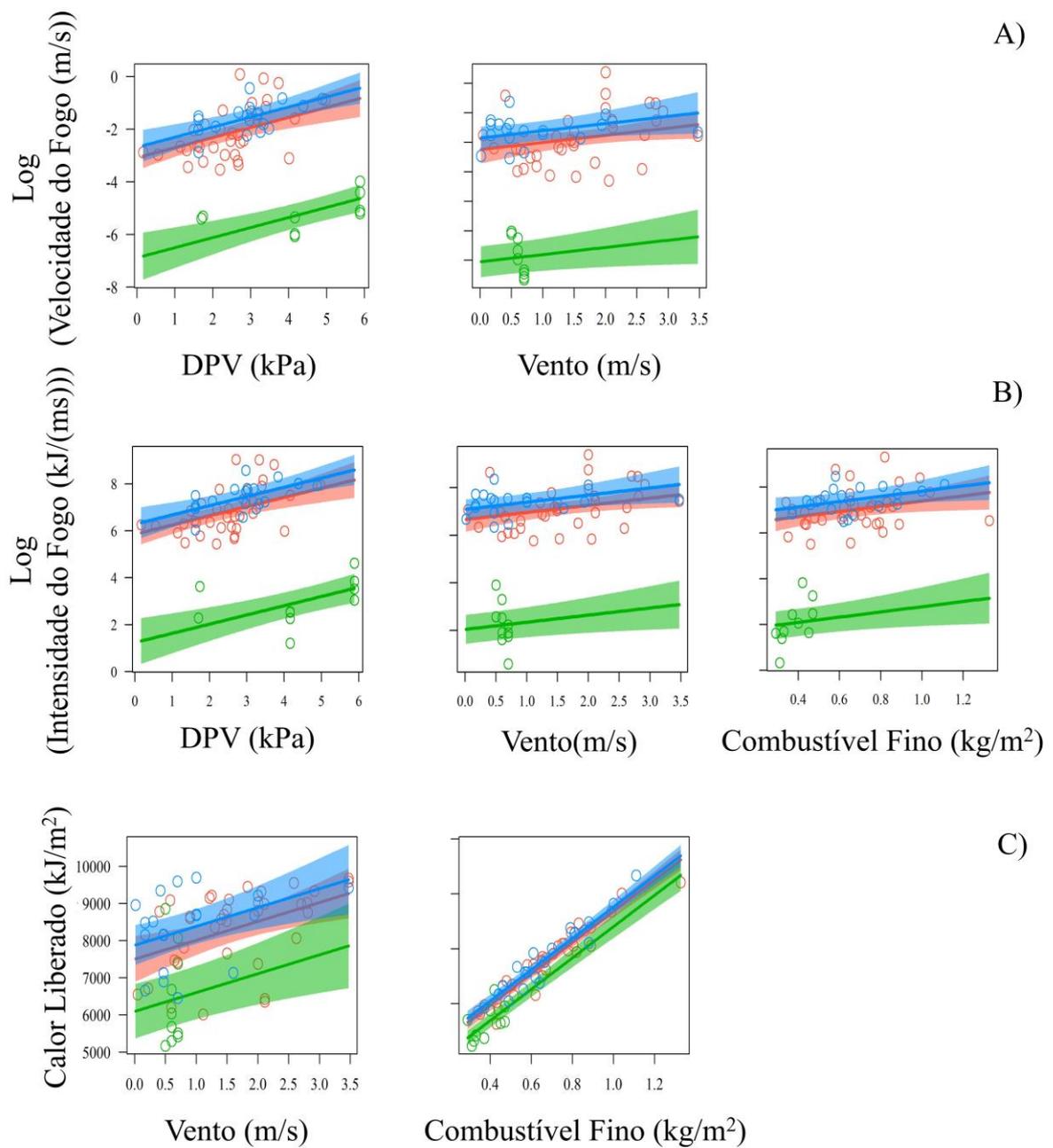


Fig. S II- 1 Preditores selecionados para compor o modelo de comportamento do fogo (velocidade do fogo (A), intensidade do fogo (B) e calor liberado (C)), classificados em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado.

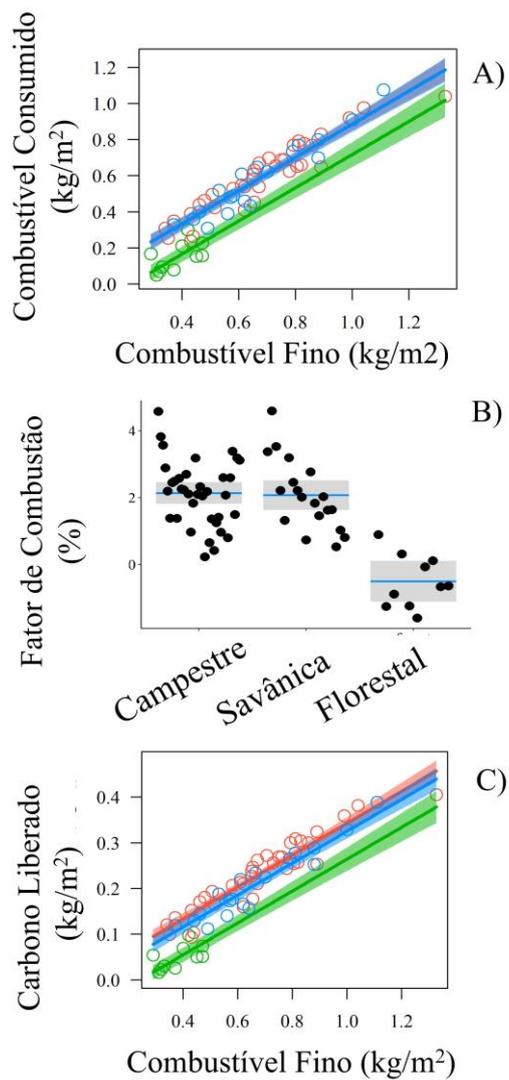


Fig. S II- 2 Preditores selecionados para compor o modelo de emissões (combustível fino consumido (A), fator de combustão (B) e carbono liberado (C)), classificados em formações campestres (■), savânicas (■) e florestais (■) do bioma Cerrado.

Tab. S II- 1 Seleção de modelos para o comportamento do fogo para cada formação vegetal em função das variáveis explicativas vegetais e microclimáticas. FV = Formação Vegetal; C= formação campestre, S= savânica, F= florestal, LogLik = Máxima verossimilhança; AICc = Critério de Informação de Akaike para amostras pequenas; Δ = delta AICc; w = pesos de Akaike (valores $\Delta < 2$ estão em negrito). Formação = tipo de formação vegetal, Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento.

FV	Modelo	LogLik	AICc	Δ	w
Velocidade do Fogo					
C	DPV + Vento	-43.45	96.20	0.00	0.40
C	DPV	-44.87	96.50	0.32	0.34
C	Combustível Fino + DPV + Vento	-43.22	98.40	2.27	0.13
C	Combustível Fino + Vento	-44.70	98.70	2.51	0.11
S	DPV	15.47	-23.30	0.00	0.55
S	Combustível Fino + DPV	16.31	-21.80	1.58	0.25
S	DPV + Vento	15.50	-20.10	3.19	0.11
S	Combustível Fino + DPV + Vento	16.42	-18.20	5.12	0.04
F	DPV + Vento	5.08	5.80	0.00	0.91
F	Combustível Fino + DPV + Vento	7.16	10.70	4.83	0.08
F	Combustível Fino	-2.72	15.40	9.60	0.01
F	Combustível Fino + DPV	-1.97	19.90	14.10	0.01
Intensidade do Fogo					
C	DPV + Vento	-44.80	98.90	0.00	0.34
C	Combustível Fino + DPV + Vento	-43.47	98.90	0.04	0.33
C	Combustível Fino + DPV	-45.69	100.70	1.77	0.14
C	DPV	-46.97	100.70	1.80	0.14
S	Combustível + DPV	-13.20	37.20	0.00	0.43
S	DPV	-15.16	37.70	0.48	0.34
S	DPV + Vento	-14.59	40.00	2.77	0.11
S	Combustível Fino + DPV + Vento	-12.88	40.40	3.13	0.19
F	Combustível Fino	-7.51	25.00	0.00	0.88
F	Combustível Fino + DPV	-7.37	30.70	5.72	0.15
F	Combustível Fino + Vento	-7.50	31.00	5.99	0.04
F	Combustível Fino + DPV + Vento	-14.18	33.90	8.87	0.01
Calor Liberado					
C	Combustível Fino + Vento	-296.94	603.20	0.00	0.73
C	Combustível Fino + DPV + Vento	-296.74	605.50	2.31	0.23
C	Combustível Fino	-301.51	609.80	6.59	0.03
C	Combustível Fino + DPV	-301.7	612.01	8.85	0.03
S	Combustível Fino	-157.19	322.01	0.00	0.54
S	Combustível Fino + Vento	-156.41	323.70	1.72	0.22
S	Combustível Fino + DPV	-156.63	324.10	2.14	0.19
S	Combustível Fino+ DPV + Vento	-156.17	326.90	4.97	0.04
F	Combustível Fino	-5.68	21.40	0.00	0.50
F	Modelo Nulo	-8.19	22.10	0.73	0.35
F	DPV	-8.01	26.01	4.66	0.05
F	Vento	-8.13	26.30	4.91	0.04

Tab. S II- 2 Seleção de modelos para as emissões de carbono para cada formação vegetal em função das variáveis explicativas vegetais, microclimáticas e de comportamento do fogo. FV= Formação Vegetal; C= formação campestre, S= savânica, F= florestal, LogLik = Máxima verossimilhança; AICc = Critério de Informação de Akaike para amostras pequenas; Δ = delta AICc; w = pesos de Akaike (valores < 2 estão em em negrito). Formação = tipo de formação vegetal, Combustível Fino = quantidade combustível fino disponível para a queima, DPV= Déficit de pressão de vapor d'água, Vento = velocidade do vento.

FV	Modelo	LogLik	AICc	Δ	w
Combustível Fino Consumido					
C	Combustível Fino	45.84	-84.90	0.00	0.59
C	Combustível Fino + DPV	45.98	-82.70	2.26	0.19
C	Combustível Fino + Velocidade do Fogo	45.86	-82.40	2.50	0.17
C	Combustível Fino + DPV + Velocidade do Fogo	45.98	-80.00	4.97	0.05
S	Combustível Fino	12.64	-17.70	0	0.54
S	Combustível Fino + Velocidade do Fogo	13.39	-15.90	1.76	0.22
S	Combustível Fino + DPV	13.30	-15.70	1.94	0.20
S	Combustível Fino + DPV + Velocidade do Fogo	13.50	-12.40	5.30	0.04
F	Combustível Fino	-5.68	21.40	0.00	0.46
F	Modelo Nulo	-8.19	22.10	0.73	0.32
F	Velocidade do Fogo	-7.06	24.10	2.77	0.11
F	DPV	-8.01	26.00	4.66	0.04
Fator de Combustão					
C	Modelo Nulo	-50.20	104.80	0.00	0.45
C	Combustível Fino	-50.17	107.10	2.34	0.14
C	Velocidade do Fogo	-50.18	107.10	2.35	0.14
C	DPV	-50.19	107.10	2.36	0.14
S	Modelo Nulo	-27.61	60.00	0.00	0.39
S	Combustível Fino	-26.93	61.50	1.50	0.18
S	DPV	-27.04	61.70	1.72	0.17
S	Velocidade do Fogo	-27.40	62.40	2.45	0.11
F	Modelo Nulo	3.40	-1.10	0.00	0.68
F	Combustível Fino	3.83	2.30	3.42	0.12
F	Velocidade do Fogo	3.52	2.90	4.03	0.09
F	DPV	3.41	3.20	4.26	0.08
Carbono Liberado					
C	Combustível Fino	79.70	-152.60	0.00	0.59
C	Combustível Fino+ DPV	79.84	-150.40	2.26	0.19
C	Combustível Fino+ Velocidade do Fogo	79.72	-150.20	2.50	0.17
C	Combustível Fino+ DPV + Velocidade do Fogo	79.84	-147.70	4.97	0.05
S	Combustível Fino	12.64	-17.70	0.00	0.54
S	Combustível Fino+ Velocidade do Fogo	13.39	-15.90	1.76	0.24
S	Combustível Fino+ DPV	13.30	-15.70	1.94	0.20
S	Combustível Fino+ DPV + Velocidade do Fogo	13.50	-12.40	5.30	0.04
F	Modelo Nulo	22.85	-40.00	0.00	0.40
F	Combustível Fino	24.96	-39.90	0.07	0.39
F	Velocidade do Fogo	23.70	-37.40	2.59	0.11
F	DPV	22.87	-35.70	4.25	0.05



Capítulo 3 - Interações entre vegetação, microclima e fogo em savana brasileira: Modelos baseados em processos

¹Leticia Gomes, ²Britaldo Soares Filho, ²Lucas Rodrigues, ¹Heloisa Sinátora Miranda, ¹Mercedes Maria da Cunha Bustamante

¹ Departamento de Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal 70919-900, Brasil, ² Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais 31270-900, Brasil

Autor para correspondência: L. Gomes, tel. +55-66-99228-2598, fax: +55-61-3107-2925, e-mail: leticiagomesbio@gmail.com (L. Gomes)

Revista pretendida para a submissão: Global Change Biology (Qualis A1)



Resumo

Cerrado representa a savana de maior diversidade do mundo. Atualmente, a sua estrutura, a sua diversidade e os seus serviços ecossistêmicos estão altamente ameaçados, tanto pelo aumento da frequência de fogo quanto pela sua supressão. A definição da frequência de fogo mais adequada é um fator chave para estratégias de manejo bem-sucedidas em savanas. Uma vez que, queimadas frequentes podem impedir a recuperação da vegetação e aumentar as emissões de gases do efeito estufa, enquanto que na sua ausência pode levar a homogeneização e ao adensamento da vegetação. Nós utilizamos uma abordagem de Dinâmica de Sistemas para demonstrar como a frequência de fogo afeta a dinâmica da biomassa da vegetação e o balanço de carbono atmosférico no Cerrado. Nós construímos esses modelos com base em uma extensa revisão da literatura sobre queimadas prescritas. Consideramos como variáveis de entrada: o microclima, taxas de incremento e decremento da biomassa vegetal de árvores, arbustos, herbáceas e gramíneas, e suas variações naturais e pós-fogo. As saídas do modelo foram: o comportamento do fogo (velocidade do fogo, intensidade do fogo e calor liberado) e seus efeitos sobre a dinâmica da biomassa vegetal e balanço de carbono atmosférico. Simulamos dois cenários de frequência de fogo: um com uma queimada isolada e outro com duas queimadas bienais. Nossas simulações demonstram que queimadas bienais mantêm constante a biomassa de herbáceas e gramíneas. No entanto, esse intervalo de tempo não permite a recuperação da biomassa de arbustos e árvores e o retorno do carbono emitido durante a queimada. Assim, intervalos de fogo menores que quatro anos não são indicados para a conservação da estrutura das savanas brasileiras, pois os padrões de coexistência dos estratos arbóreo-arbustivo e herbáceo-graminoso podem ser alterados. Sugerimos o uso de queimadas prescritas configuradas em mosaicos de queima, de forma que, em alguns locais sejam realizadas queimadas prescritas bienais, para permitir o estabelecimento de espécies que são beneficiados por esse regime de fogo e que em outros locais haja a prevenção e o combate de queimadas não programadas em intervalos menores que quatro anos.

Palavras-chave: comportamento do fogo, emissões de carbono, manejo do fogo, queimada prescrita, recuperação da vegetação

Introdução

O fogo é um evento histórico e frequente em ecossistemas terrestres (Bowman et al., 2009). Ao longo do tempo o fogo moldou as características da biota com traços morfológicos considerados como adaptações ao fogo, como casca espessa e investimento em biomassa de raízes (Bowman et al., 2009). Entretanto, na história recente as mudanças

climáticas como o aumento da temperatura e a intensificação das secas extremas, têm alterado a frequência desses eventos (Enright et al., 2015; Pausas and Keeley, 2009), de forma que não podemos prever se todas as espécies conseguirão se adaptar aos atuais regimes de fogo (Pausas and Keeley, 2009). O aumento da frequência de fogo em alguns casos está relacionado ao uso do fogo como ferramenta de manejo em práticas agropastoris, visando à limpeza da área ou estímulo para a rebrota (Mistry, 1998). Essas práticas são importantes fontes de ignição, permitindo que o fogo se propague para a vegetação nativa de entorno (França et al., 2007). Por outro lado, a exclusão do fogo tem ameaçado a vegetação savânica que depende do fogo para manter sua estrutura, biodiversidade e funcionamento (Abreu et al., 2017; Durigan and Ratter, 2015). Assim, estudos têm buscado determinar medidas equilibradas para o uso do fogo, que causem menores impactos aos múltiplos processos ambientais (Prichard et al., 2017).

O Cerrado é considerado a savana de maior biodiversidade do mundo (Klink and Machado, 2005). Entretanto, nas últimas décadas a biodiversidade do Cerrado vem sendo ameaçada pelo uso indiscriminado e aumento da frequência de fogo (Pivello, 2011). No ano de 2017, o Cerrado representou cerca de 75% do total de focos de queimadas no Brasil em unidades de conservação (INPE, 2017). Essas queimadas consecutivas, em intervalos próximos a dois anos, têm sido associadas a redução da vegetação arbórea (Sato, 2003; Sato et al., 2010) e da diversidade de espécies (Abreu et al., 2017; Durigan et al., 1994; Ribeiro et al., 2012). Esse menor intervalo de fogo impede com que as plantas reabsorvam o carbono perdido durante a queimada (Sato, 2003). Contudo, em algumas regiões, a exclusão do fogo (~50 anos) pode levar ao adensamento da vegetação arbórea e a exclusão de espécies não arbóreas (Pinheiro and Durigan, 2009; Pinheiro et al., 2016). Além disso, longos intervalos de fogo são associados a um maior acúmulo de material combustível, resultando em queimadas descontroladas e de maior severidade (Fidelis and Pivello, 2011; Pivello, 2011), e com maiores emissões de carbono (Krug et al., 2002).

O atual Código Florestal brasileiro (Lei 12651, vigente desde maio de 2012) permite o gerenciamento de queimadas em Unidades de Conservação do Cerrado (Artigo 38) visando o manejo conservacionista da vegetação nativa. Programas de Manejo Integrado de Fogo vêm sendo implementados em algumas unidades de conservação desde 2014 (Schmidt et al., 2016b, 2016c). Esses programas consideram os aspectos ecológicos, econômicos e culturais do uso do fogo, para propor queimadas controladas, prevenção ou combate de incêndios, visando a conservação e o uso sustentável do ecossistema (Myers, 2006). Entretanto, esses programas são recentes no Cerrado e muitas incertezas ainda estão

associadas às decisões de manejo (Schmidt et al., 2016b). As incertezas ocorrem principalmente devido ao conhecimento fragmentado das relações entre comportamento e efeito do fogo sobre os múltiplos processos ecológicos com diferentes regimes de queima, fato que dificulta a tomada de decisão de forma equilibrada para beneficiar o maior número de processos ecológicos possíveis (Gomes et al., 2018a).

A Dinâmica de Sistemas (DS), é uma ferramenta da modelagem que integra múltiplas equações matemáticas para descrever o comportamento geral de um sistema, sendo essa utilizada como uma forma de unificar o conhecimento empírico (Angerhofer and Angelides, 2000; Felício, 2010). A DS pode ser utilizada como uma ferramenta de modelagem quantitativa para analisar o impacto de distúrbios recorrentes, como o fogo, em sistemas complexos e dinâmicos ao longo do tempo (Collins et al., 2013; Yan et al., 2016). Inclusive a DS considera características essenciais dos processos relacionados a passagem do fogo, como a dependência entre os componentes do sistema, *feedbacks* temporais e respostas não instantâneas de cada componente (Felício, 2010). Entretanto, a modelagem quantitativa do fogo no Cerrado ainda é incipiente em termos sistêmicos, contando apenas com modelos simplificados que não consideram as relações entre o comportamento e o efeito do fogo sobre os processos ecossistêmicos (Gomes et al., 2018a).

Apesar do conhecimento fragmentado entre o comportamento e efeito do fogo no bioma Cerrado, o conhecimento acumulado atualmente permite a construção de modelos a partir da DS para modelar o fogo no Cerrado. Assim, nós propomos um protótipo de um modelo ecológico baseado em DS, BEFIRE (*Behavior and Effect of FIRE*). O modelo BEFIRE simula os efeitos das interações entre vegetação, microclima e fogo sobre o funcionamento dos compartimentos vegetais e atmosféricos ao longo do tempo. Nós construímos esse modelo com base em uma extensa revisão da literatura sobre queimadas prescritas⁸ em savanas (cerrado típico) no bioma Cerrado (*Capítulo 1 e 2*). Simulamos dois cenários de frequência de fogo, um com uma queimada (1Q) e outro com duas queimadas bienais (2QB), ocorridas durante a estação seca no bioma (setembro) ao longo de quatro anos. O modelo desenvolvido é útil para unificar relações sistêmicas, melhorar a compreensão dessas relações e auxiliar na tomadas de decisão em planos de manejo de uso do fogo sobre a vegetação nativa do bioma Cerrado.

⁸ Queimadas controladas com objetivos pré-definidos, visando o manejo e a conservação da vegetação.

Material e Métodos

Caraterização da área de estudo

A maior parte da região do bioma Cerrado é classificada por um clima tropical de savana Aw (tropical de savana) de acordo com de Köppen e Cwa (subtropical) em pequenas porções do sul do bioma (Alvares et al., 2013). Apresenta alta sazonalidade na distribuição da precipitação, com uma estação chuvosa (de outubro a março) e uma estação seca (de abril a setembro) (Silva et al., 2008), pluviosidade média anual entre 1.300 a 1.600 mm e temperatura média de 20,1°C. A umidade relativa do ar é classificada como moderada em comparação a da Amazônia, sendo que 90% da área apresenta umidade relativa do ar entre 60 e 70% (Silva et al., 2008). A ocorrência de fogo no Cerrado também é altamente sazonal, pois durante a estação chuvosa ocorre um aumento substancial na quantidade de biomassa da vegetação, enquanto que na estação seca a biomassa torna-se altamente inflamável (Hoffmann et al., 2012b; Miranda et al., 2010).

Em termos vegetacionais, o bioma Cerrado é caracterizado por um mosaico de formações vegetais distribuídas de forma heterogênea no espaço, definidas principalmente por um gradiente vegetal de cobertura arbórea, que vão desde formações mais abertas a formações mais fechadas (Ribeiro and Walter, 2008) (**Fig. III- 1**). As formações abertas são subtipos naturais de savana (Sarmiento, 1983) e são classificadas em “campestres”, caracterizada pelo predomínio de plantas herbáceas e gramíneas e “savânicas” caracterizada pela presença árvores esparsas sobre estrato graminoso, enquanto que as formações mais fechadas são denominadas como “florestais”, caracterizada pelo predomínio de árvores com formação de dossel (Ribeiro and Walter, 2008). As formações savânicas e campestres são altamente suscetíveis à ocorrência de fogo, sendo a presença de gramíneas uma das principais causas da sua alta inflamabilidade (Dantas and Pausas, 2013; Hoffmann et al., 2012b).

No presente estudo, consideramos a vegetação savânica para parametrizar o presente modelo desenvolvido, por esse ser o tipo de vegetação mais representativo do bioma (~76 milhões de hectares; 61%), em comparação as formações campestres (~8 milhões de hectares; 7%) e florestais (~40 milhões de hectares, 32%) (Sano et al., 2010). Adicionalmente, essa formação é caracterizada pela coexistência de diferentes estratos vegetais, como, árvores, arbustos, herbáceas e gramíneas (Ribeiro and Walter, 2008), que são afetados de forma diferenciada pela passagem do fogo (Sato, 2003). Assim, consideramos esses estratos vegetais e suas respectivas dinâmicas da biomassa, natural e pós-fogo. Além disso, também consideramos a contribuição desses estratos vegetais para a

composição do combustível fino disponível para a queima (**Fig. III- 2**), por esse ser um importante preditor dos padrões de comportamento e efeito do fogo (Gomes et al. *Capítulo 2*; Hoffmann et al., 2012). Cerca de 95% da biomassa do estrato herbáceo-graminoso está disponível para queima (Hoffmann et al., 2012b; Miranda et al., 2010), enquanto que apenas 0.01% do estrato arbóreo-arbustivo está disponível (Hoffmann et al., 2012b; Nardoto et al., 2006). Assim, o combustível fino disponível para queima, corresponde a biomassa (viva ou morta) presente na superfície do solo, representada por gramíneas, folhas e ramos finos com diâmetro até 6 mm (Luke and McArthur, 1978). Além disso, p combustível fino é medido até a altura de 2 m, devido à baixa eficiência de consumo do combustível fino dos estratos arbóreo-arbustivos nessa altura (Krug et al., 2002).

As informações sobre os processos ecológicos relacionados a estrutura e o funcionamento desse ambiente foram obtidas com base em uma ampla revisão da literatura abrangendo trabalhos publicados entre 1994 e 2016, a partir das seguintes plataformas de pesquisa: Web of Science, Science Direct, Google Scholar e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. Usamos as seguintes palavras-chave: (queimada prescrita* OR fogo* OR queimada) AND (comportamento * OR efeito * OR manejo* OR regime* OR dinâmica* OR Emissões). Consideramos artigos, teses e dissertações que utilizaram queimadas prescritas para caracterizar o comportamento e efeito do fogo no bioma Cerrado. A maior parte das informações consideradas foram obtidas pelo Projeto Fogo, coordenado pela Prof. Dra. Heloisa Sinátora Miranda (Universidade de Brasília). Este projeto foi implementado em 1991 na reserva ecológica do IBGE (Brasília – Distrito Federal), e desde então tem contribuído substancialmente com informações de longo prazo sobre o comportamento e o efeito do fogo no bioma Cerrado (Dias and Miranda, 2010).

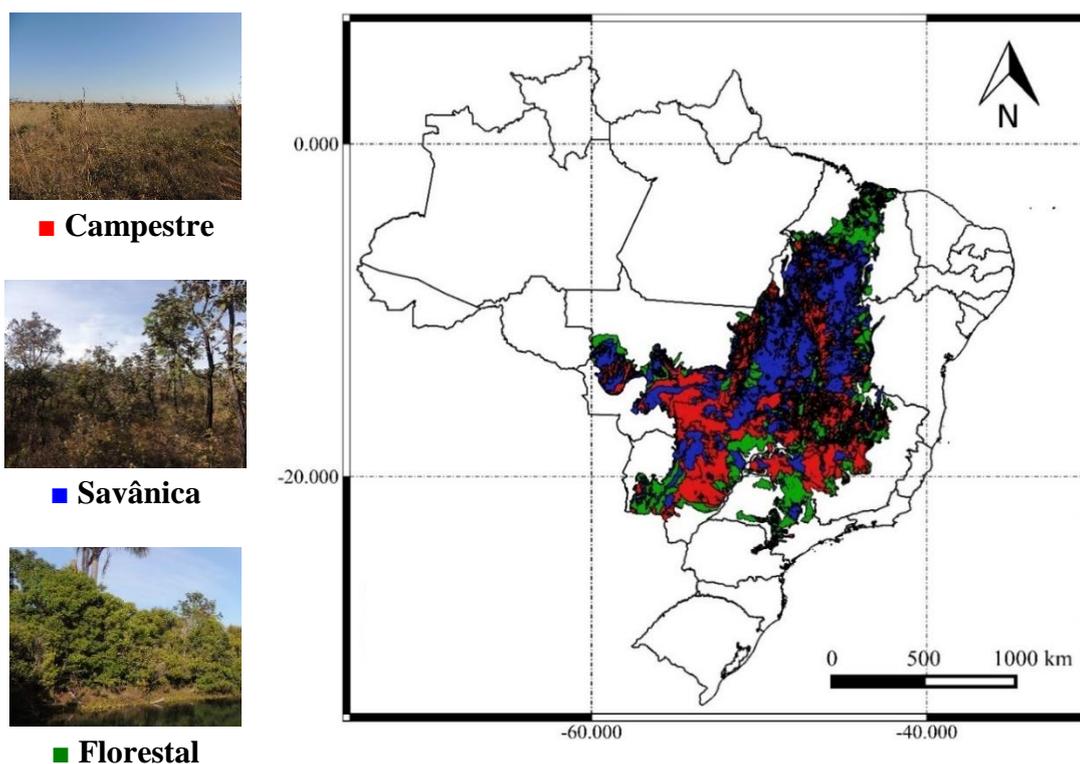


Fig. III- 1 Mapa da vegetação pretérita do bioma Cerrado, classificado em formações campestres, savânicas e florestais (Fonte: Third National Inventory (Brazil, 2016), modificado de PROBIO I (MMA) e TM/Landsat-5 imagens).

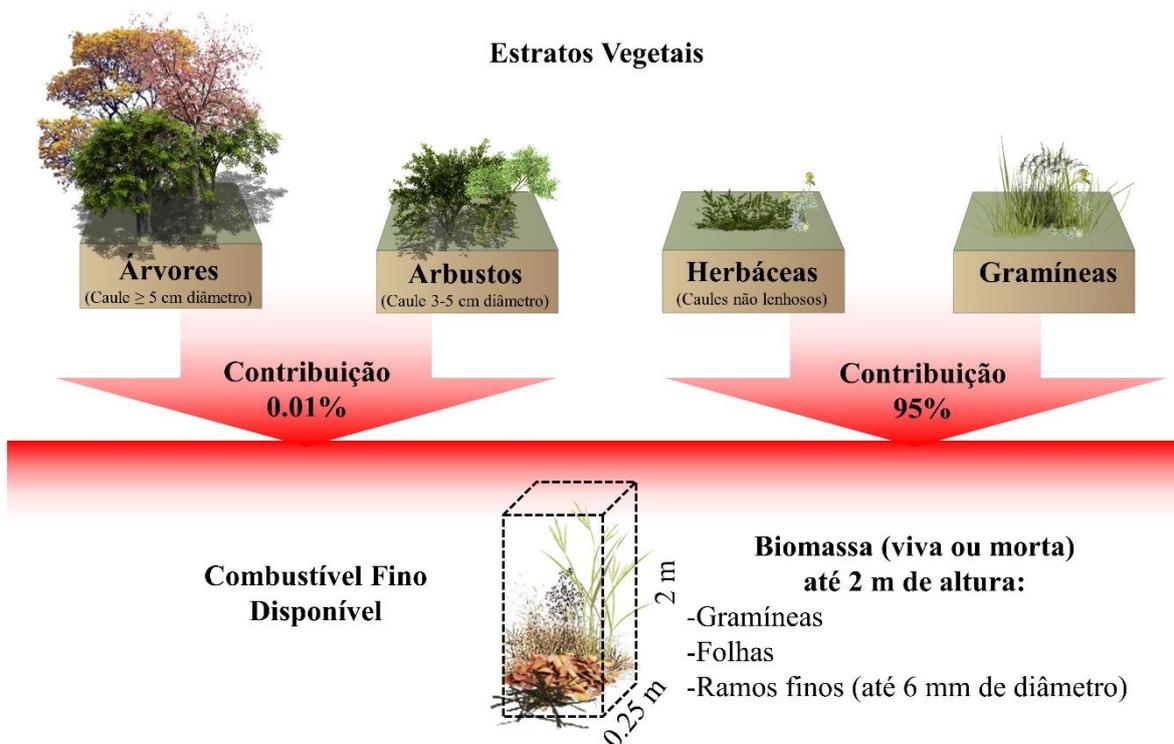


Fig. III- 2. Principais estratos vegetais e suas contribuições para a composição do combustível fino disponível para a queima em savanas brasileiras.

Princípios do modelo BEFIRE

O modelo BEFIRE foi desenvolvido para dar suporte à tomada de decisão de gestores em Unidades de Conservação, quanto às medidas de frequência de fogo para queimadas prescritas a serem realizadas em savanas brasileiras. Esse modelo envolve dois subsistemas, o de comportamento do fogo e o de efeito do fogo (**Fig. III- 3 a e b**). Consideramos como variáveis de entrada do modelo as características do microclima e da vegetação. O microclima foi definido pelo déficit de pressão de vapor d'água (DPV), pelo qual foi calculado com base nos valores de temperatura média do ar e a umidade relativa do ar (**Tab. III- 1**). Determinamos a dinâmica da biomassa vegetal e balanço de carbono atmosférico (entre a quantidade de carbono emitido (*uncommitted emissions*) durante a queimada e a quantidade de carbono estocado na vegetação ao longo do tempo) a partir de valores iniciais de biomassa e quantidade de carbono, e suas respectivas taxas de incremento e decremento, com e sem fogo (**Tab. III- 2**). O subsistema de comportamento do fogo, foi definido a partir das equações descritas na **Tab. III- 1**. O subsistema de efeito do fogo, foi dado a partir da determinação do comportamento do fogo, onde foi calculado o consumo e a produção de biomassa, e o carbono emitido e estocado ao longo do tempo. Como saída do modelo tem-se a dinâmica da biomassa da vegetação e o balanço de carbono atmosférico ao longo do tempo.

Definimos as taxas de incremento e decremento de biomassa a partir de estudos experimentais com fogo no bioma Cerrado (Andrade, 1998; Batmanian and Haridasan, 1985; Gomes et al., 2014), bem como a contribuição relativa de biomassa de cada um dos estratos vegetais para a quantificação do combustível fino (Batmanian and Haridasan, 1985; Nardoto et al., 2006). As taxas de incremento e decremento da biomassa de herbáceas e gramíneas foram obtidas a partir das variações mensais (Andrade, 1998; Batmanian and Haridasan, 1985) (**Fig. III- 4**). Por outro lado, as taxas de biomassa de árvores e arbustos foram obtidas a partir das variações anuais, devido à ausência de estudos com mensurações mensais para esses estratos (**Fig. III- 5**). No caso da biomassa das árvores e arbustos, utilizamos a equação alométrica proposta por Eiten et al. (não publicado) para transformar medidas de diâmetro e altura dos caules em biomassa. Expressamos a biomassa por unidade de área (kg/m^2), para permitir a comparação entre os estratos vegetais.

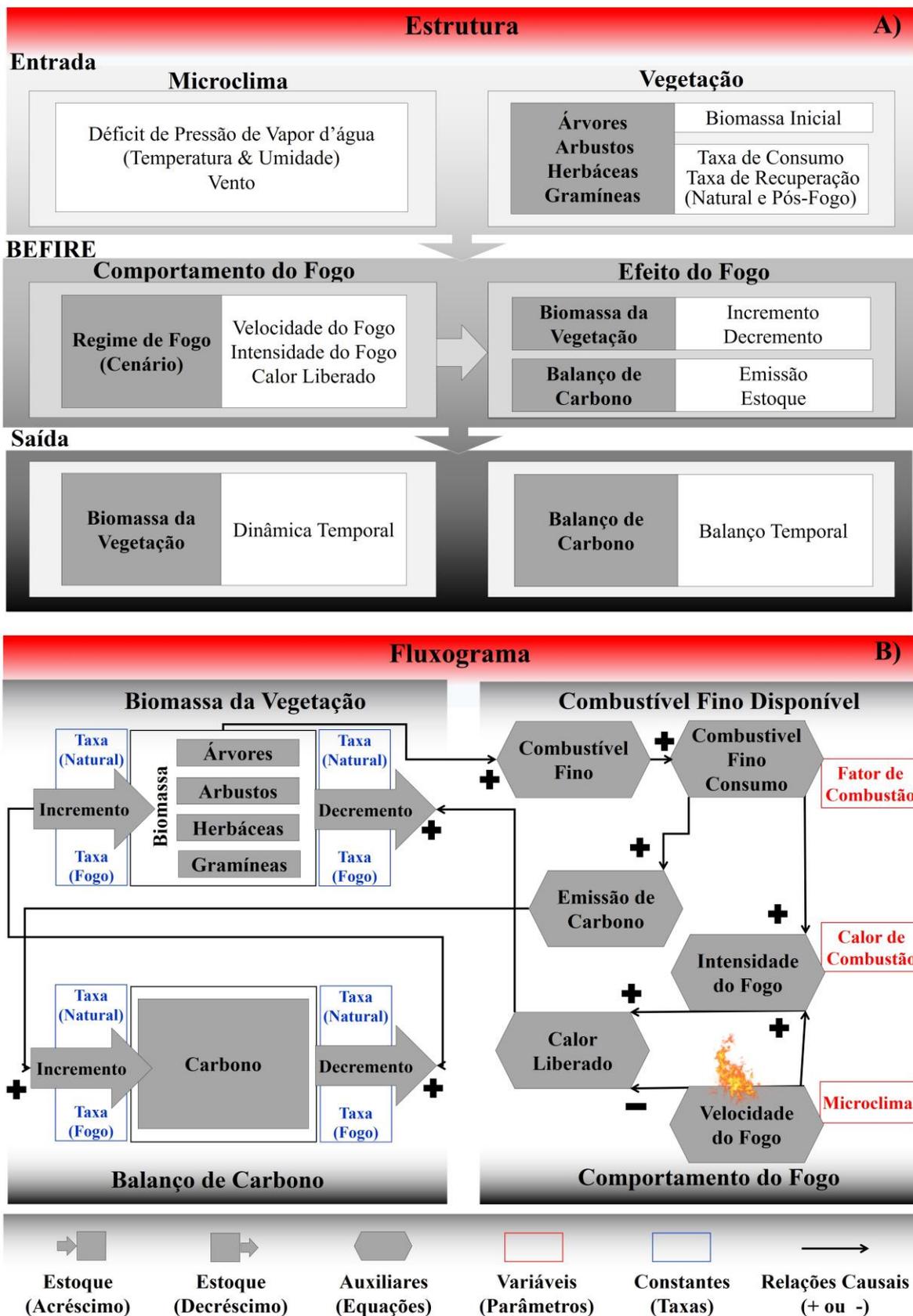


Fig. III- 3 Descrição (A) e diagrama conceitual (B) do modelo BEFIRE.

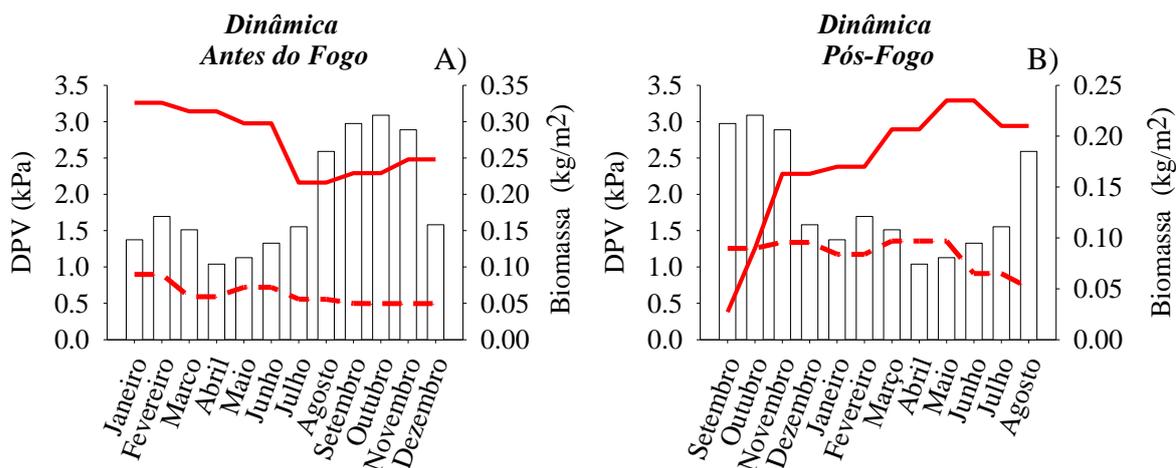


Fig. III- 4 Dinâmica mensal A) antes e B) depois do fogo da biomassa de herbáceas (----) e gramíneas (—), ao longo do gradiente de déficit de pressão de vapor d'água (DPV) (□) em uma savana brasileira (cerrado típico) na Reserva Ecológica do IBGE, Distrito Federal (Modificado de Batmanian & Haridasan (1985)).

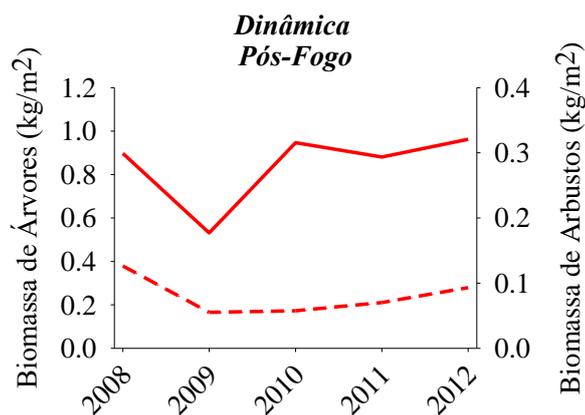


Fig. III- 5 Dinâmica anual depois do fogo da biomassa de arbustos (----) e árvores (—) em uma savana brasileira (cerrado rupestre) no Parque do Bacaba, Mato Grosso (modificado de Gomes et al. (2014)).

Tab. III- 1 Equações utilizadas no modelo BEFIRE.

Parâmetros	Equação	Abreviação (Referência)
Intensidade do Fogo (kJ/(ms))	$I = h \times w \times r$	H = calor efetivo da combustão (kJ/(ms)) w = combustível fino consumido (kg/m ²) r = velocidade do fogo (m/s) (1)
Calor Liberado (kJ/m ²)	$H = I/r$	I = intensidade da frente de fogo (kJ/(ms)) r = velocidade do fogo (m/s) (2)
Velocidade do fogo (m/s)	$V = 0,38 \times LN(VPD) + 0,24 * LN (VT)$	LN = Log Natural DPV = Déficit de Pressão de Vapor VT = Vento (3)
Déficit de Pressão de Vapor d'água (kPa)	$VPD = \{[1 - (UR/100)] \times VPS$ $VSP = 610.7 \times 10^{7.5T / (237.3+T)}$	UR= umidade relativa do ar (%) VPS= vapor de pressão saturado T = temperatura média do ar (°C) (4)
Emissão de Carbono (kg/m ²)	$C_e = [(FBVC \times FBVO) \times FCBV] + [(FBMC \times FBMO) \times FCBM]$	FBVC = fração de biomassa viva consumida FBVO = fração de biomassa viva oxidada FCBV = fração de carbono na biomassa viva FBMC = fração de biomassa morta consumida FBMO = fração de biomassa morta oxidada* FCBM = fração de carbono na biomassa morta (5)

Referências: (1) (George M Byram, 1959); (2) (Rothermel and Deeming, 1980); (3) (Gomes et al. *Capítulo 2*) (4) (Allen et al., 1998); (5) (Krug et al., 2002). *Proporção de biomassa que efetivamente reage para produzir gases durante o processo de combustão (Carvalho et al., 1995).

Tab. III- 2 Valores iniciais e constantes utilizadas no modelo BEFIRE para simular a dinâmica dos estoques de biomassa vegetal e balanço de carbono atmosférico em savanas brasileiras (cerrado típico).

Parâmetros		Constantes (Taxas Mensais)	Referências
Biomassa Vegetal	Valor Inicial (kg/ m ²)	Árvores = 0.90	(Gomes et al., 2014)
		Arbustos = 0.13	(Gomes et al., 2014)
		Herbáceas = 0.08	(Batmanian and Haridasan, 1985)
		Gramíneas = 0.50	(Batmanian and Haridasan, 1985)
	Taxa de Decremento Natural (% mês ⁻¹)	Árvores = 0.1	(Gomes et al., 2014)
		Arbustos = 0.1	(Gomes et al., 2014)
		Herbáceas = 0.1	(Batmanian and Haridasan, 1985)
		Gramíneas = 0.1	(Batmanian and Haridasan, 1985)
	Taxa de Incremento Natural (% mês ⁻¹)	Árvores = 0.2	(Gomes et al., 2014)
		Arbustos = 0.2	(Gomes et al., 2014)
Herbáceas = 0.2		(Batmanian and Haridasan, 1985)	
Gramíneas = 0.2		(Batmanian and Haridasan, 1985)	
Taxa de Decremento Pós-Fogo (% mês ⁻¹) [Apenas no mês da queima]	Árvores = 40 a 42*	(Gomes et al., 2014)	
	Arbustos = 40 a 42	(Gomes et al., 2014)	
Taxa de Incremento Pós-Fogo (% mês ⁻¹) [Até alcançar o valor inicial da biomassa]	Herbáceas = 85	(Andrade, 1998)	
	Gramíneas = 85	(Andrade, 1998)	
	Árvores = 42	(Gomes et al., 2014)	
	Arbustos = 0.4	(Gomes et al., 2014)	
Carbono na Biomassa	Valor Inicial (kg/ m ²)		0
	Taxa Natural de Emissão (% mês ⁻¹)		1
	Taxa Natural de Absorção (% mês ⁻¹)	Carbono =	1 (Krug et al., 2002)
	Taxa de Emissão Pós-Fogo (% mês ⁻¹)		20 - 40
	Taxa de Absorção Pós-Fogo (% mês ⁻¹)		10 - 30

*Todos as taxas se mantêm para a segunda queimada, exceto a taxa de decremento pós fogo das árvores que aumenta para 60% (evidência).

Simulações

Simulamos o comportamento e o efeito do fogo utilizando o software Vensim PLE (Vensim, 2017). A descrição detalhada das equações utilizadas então representadas na seção de [Material Suplementar](#). Criamos dois cenários de frequência de fogo: 1) com uma queimada (1Q) e 2) com duas queimadas bienais (2QB). Essas simulações são referentes ao período da queimada no final da estação seca (especificamente em setembro). Também testamos diferentes cenários de DPV, vento e combustível fino para simular os seus efeitos sobre o comportamento do fogo e emissões de carbono.

Pressupostos do Modelo

O modelo BEFIRE tem os seguintes pressupostos:

- a. A vegetação é uma savana nativa de Cerrado;
- b. O terreno é plano;
- c. O combustível fino está distribuído espacialmente de forma contínua;
- d. A queimada é de superfície;
- e. O fogo consome principalmente o combustível fino até 2 metros de altura;
- f. A queimada é realizada no sentido do vento;

Limitações do Modelo

O modelo BEFIRE não considera:

- a. O risco de ignição e padrões de espalhamento do fogo;
- b. O efeito da composição de espécies sobre o comportamento e efeito do fogo;
- c. A influência da topografia sobre o comportamento do fogo.
- d. A frequência natural do fogo;

As limitações descritas são justificadas pela falta de conhecimento empírico, suficiente para parametrizar o nosso modelo.

Resultados

As simulações de 1Q demonstraram diferentes padrões de recuperação da biomassa pós-fogo, entre a biomassa de árvores, arbustos, herbáceas e gramíneas, e do balanço de carbono atmosférico (**Fig. III- 6**). Onde, a biomassa de árvores, herbáceas e gramíneas se recuperou de forma mais rápida, enquanto a biomassa de arbustos se recuperou lentamente ao longo do tempo, bem como a recuperação da quantidade de carbono emitido. A biomassa de árvores se recuperou em torno de 12 meses e a biomassa de herbáceas e gramíneas em torno de 15 meses, enquanto que a biomassa de arbustos não se recuperou durante o tempo de simulação de 48 meses. A quantidade de carbono emitida durante a queimada (0.2 kg/m^2) foi novamente assimilada pela vegetação em torno de 48 meses.

As simulações de 2QB, também demonstraram a recuperação diferenciada da biomassa de árvores, arbustos, herbáceas e gramíneas, bem como o retorno da quantidade de carbono emitida durante a queimada (**Fig. III- 7**). Essas simulações demonstram que em um intervalo de tempo de dois anos, a biomassa de herbáceas e gramíneas perdida durante a queimada se recupera, enquanto que, a biomassa de arbustos e árvores diminui linearmente ao longo do tempo, sendo esse declínio mais acentuado no caso da biomassa de arbusto. Além disso, a proporção perdida da biomassa de árvores foi maior a partir da segunda queimada (1° queimada = 40% (dado empírico); 2° queimada = 60% (dado não empírico)). Essas reduções na biomassa de árvores e arbustos refletem no balanço de carbono atmosférico, pois impedem que a quantidade de carbono emitida durante a queimada (*uncommitted emissions*) seja completamente absorvida pela vegetação nesse intervalo tempo.

Nossas simulações também demonstraram que as variações nos valores de DPV, velocidade do vento e combustível fino alteraram os valores de velocidade do fogo, intensidade do fogo, calor liberado e carbono emitido (**Tab. III- 3**), onde maiores valores de DPV, vento e combustível fino resultaram em maiores valores de velocidade do fogo, intensidade do fogo, calor liberado, combustível fino consumido e carbono emitido.

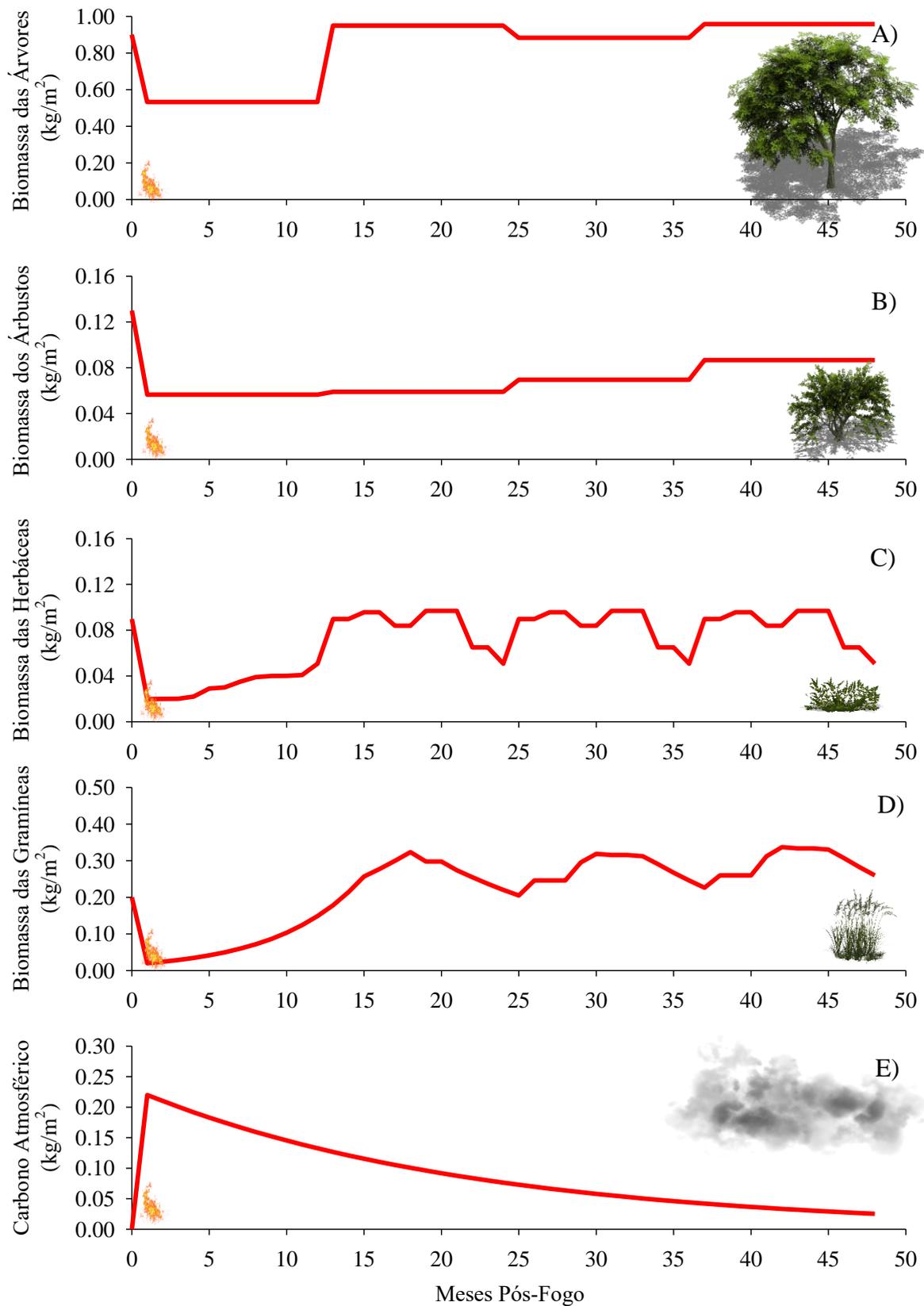


Fig. III- 6 Simulações da recuperação pós-fogo (uma queimada) da biomassa de A) árvore, B) arbustos, C) herbáceas, D) gramíneas e E) balanço de carbono atmosférico (*Uncommitted emissions*) para savanas brasileiras (cerrado típico) pelo modelo BEFIRE.

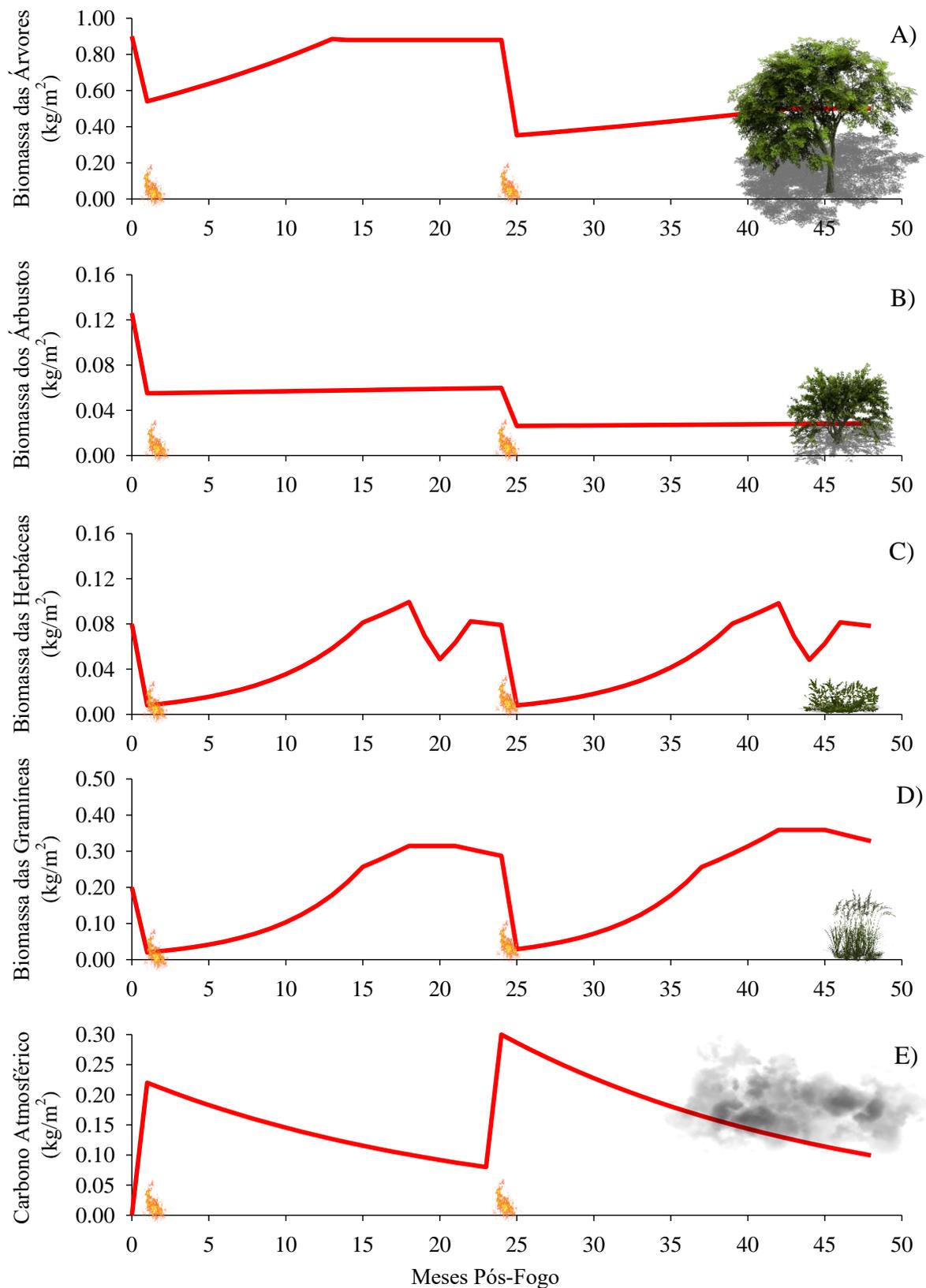


Fig. III- 7 Simulações da recuperação pós-fogo (duas queimadas bienais) da biomassa de A) árvore, B) arbustos, C) herbáceas, D) gramíneas e E) balanço de carbono atmosférico para savanas brasileiras (cerrado típico) pelo modelo BEFIRE.

Tab. III- 3 Simulações do comportamento do fogo e emissões de carbono para savanas brasileiras (cerrado típico) pelo modelo BEFIRE utilizando três cenários (* entradas 1,2,3) de combustível fino e microclima.

Variáveis do Modelo			
Entrada	1	2	3
Combustível Fino (kg/m ²)	0.6	0.7	0.8
Déficit de Pressão de Vapor d'água (kPa)	3	4	5
Vento (m/s)	2	3	4
Saída			
Velocidade do Fogo (m/s)	0.58	0.79	0.94
Combustível Fino Consumido (kg/m ²)	0.57	0.67	0.76
Intensidade do Fogo (kJ/(ms))	5158	8148	11124
Calor Liberado (kJ/m ²)	8835	10308	11780
Carbono Emitido (kg/m ²)	Total (100%)	0.19	0.23
	Herbáceo – Graminoso (80%)	0.15	0.18
	Arbóreo – Arbustivo (20%)	0.04	0.05

*Cenários com valores crescentes de combustível fino, déficit de pressão de vapor d'água e velocidade do vento.

Discussão

A biomassa das árvores se recupera mais rapidamente após um evento de queima em relação aos outros estratos, pois os indivíduos desse estrato vegetal estão mais protegidos aos danos causados pelo fogo, por apresentarem maior altura, diâmetro do caule e espessura de casca (Hoffmann et al., 2003). Dessa forma, os danos provocados pelo fogo estão geralmente associados a danos parciais no indivíduo, como a perda da copa (ou *Topkill*) (Hoffmann et al., 2009; Hoffmann and Solbrig, 2003), fato que permite a regeneração mais rápida via rebrota da copa ou do fuste principal (Moreira et al., 2008) (**Fig. III- 8**). Já em indivíduos de menor porte (< 2 m) (Sato, 1996), como os do estrato arbustivo, o fogo pode provocar a morte total indivíduo em função da maior exposição as altas temperaturas das chamas o que dificulta sua regeneração (Hoffmann et al., 2009; Moreira et al., 2008).

Por outro lado, com o aumento da frequência de fogo, a recuperação da biomassa de árvores declina, pois intervalos de queima de dois anos podem não ser suficientes para o espessamento da casca das rebrotas geradas após o fogo ou para o crescimento do fuste além da altura de maior exposição às chamas (Hoffmann et al., 2009; Medeiros and Miranda, 2008). Experimentos em campo também demonstraram o declínio da biomassa arbórea em savana brasileira após três (Rios, 2016) e cinco queimadas prescritas bienais

(Sato, 2003) (**Fig. III- 9**). Além disso, intervalos de queima menores que três anos podem impedir que a vegetação reabsorva a quantidade de nutrientes perdidos durante a queima (Pivello and Coutinho, 1992).

O declínio da biomassa de árvores e arbustos devido a queimas sucessivas impedem com que o carbono emitido durante a queimada seja absorvido pela vegetação ao longo do tempo (Sato, 2003). Além disso, queimadas recorrentes têm impacto na emissão de carbono não só como consequência da combustão de biomassa vegetal, mas também com relação às emissões pelo solo, após às queimadas (Pinto et al., 2002; Santos, 1999). Áreas queimadas em savanas brasileiras apresentam maiores fluxos de respiração do solo em comparação a áreas não queimadas, principalmente durante a estação chuvosa (Pinto et al., 2002). É importante também considerar que no caso da mortalidade de árvores e arbustos, outros compartimentos da biomassa como material lenhoso e raízes tornam-se fontes de C para a atmosfera através da decomposição (*committed emissions*) (Davidson et al., 2002).

A biomassa de herbáceas e de gramíneas se recupera rapidamente, mesmo após queimadas bienais, pois a passagem de fogo reduz a cobertura arbórea, promovendo um microclima com maiores temperaturas e exposição solar, fato que favorece a germinação desses estratos (Musso et al., 2015). A exclusão do fogo torna a temperatura do solo mais estável, dificultando a germinação de espécies de Cerrado que necessitam de flutuações das temperaturas para quebrar a dormência de suas sementes (Kolb et al., 2016). Experimentos em campo também demonstraram que a biomassa de herbáceas e gramíneas em savanas brasileiras se mantem após cinco queimadas bienais (Sato, 2003) (**Fig. III- 9**). Além disso a proporção de biomassa viva e morta do combustível fino é a mesma depois de um ano (Andrade, 1998). Neste caso, o manejo do fogo visando reduzir a quantidade de combustível fino para reduzir a ocorrência de incêndios florestais pode não ser eficaz, devido a rápida recuperação da biomassa e qualidade desse estrato.

As gramíneas correspondem a aproximadamente 70% da biomassa de combustível fino (Andrade, 1998; Hoffmann et al., 2012b). Assim, esse estrato é responsável pela maior parte das emissões de carbono após a ocorrência de fogo. Além disso, a proporção de biomassa oxidada após a passagem de fogo corresponde a 100% da biomassa morta e 62% da biomassa viva do combustível fino nas savanas brasileiras (H.S. Miranda, dados não-publicados in Krug et al. (2002)). Neste caso, podemos presumir que queimadas no final da estação seca provocariam maiores emissões de carbono, pois a biomassa de gramíneas mortas é maior durante esse período em relação à estação chuvosa (Silva and Haridasan, 2007).

Modelos matemáticos de comportamento do fogo e emissões de carbono têm melhorado o conhecimento técnico e a capacidade de decisões para elaboração de estratégias manejo do fogo na África do Sul (Van Wilgen et al., 2007, 2004), Austrália (Cruz et al., 2016) e Estados Unidos (Finney, 2006), principalmente pelo sistema de modelos baseados no modelo de Rothermel (1972), incorporados aos softwares “BehavePlus” (Andrews, 2014) e “FlamMap” (Finney, 2006). Esses modelos são tidos como eficientes para prever os padrões de velocidade e espalhamento do fogo, bem como altura da chama e calor liberado, entre outros. A Austrália é um dos países com maior conhecimento e experiência no uso planejado do fogo (Oliveras and Bell, 2008). Gestores australianos utilizam o monitoramento e o manejo do combustível para reduzir o risco de queimadas não planejadas ou para reduzir a extensão de área queimada (Whitehead et al., 2008). Esses gestores também realizam queimadas prescritas no início da estação seca, pois a temperatura do ar é menor e a umidade do ar é maior, fato que impede o consumo de combustível fino, e assim reduz as emissões de gases de efeitos estufa (Price et al., 2012).

O uso de modelos matemáticos para prever o comportamento e o efeito do fogo é um passo importante no manejo do fogo no bioma Cerrado. O modelo BEFIRE pode ser usado para auxiliar na tomada de decisão associada às recentes políticas de manejo do fogo em formações savânicas no bioma Cerrado. Neste caso, sugerimos o monitoramento do DPV e do vento para realizar queimadas prescritas com maior velocidade do fogo, de forma que cause menores impactos sobre a vegetação lenhosa das savanas, uma vez que, uma menor velocidade do fogo pode provocar a ignição do caule e portanto causar danos graves ao tecido do câmbio vascular, como a morte do indivíduo (Kayll, 1968; Silva and Miranda, 1996). Também recomendamos o monitoramento da quantidade de combustível fino, para evitar que os incêndios não previstos na área manejada sejam de alta intensidade ou que a quantidade de calor liberado seja alta.

Se por um lado, as queimadas bienais prejudicam a biomassa de arbustos e árvores, por outro, as herbáceas e gramíneas precisam ser manejadas com fogo para manter a biodiversidade e o funcionamento do ecossistema (Abreu et al., 2017; Pinheiro and Durigan, 2009). Assim, indicamos o uso de queimadas prescritas configuradas em mosaicos com diferentes frequência de fogo (ausência de fogo, queimada bienal e quadrienal). De forma que, em alguns locais sejam realizadas queimadas prescritas bienais e quadrienais para manter o funcionamento desses ecossistema e em outros locais indicamos a prevenção e o combate de queimadas não programadas em intervalos menores que quatro anos visando conservar a estrutura da vegetação arbórea e arbustiva e permitir a

presença de espécies exclusivas de cada regime de fogo. Além disso, áreas com variações estruturais e na composição florística podem servir de refúgio para fauna em casos de incêndios florestais. Tais fatores indicam assim que uma avaliação criteriosa dos múltiplos propósitos e consequências do manejo do fogo bem como recortes regionais são essenciais para garantir a conservação e o funcionamento de ecossistemas de Cerrado.

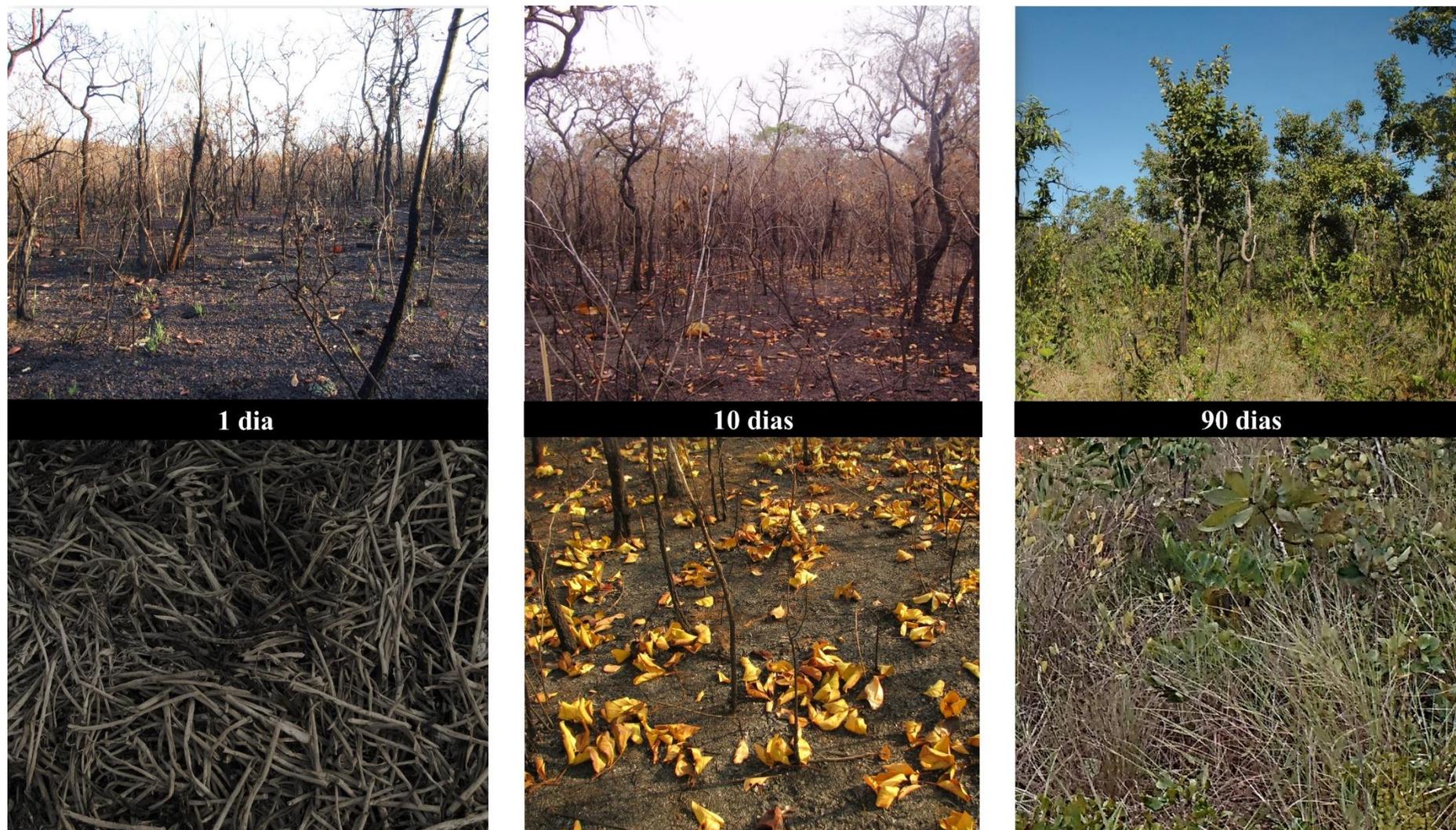


Fig. III- 8 Recuperação pós-fogo da vegetação em uma savana brasileira (cerrado típico) no Parque do Bacaba, Mato Grosso.

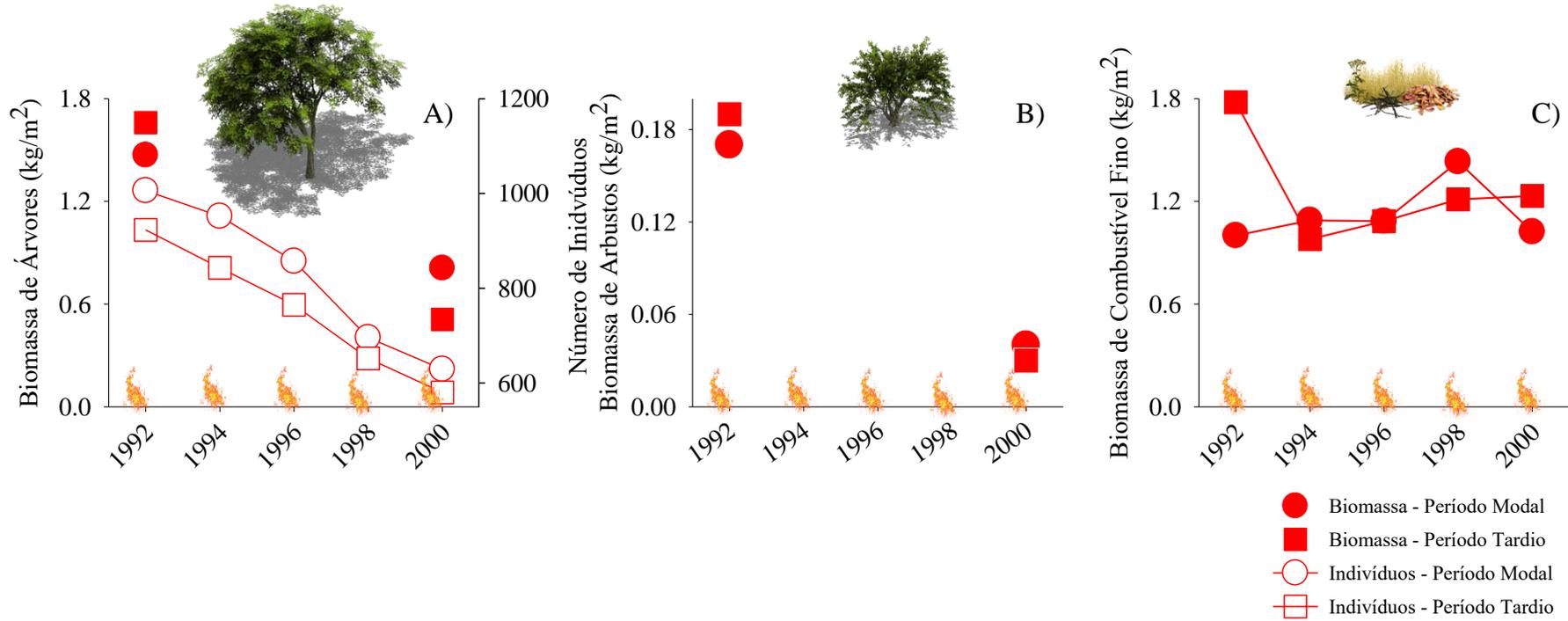


Fig. III- 9 Queimadas bienais realizadas nos períodos modal (agostos) e tardio (setembro) e seus efeitos sobre a estrutura de A) árvores, B) arbustos e C) combustível fino em uma savana brasileira (cerrado típico) na Reserva Ecológica do IBGE, Distrito Federal (modificado de Sato (2003)).

Os impactos da época de queima também vêm sendo estudados no bioma Cerrado (Rissi et al., 2017; Sato, 2003, 1996), a partir da comparação entre os efeitos das queimadas: precoce (início da estação seca / final de junho), modal (no meio da seca / início de agosto) e tardia (final da seca / final de setembro) (Dias and Miranda, 2010). Esses estudos têm demonstrado que, considerando eventos isolados de fogo, o período de queima tem pouco efeito sobre a vegetação lenhosa (Rissi et al., 2017; Sato, 2003, 1996). Entretanto, com queimadas frequentes esses efeitos podem ser intensificados, provocando reduções no estoque de carbono da vegetação lenhosa, sendo que essas reduções podem chegar a ~9% em queimadas precoce, 39 % em queimadas modais e 55% em queimadas tardias (Sato, 2003). Assim, sugerimos que modelos futuros considerem as interações entre frequência e período de queima.

Simulações considerando conjuntamente o risco de fogo, os padrões de espalhamento do fogo e os impactos do regime do fogo ao longo do tempo foram desenvolvidas para a Amazônia usando modelos “*Fire ignition, Spread and Carbon components - FISC*” e o “*Carbon and Land use Change - CARLUC*” (Silvestrini et al., 2011; Soares-Filho et al., 2012). Esses modelos avaliaram simultaneamente múltiplos preditores de ocorrência de fogo, por exemplo, variáveis climáticas, antropogênicas e biofísicas. Além disso, esses modelos são úteis para prever o comportamento e os impactos do fogo, tanto em savanas (Berjak and Hearne, 2002) quanto em formações florestais (Soares-Filho et al., 2012, 2002). Assim, recomendamos uma abordagem semelhante para estudos de modelagem de fogo no Cerrado.

Apesar do modelo BEFIRE ter demonstrado ser uma ferramenta útil para prever os impactos das diferentes frequências de fogo em áreas de savanas brasileiras, ainda podemos melhorar avançar em relação à expansão das escalas estudo, em termos espaciais e temporais. Assim como próximos passos desse modelo objetivamos: 1) incluir no modelo BEFIRE equações que representem a dinâmica da biomassa dos outros tipos de vegetação do Cerrado, como as formações campestres e florestais; 2) acoplar o modelo BEFIRE aos modelos espaciais FISC e CARLUC desenvolvidos inicialmente para a Amazônia e que serão ajustados para o Cerrado; 3) Simular diferentes períodos de queima, como precoce, modal e tardia por um intervalo de tempo mais longo; 4) validar o modelo BEFIRE através de queimadas experimentais considerando diferentes regimes de queima e 5) inserir as emissões de outros gases de efeito estufa, como metano e óxido nitroso.

Conclusão

O modelo BEFIRE demonstrou ser uma ferramenta útil para prever os impactos de queimadas consecutivas sobre a biomassa da vegetação savânica. Os impactos mais importantes previstos pelo modelo estão associados ao declínio da biomassa de árvores e arbustos após queimadas bienais, enquanto a biomassa de herbáceas e gramíneas se recupera após a ocorrência do mesmo evento. Essas previsões foram validadas com observações empíricas. Assim, intervalos de queima menores que quatro anos não são indicados para a preservação da estrutura da vegetação arbórea-arbustiva típica do Cerrado. Dessa forma, indicamos o uso de queimadas prescritas configuradas em mosaicos de queima com frequência de fogo diferentes, a partir da definição dos propósitos prioritários do manejo. De forma que, em alguns locais sejam realizadas queimadas prescritas bienais, para controlar a quantidade de biomassa de gramíneas e conseqüentemente reduzir a extensão de área queimada e as emissões de carbono, e em outros locais indicamos a prevenção e o combate de queimadas não programadas em intervalos menores que quatro anos visando conservar a estrutura da vegetação arbórea e arbustiva.

Material Suplementar

Interações entre vegetação, microclima e fogo em Savana brasileira: Modelos baseados em processos

¹Letícia Gomes, ²Britaldo Soares Filho, ²Lucas Rodrigues, ¹Heloisa Sinátora Miranda,
¹Mercedes Maria da Cunha Bustamante

¹Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

²Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Este documento fornece um material suplementar ao artigo correspondente, apresentado em três seções: 2) elementos básicos dos modelos de estoque e fluxo; 1) diagrama do modelo completo no software Vensim, incluindo todas as variáveis e parâmetros; e 3) equações matemáticas, constantes e referências utilizadas.

1. ELEMENTOS BÁSICOS DOS MODELOS DE ESTOQUE E FLUXO

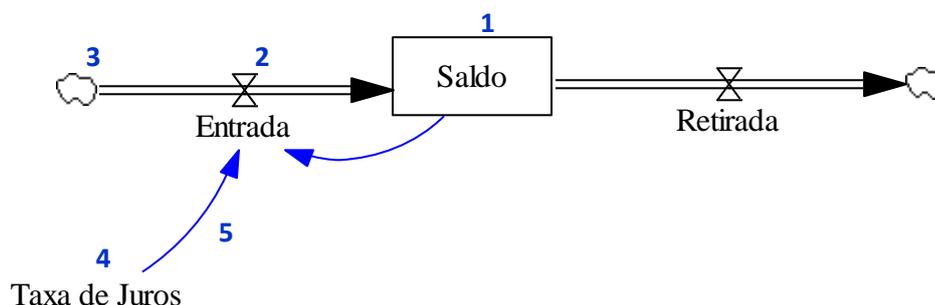


Fig. S III- 1 Elementos básicos de um modelo de estoque e fluxos.

Significado:

- **Estoque (1):** Representa o saldo de algum recurso (como biomassa, número de indivíduos, número de espécies e quantidade de água) a partir de suas perdas e ganhos temporais. Esse estado depende do que aconteceu no tempo passado.
- **Fluxos (2):** Representa o transporte de recursos no sistema. Os fluxos são vazões controladas por equações e são medidos em unidades de grandeza (como gramas, quilogramas e metros) por unidade de tempo (como meses, anos e segundos).
- **Fonte externa (3):** Representa alguma fonte de recurso que está fora do escopo de interesse do modelo em estudo, assim, o fluxo retira recursos da fonte externa

e transfere para o estoque. Os detalhes da fonte externa não são considerados no estudo do sistema representado pelo modelo.

- **Variáveis (4):** Representa os parâmetros que são usados no sistema ou na equação dos fluxos. Eventualmente uma variável pode assumir um valor que não varia, ou seja, uma constante.
- **Seta (5):** Informa a uma variável a existência de outra variável, que será usada em uma equação.

2. DIAGRAMA DO MODELO NO VENSIM

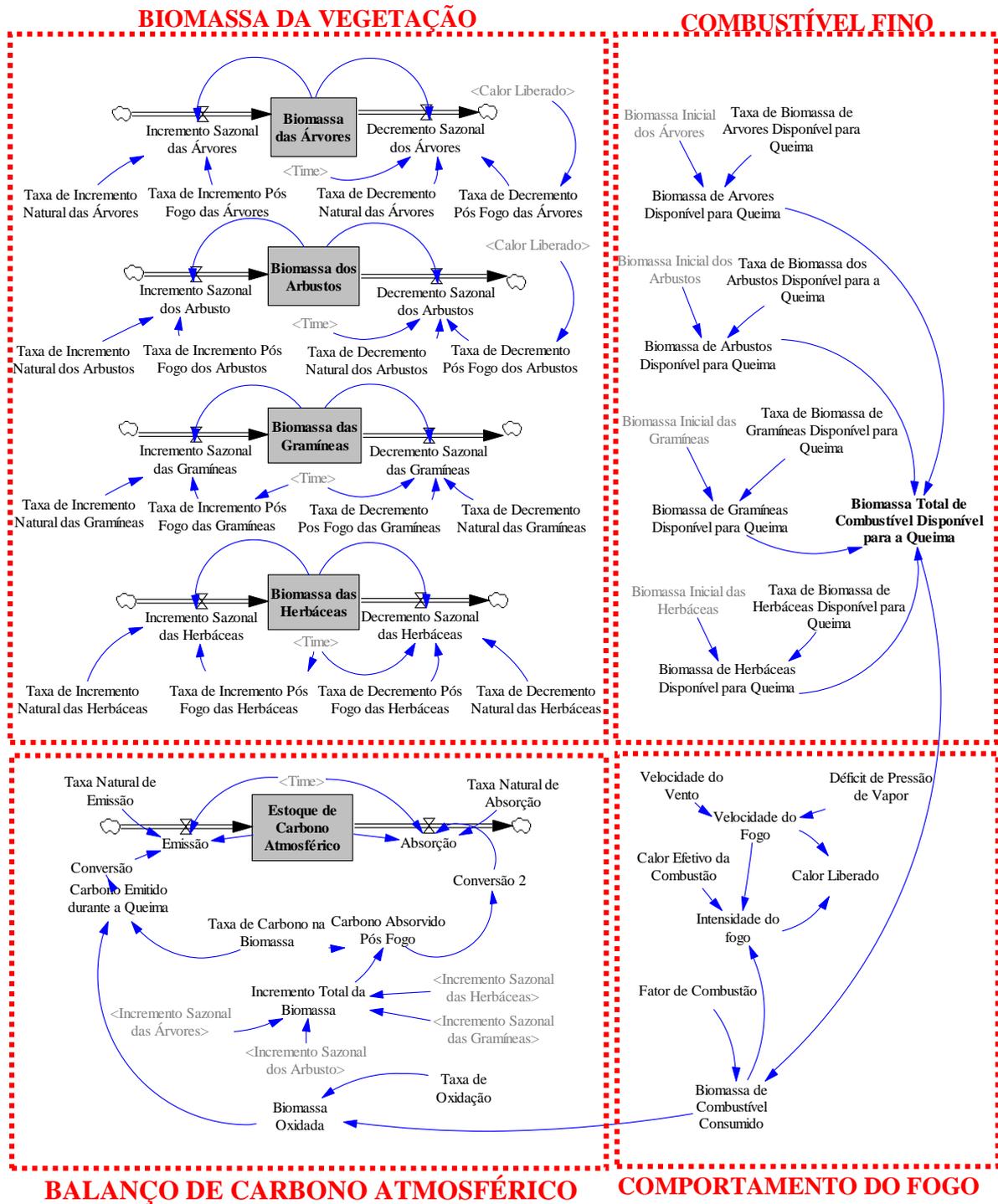


Fig. S III- 2. Diagrama do modelo BEFIRE na interface do software Vensim.

3. FORMULAÇÕES E DOCUMENTAÇÕES

A. Estoques

Biomassa das Árvores = INTEG (Incremento Sazonal das Árvores - Decremento Sazonal dos Árvores, Biomassa Inicial dos Árvores)

[Unidade = kg]

O estoque Biomassa das Árvores aumenta com a taxa de [Incremento Sazonal das Árvores](#) e diminui com a taxa [Decremento Sazonal dos Árvores](#) a partir da [Biomassa Inicial das Árvores](#).

Biomassa dos Arbustos = INTEG (Incremento Sazonal dos Arbusto-Decremento Sazonal dos Arbustos, Biomassa Inicial dos Arbustos)

[Unidade = kg]

O estoque Biomassa dos Arbustos aumenta com a taxa de [Incremento Sazonal dos Arbusto](#) e diminui com a taxa [Decremento Sazonal dos Arbustos](#) a partir da [Biomassa Inicial dos Arbustos](#).

Biomassa das Herbáceas = INTEG (Incremento Sazonal das Herbáceas-Decremento Sazonal das Herbáceas, Biomassa Inicial das Herbáceas)

[Unidade = kg]

O estoque Biomassa das Herbáceas aumenta com a taxa de [Incremento Sazonal das Herbáceas](#) e diminui com a taxa [Decremento Sazonal das Herbáceas](#) a partir da [Biomassa Inicial das Herbáceas](#).

Biomassa das Gramíneas = INTEG (Incremento Sazonal das Gramíneas-Decremento Sazonal das Gramíneas, Biomassa Inicial das Gramíneas)

[Unidades = kg]

O estoque Biomassa das Gramíneas aumenta com a taxa de [Incremento Sazonal das Gramíneas](#) e diminui com a taxa [Decremento Sazonal das Gramíneas](#) a partir da [Biomassa Inicial das Gramíneas](#).

Estoque de Carbono Atmosférico= INTEG (Emissão-Absorção,1)
[Unidades = kg]

O Estoque de Carbono Atmosférico aumenta com a taxa de [Emissão](#) e diminui com a taxa [Absorção](#) a partir da [Biomassa inicial do Estoque de Carbono Atmosférico](#).

B. Incremento Sazonal dos Estoques

Incremento Sazonal das Árvores = IF THEN ELSE (Biomassa das Árvores >= 0.9, Biomassa das Árvores*Taxa de Incremento Natural das Árvores, Biomassa das Árvores*Taxa de Incremento Pós Fogo das Árvores)
[Unidade: kg/Mês]

Se a [Biomassa das Árvores](#) for maior ou igual a 0.9, então multiplica-se pela [Taxa de Incremento Natural das Árvores](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Incremento Pós Fogo das Árvores](#).

Incremento Sazonal dos Arbustos=IF THEN ELSE (Biomassa dos Arbustos >= 0.13, Biomassa dos Arbustos*Taxa de Incremento Natural dos Arbustos, Biomassa dos Arbustos*Taxa de Incremento Pós Fogo dos Arbustos)
[Unidade: kg/Mês]

Se a [Biomassa dos Arbustos](#) for maior ou igual a 0.13, então multiplica-se pela [Taxa de Incremento Natural dos Arbustos](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Incremento Pós Fogo dos Arbustos](#).

Incremento Sazonal das Herbáceas =IF THEN ELSE (Biomassa das Herbáceas>= 0.1, Biomassa das Herbáceas*Taxa de Incremento Natural das Herbáceas, Biomassa das Herbáceas*Taxa de Incremento Pós Fogo das Herbáceas)
[Unidade: kg/Mês]

Se a [Biomassa das Herbáceas](#) for maior ou igual a 0.1, então multiplica-se pela [Taxa de Incremento Natural das Herbáceas](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Incremento Pós Fogo das Herbáceas](#).

Incremento Sazonal das Gramíneas = IF THEN ELSE (Biomassa das Gramíneas >= 0.5, Biomassa das Gramíneas*Taxa de Incremento Natural das Gramíneas, Biomassa das Gramíneas*Taxa de Incremento Pós Fogo das Gramíneas)
[Unidade: kg/Mês]

Se a [Biomassa das Gramíneas](#) for maior ou igual a 0.5, então multiplica-se pela [Taxa de Incremento Natural das Gramíneas](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Incremento Pós Fogo das Gramíneas](#).

Emissão = IF THEN ELSE (Time = 1, Estoque de Carbono Atmosférico + Conversão, Estoque de Carbono Atmosférico*Taxa Natural de Emissão)

[Unidade: kg/Mês]

Se o [TIME](#) for igual a 1 (ou seja, período pós fogo), então multiplica-se a [Biomassa inicial do Estoque de Carbono Atmosférico](#) pela [Conversão](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa Natural de Emissão](#).

C. Decremento Sazonal dos Estoques

Decremento Sazonal dos Árvores = IF THEN ELSE (Time = 1, Biomassa das Árvores * Taxa de Decremento Pós Fogo das Árvores, Biomassa das Árvores * Taxa de Decremento Natural das Árvores)

[Unidade: kg/Mês]

Se o [TIME](#) for igual a 1 (ou seja, período pós fogo), então multiplica-se a [Biomassa Inicial das Árvores](#) pela [Taxa de Decremento Pós Fogo das Árvores](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Decremento Natural das Árvores](#).

Decremento Sazonal dos Arbustos = IF THEN ELSE (Time = 1, Biomassa dos Arbustos * Taxa de Decremento Pós Fogo dos Arbustos, Biomassa dos Arbustos * Taxa de Decremento Natural dos Arbustos)

[Unidade: kg/Mês]

Se o [TIME](#) for igual a 1 (ou seja, período pós fogo), então multiplica-se a [Biomassa dos Arbustos](#) pela [Taxa de Decremento Pós Fogo dos Arbustos](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Decremento Natural dos Arbustos](#).

Decremento Sazonal das Herbáceas = IF THEN ELSE (Time=1, Biomassa das Herbáceas*Taxa de Decremento Pós Fogo das Herbáceas, Biomassa das Herbáceas*Taxa de Decremento Natural das Herbáceas)

[Unidade: kg/Mês]

Se o [TIME](#) for igual a 1, então multiplica-se a [Biomassa Inicial das Herbáceas](#) pela [Taxa de Decremento Pós Fogo das Herbáceas](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Incremento Pós Fogo das Herbáceas](#).

Decremento Sazonal das Gramíneas = IF THEN ELSE (Time = 1, Biomassa das Gramíneas * Taxa de Decremento Pós Fogo das Gramíneas, Biomassa das Gramíneas * Taxa de Decremento Natural das Gramíneas)

[Unidade: kg/Mês]

Se o [TIME](#) for igual a 1 (ou seja, período pós fogo), então multiplica-se a [Biomassa das Gramíneas](#) pela [Taxa de Decremento Pós Fogo das Gramíneas](#), caso contrário multiplica-se pela [Taxa de Decremento Natural das Gramíneas](#).

Absorção = IF THEN ELSE (Time > 1, Estoque de Carbono Atmosférico * Conversão 2, Estoque de Carbono Atmosférico * Taxa Natural de Absorção)

[Unidade: kg/Mês]

Se a o TIME for maior que 1 (ou seja, período pós fogo), o Biomassa inicial do Estoque de Carbono Atmosférico será multiplicado pela Conversão 2 caso contrária será multiplicada pela Taxa Natural de Absorção.

D. Taxa de Incremento Natural dos Estoques

Taxa de Incremento Natural das Árvores = 0.002

[Unidades = 1/Mês]

Taxa de Incremento Natural dos Arbustos = 0.002

[Unidades = 1/Mês]

Taxa de Incremento Natural das Herbáceas = 0.002

[Unidades = 1/Mês]

Taxa de Incremento Natural das Gramíneas = 0.002

[Unidades = 1/Mês]

Taxa Natural de Emissão = 0.01

[Unidades = 1/Mês]

E. Taxa de Decremento Natural dos Estoques

Taxa de Decremento Natural das Árvores = 0.001

[Unidades = 1/Mês]

Taxa de Decremento Natural dos Arbustos = 0.001

[Unidades = 1/Mês]

Taxa de Decremento Natural das Herbáceas = 0.001

[Unidades = 1/Mês]

Taxa de Decremento Natural das Gramíneas = 0.001

[Unidades = 1/Mês]

Taxa Natural de Absorção = 0.01

[Unidades = 1/Mês]

F. Taxa de Incremento Pós Fogo dos Estoques

Taxa de Incremento Pós Fogo das Árvores = 0.42

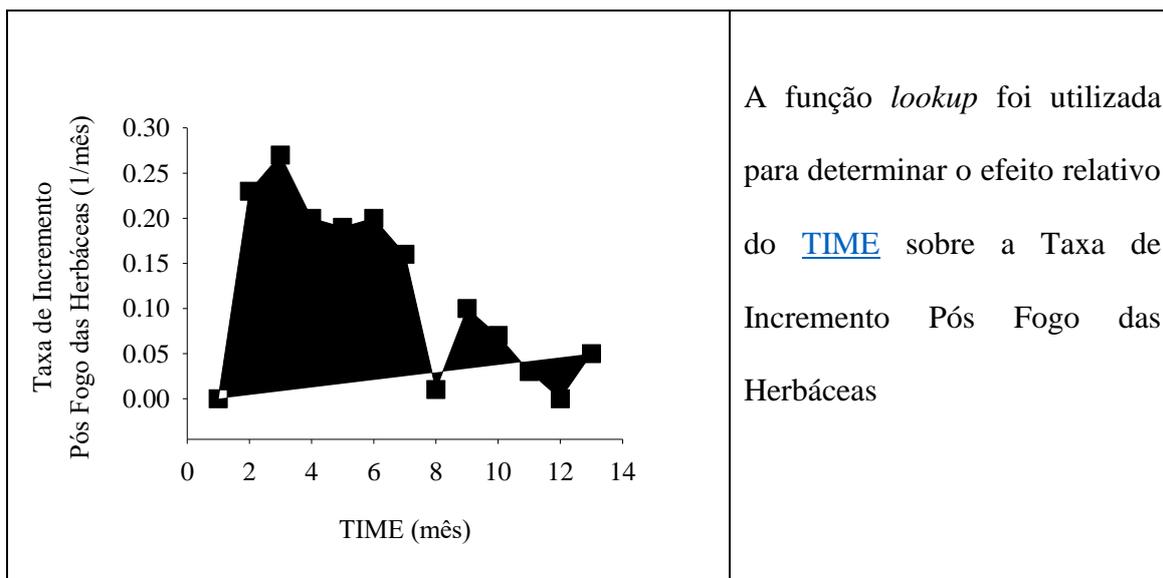
Unidades: 1/Mês

Taxa de Incremento Pós Fogo dos Arbustos = 0.004

Unidade: 1/Mês

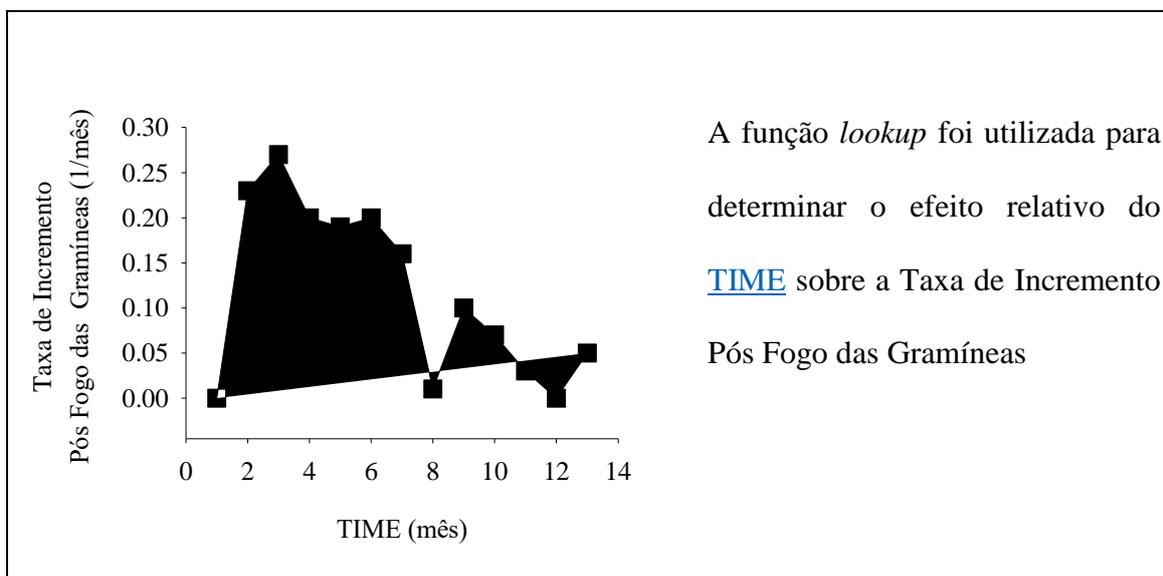
Taxa de Incremento Pós Fogo das Herbáceas = WITH LOOKUP (Time, ((0,0)-(13,0.27)],(1,0),(2,0.23),(3,0.27),(4,0.2),(5,0.19),(6,0.22),(7,0.16),(8,0.01),(9,0.1),(10,0.07),(11,0.03),(12,0),(13,0.05))

Unidade: 1/Mês



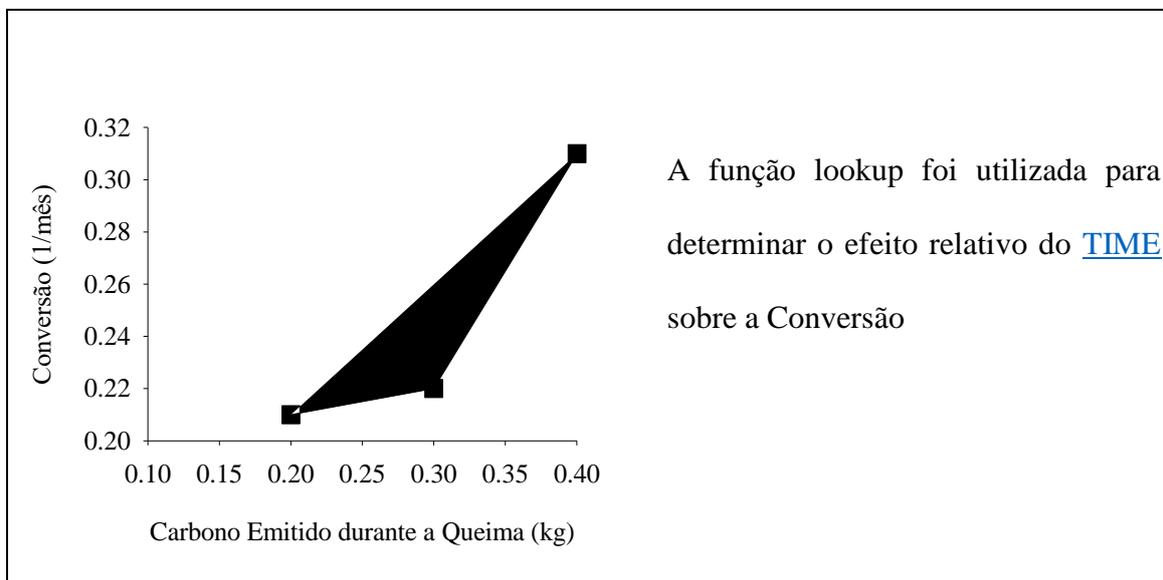
Taxa de Incremento Pós Fogo das Gramíneas = WITH LOOKUP (Time, ((0,0)-(13,0.3)],(1,0),(2,0.23),(3,0.27),(4,0.2),(5,0.19),(6,0.22),(7,0.16),(8,0.01),(9,0.1),(10,0.07),(11,0.03),(12,0),(13,0.05))

Unidade: 1/Mês



Conversão = WITH LOOKUP (Carbono Emitido durante a Queima, (((0.2,0)-(0.4,0.31)],(0.2,0.21),(0.3,0.22),(0.4,0.31)))

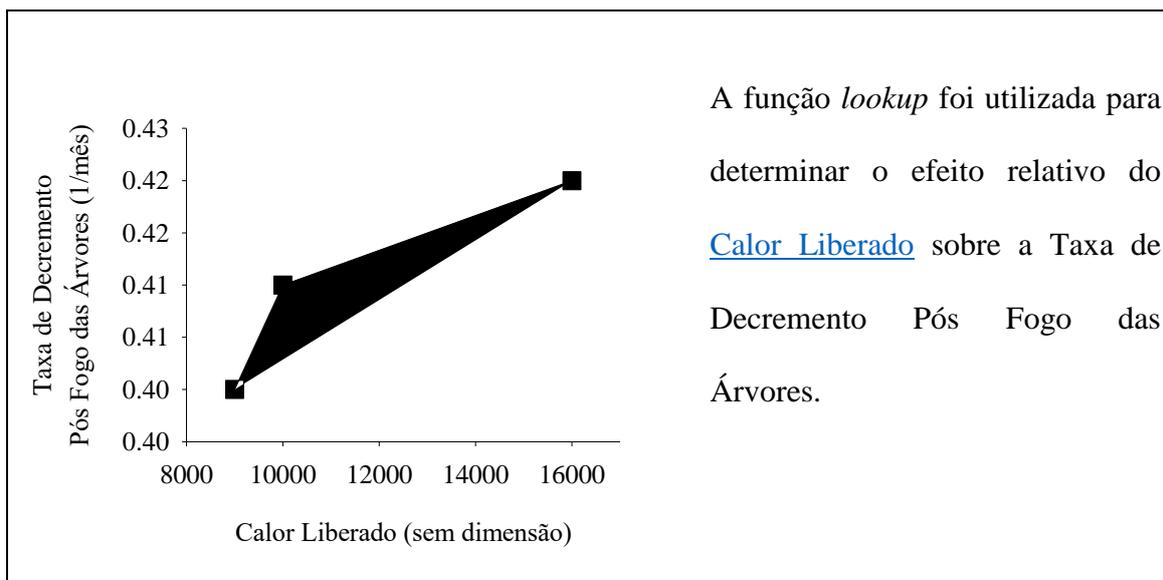
Unidade: 1/Mês



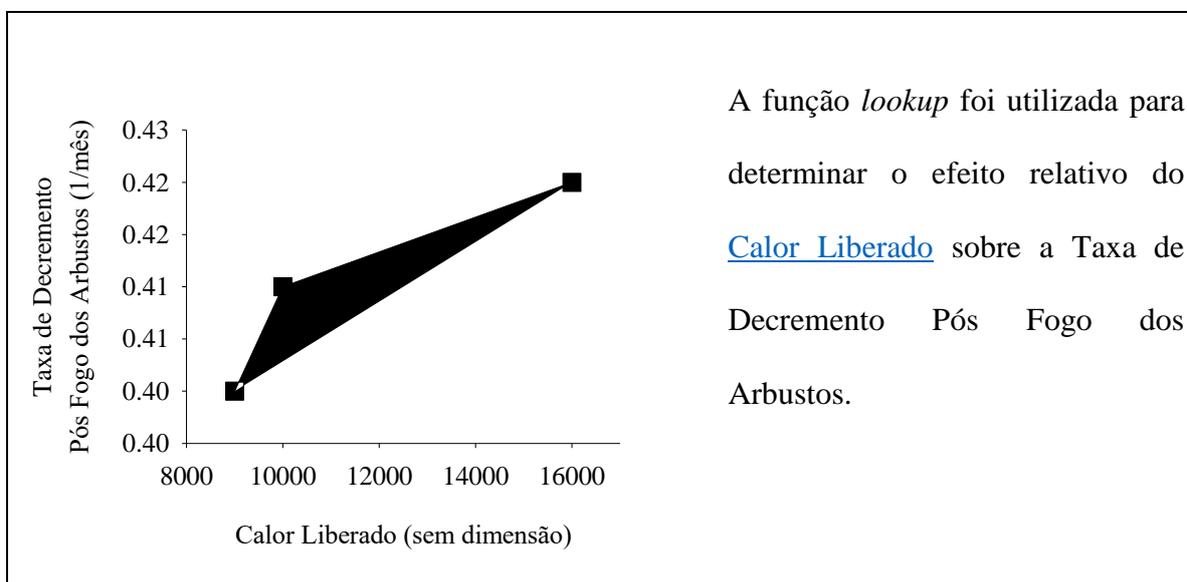
G. Taxa de Decremento Pós Fogo dos Estoques

Taxa de Decremento Pós Fogo das Árvores = WITH LOOKUP (Calor Liberado, (((9000,0.4)-(16000,0.42)],(9000,0.4),(10000,0.41),(16000,0.42))) e na segunda queimadas essa taxa aumenta para 0.6.

[Unidade = 1/mês]



Taxa de Decremento Pós Fogo dos Arbustos = WITH LOOKUP (Calor Liberado, (([9000,0.4)-(16000,0.6)],(9000,0.4),(10000,0.41),(16000,0.42)))
 [Unidade = 1/mês]



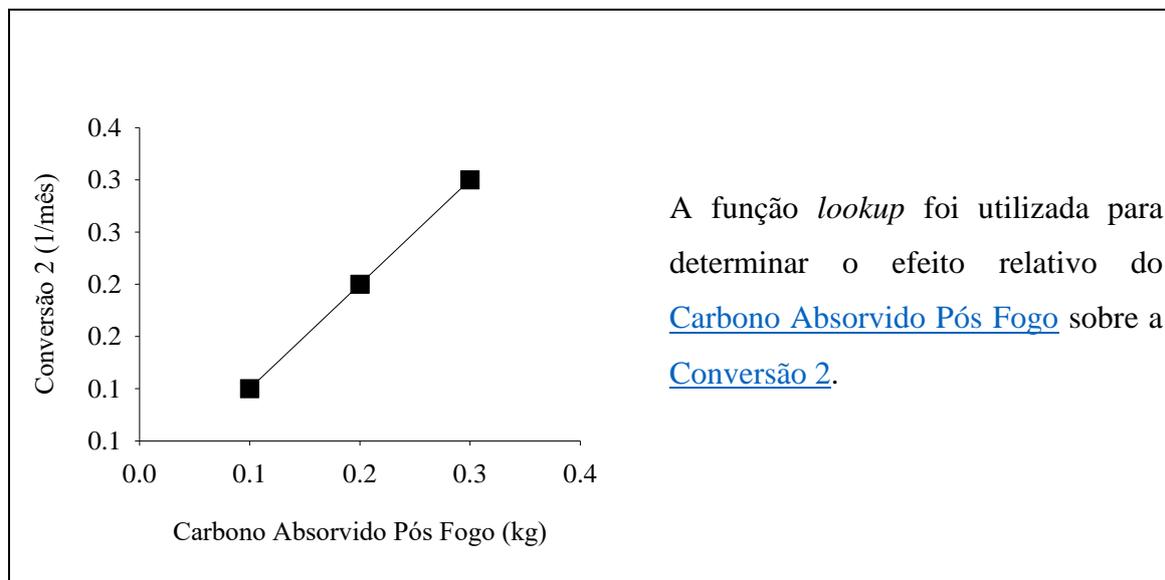
Taxa de Decremento Pós Fogo das Herbáceas = 0.85
 [Unidade = 1/mês]

Taxa de Decremento Pós Fogo das Gramíneas = 0.85

[Unidade = 1/mês]

Conversão 2 = WITH LOOKUP (Carbono Absorvido Pós Fogo, ((0,0)-(1000,10)],(0.1,0.1),(0.2,0.2),(0.3,0.3))

[Unidade = 1/mês]



H. Biomassa dos estoques disponível para a queima

Biomassa de Árvores Disponível para Queima = Biomassa Inicial dos Árvores*Taxa de Biomassa de Árvores Disponível para Queima

[Unidade = kg]

A Biomassa de Árvores Disponível para Queima é dada pelo produto da [Biomassa Inicial das Árvores](#) pela [Taxa de Biomassa de Árvores Disponível para Queima](#).

Biomassa de Arbustos Disponível para Queima = (Biomassa Inicial dos Arbustos*Taxa de Biomassa dos Arbustos Disponível para a Queima)

[Unidade = kg]

A Biomassa de Arbustos Disponível para Queima é dada pelo produto da [Biomassa Inicial dos Arbustos](#) pela [Taxa de Biomassa dos Arbustos Disponível para a Queima](#).

Biomassa de Herbáceas Disponível para Queima = Biomassa Inicial das Herbáceas*Taxa de Biomassa de Herbáceas Disponível para Queima

[Unidade = kg]

A Biomassa de Herbáceas Disponível para Queima é dada pelo produto da [Biomassa Inicial das Herbáceas](#) pela [Taxa de Biomassa de Herbáceas Disponível para Queima](#).

Biomassa de Gramíneas Disponível para Queima = Biomassa Inicial das Gramíneas*Taxa de Biomassa de Gramíneas Disponível para Queima
[Unidade = kg]

A Biomassa de Gramíneas Disponível para Queima é dada pelo produto da [Biomassa Inicial das Gramíneas](#) pela [Taxa de Biomassa de Gramíneas Disponível para Queima](#).

I. Taxa de Biomassa dos estoques Disponível para Queima

Taxa de Biomassa de Árvores Disponível para Queima = 0.01
[Unidades = sem dimensões] (Nardoto et al., 2006)

Taxa de Biomassa dos Arbustos Disponível para a Queima = 0.001
[Unidades = sem dimensões] (Nardoto et al., 2006)

Taxa de Biomassa de Herbáceas Disponível para Queima = 0.99
[Unidades = sem dimensões] (Andrade, 1998)

Taxa de Biomassa de Gramíneas Disponível para Queima = 0.99
[Unidades = sem dimensões] (Andrade, 1998)

J. Equações

Velocidade do Fogo = $0.38 * Ln(DPV) + 0.24 * Ln(Vento)$
[Unidade: ms] (Gomes et al. 2018, *Capítulo 2*)

A velocidade do fogo é obtida pela equação linear dada pelo [Déficit de Pressão de Vapor](#) e pela [Velocidade do Vento](#).

Intensidade do fogo = Biomassa de Combustível Consumido*Calor Efetivo da Combustão*Velocidade do Fogo
[Unidade = kg*m] (G M Byram, 1959)

A Intensidade do fogo é dada pelo produto da [Biomassa de Combustível Consumido](#); [Calor Efetivo da Combustão](#) pela [Velocidade do Fogo](#).

Calor Liberado = Intensidade do fogo/Velocidade do Fogo
[Unidades = kg] (Luke and McArthur, 1978; Rothermel and Deeming, 1980)

O Calor Liberado é dado pelo cociente da [Intensidade do fogo](#) pela [Velocidade do Fogo](#).

Biomassa de Combustível Consumido = Biomassa Total de Combustível Disponível para a Queima*Fator de Combustão
[Unidade = kg]

A Biomassa de Combustível Consumido é dada pelo produto da [Biomassa Total de Combustível Disponível para a Queima](#) e [Fator de Combustão](#).

Biomassa Oxidada = Biomassa de Combustível Consumido*Taxa de Oxidação
[Unidade = kg] (Krug et al., 2002)

A Biomassa Oxidada é dada pelo produto da [Biomassa de Combustível Consumido](#) pela [Taxa de Oxidação](#).

Biomassa Total de Combustível Disponível para a Queima= Biomassa de Árvores Disponível para Queima + Biomassa de Arbustos Disponível para Queima + Biomassa de Herbáceas Disponível para Queima + Biomassa de Gramíneas Disponível para Queima
[Unidade = kg]

A Biomassa Total de Combustível Disponível para a Queima é dada pelo produto da [Biomassa de Árvores Disponível para Queima](#); [Biomassa de Arbustos Disponível para Queima](#); [Biomassa de Herbáceas Disponível para Queima](#) e [Biomassa de Gramíneas Disponível para Queima](#).

Carbono Emitido durante a Queima = Biomassa Oxidada*Taxa de Carbono na Biomassa
Unidade: kg (Krug et al., 2002)

O Carbono Emitido durante a Queima é dado pelo produto da [Biomassa Oxidada](#) pela [Taxa de Carbono na Biomassa](#).

Carbono Absorvido Pós Fogo = Incremento Total da Biomassa*Taxa de Carbono na Biomassa
[Unidade = kg/Mês]

O Carbono Absorvido Pós Fogo é dado pelo produto da [Incremento Total da Biomassa](#) pela [Taxa de Carbono na Biomassa](#).

Incremento Total da Biomassa = Incremento Sazonal das Árvores + Incremento Sazonal dos Arbustos + Incremento Sazonal das Herbáceas + Incremento Sazonal das Gramíneas
[Unidade = kg/Mês]

O Incremento Total da Biomassa é dado pela soma do [Incremento Sazonal das Árvores](#); [Incremento Sazonal dos Arbustos](#); [Incremento Sazonal das Herbáceas](#) e [Incremento Sazonal das Gramíneas](#).

K. Variáveis de Entrada

Velocidade do Vento= 2
[Unidade = sem dimensão]

Déficit de Pressão de Vapor= 3
[Unidade = sem dimensão]

Biomassa Inicial das Árvores = 0.9

[Unidade = kg]

Biomassa Inicial dos Arbustos = 0.13

[Unidade = kg]

Biomassa Inicial das Herbáceas = 0.08

[Unidade = kg]

Biomassa Inicial das Gramíneas = 0.2

[Unidade = kg]

Biomassa inicial do Estoque de Carbono Atmosférico = 0

[Unidade = kg]

L. Constantes

Calor Efetivo da Combustão = 15500

[Unidade = sem dimensão] (Griffin et al., 1984)

Fator de Combustão = 0.89 (Krug et al., 2002; Miranda et al., 2010)

[Unidade = sem dimensão]

Taxa de Carbono na Biomassa = 0.45

[Unidade = sem dimensão] (Krug et al., 2002)

Taxa de Oxidação = 0.6 (Krug et al., 2002)

[Unidade = sem dimensão]

M. Tempo do Modelo

TIME STEP = 1

[Unidade = Mês [0,?]]

O passo do tempo para a simulação é um mês.

INITIAL TIME = 0

[Unidade = Mês]

O tempo final da simulação

SAVEPER = TIME STEP

[Unidade = Mês [0,?]]

A frequência com a qual a saída é armazenada

FINAL TIME = 50

[Unidade = Mês]

O tempo final da simulação

Referências

- Abreu, R.C.R., Hoffmann, W.A., Vasconcelos, H.L., Pilon, N.A., Rossatto, D.R., Durigan, G., 2017. The biodiversity cost of carbon sequestration in tropical savanna. *Sci. Adv.* 3, 1–8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701284>
- Alexander, M.E., Cruz, M.G., 2012. Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. *Int. J. Wildl. Fire* 21, 95–113. <https://doi.org/10.1071/WF11001>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration, Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Almeida, M.A., 2012. Modelagem da propagação do fogo como ferramenta de auxílio à tomada de decisão no combate e prevenção de incêndios no Parque Nacional das Emas, GO. Tese, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Andrade, L.A.Z., Miranda, H.S., 2010. O fator fogo no banco de sementes, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime Do Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados Do Projeto Fogo*. IBAMA, Brasília, pp. 103–119.
- Andrade, S.M.A., 1998. Dinâmica do combustível fino e produção primária do estrato rasteiro de áreas de campo sujo de Cerrado submetidas a diferentes regimes de queimas. Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília.
- Andrews, P.L., 2014. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *Int. J. Wildl. Fire* 23, 21–33.
- Angerhofer, B., Angelides, M., 2000. System dynamics modelling in supply chain management: research review. 2000 Winter Simul. Conf. J. 342–351. <https://doi.org/10.1109/WSC.2000.899737>
- Araújo, F.M., Ferreira, L.G., 2015. Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian Savanna. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 36, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.10.009>
- Araújo, F.M., Ferreira, L.G., Arantes, A.E., 2012. Distribution patterns of burned areas in the Brazilian Biomes: An analysis based on satellite data for the 2002-2010 period. *Remote Sens.* 4, 1929–1946. <https://doi.org/10.3390/rs4071929>
- Archibald, S., Lehmann, C., Belcher, C., Bond, W., 2017. Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth System. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9ead> Manuscript
- Archibald, S., Roy, D.P., van Wilgen, B.W., Scholes, R.J., 2009. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Glob. Chang. Biol.* 15, 613–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>
- Balch, J.R.K., Nepstad, D.C., Brando, P.M., Curran, L.M., Portela, O., de Carvalho, O., Lefebvre, P., 2008. Negative fire feedback in a transitional forest of southeastern Amazonia. *Glob. Chang. Biol.* 14, 2276–2287. <https://doi.org/10.1111/j.1365->

2486.2008.01655.x

- Batmanian, G.J., Haridasan, M., 1985. Primary production and accumulation of nutrients by the ground layer community of cerrado vegetation of central Brazil. *Plant Soil* 88, 437–440. <https://doi.org/10.1007/BF02197500>
- Beale, C.M., Rensberg, S. Van, Bond, W.J., Coughenour, M., Fynn, R., Gaylard, A., Grant, R., Harris, B., Jones, T., Mduma, S., Owen-Smith, N., Sinclair, A.R.E., 2013. Ten lessons for the conservation of African savannah ecosystems. *Biol. Conserv.* <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.08.025>
- Beerling, D.J., Osborne, C.P., 2006. The origin of the savanna biome. *Glob. Chang. Biol.* 12, 2023–2031. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01239.x>
- Berjak, S.G., Hearne, J.W., 2002. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. *Ecol. Modell.* 148, 133–151. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00423-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00423-9)
- Bond, W.J., 2015. Fires in the Cenozoic: a late flowering of flammable ecosystems. *Front. Plant Sci.* 5, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00749>
- Bond, W.J., 2008. What Limits Trees in C 4 Grasslands and Savannas? *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 39, 641–659. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173411>
- Bond, W.J., Keeley, J.E., 2005. Fire as a global ‘herbivore’: The ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends Ecol. Evol.* 20, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Bond, W.J., Midgley, G.F., 2012. Carbon dioxide and the uneasy interactions of trees and savannah grasses. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 367, 601–612. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0182>
- Bond, W.J., Midgley, G.F., Woodward, F.I., 2003. What controls South African vegetation - climate or fire? *South African J. Bot.* 69, 79–91. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2390.1>
- Bond, W.J., Woodward, F.I., Midgley, G.F., 2005. The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytol.* 165, 525–538.
- Bova, A.S., Dickinson, M.B., 2005. Linking surface-fire behavior, stem heating, and tissue necrosis. *Can. J. For. Res.* 35, 814–822. <https://doi.org/10.1139/x05-004>
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., Antonio, C.M.D., Defries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C.I., Scott, A.C., Swetnam, T.W., Werf, G.R. Van Der, Pyne, S.J., 2009. Fire in the Earth System. *Science* (80-.). 324, 481–484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silvério, D., Macedo, M.N., Davidson, E.A., Nóbrega, C.C., Alencar, A., Soares-Filho, B.S., 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 6347–6352. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305499111>

- Brazil, 2016. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Science, Technology and Innovation. Brasília.
- Burnham, K., Anderson, D., 2002. Model selection and multi-model inference: a practical information-theoretic approach. Springer-Verlag, Berlin.
- Bustamante, M.M.C., Nobre, C.A., Smeraldi, R., Aguiar, A.P.D., Barioni, L.G., Ferreira, L.G., Longo, K., May, P., Pinto, A.S., Ometto, J.P.H.B., 2012. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Clim. Change* 115, 559–577. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3>
- Byram, G.M., 1959. Combustion of Fuels, in: Davis, K. (Ed.), *Forest Fire Control and Use*. McGraw-Hill Book, New York, pp. 61–89.
- Byram, G.M., 1959. Combustion of forest fuels. In: Davis, K.P., ed. *Forest fire: control and use*. New York McGraw Hill 61–89.
- Cardoso, E., Moreno, M.I.C., Bruna, E.M., Vasconcelos, H.L., 2009. Mudanças fitofisionômicas no Cerrado: 18 anos de sucessão ecológica na estação ecológica do Panga, Uberlândia - MG. *Caminhos da Geogr.* 10, 254–268.
- Carvalho, J., Santos, J., Santos, J., Leitão, M., 1995. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus Region. *Atmos. Environmmtal* 29, 2301–2309.
- Castro-Neves, B.M., 2000. Comportamento de queimadas, temperaturas do solo e recuperação da biomassa aérea em campo sujo nativo e em capim gordura (*Melinis minutiflora*). Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília.
- Castro, E.A., Kauffman, J.B., 1998. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *J. Trop. Ecol.* 14, 263–283. <https://doi.org/10.1017/S0266467498000212>
- Cerling, T.E., Harris, J.M., Macfadden, B.J., Leakey, M.G., Quadek, J., Eisenmann, V., Ehleringer, J.R., 1997. Global vegetation change through the Miocene / Pliocene boundary. *Nature* 389, 153–158. <https://doi.org/10.1038/38229>
- Collins, R.D., de Neufville, R., Claro, J., Oliveira, T., Pacheco, A.P., 2013. Forest fire management to avoid unintended consequences: A case study of Portugal using system dynamics. *J. Environ. Manage.* 130, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.033>
- Conceição, A.A., Orr, B.J., 2012. Post-fire flowering and fruiting in *Vellozia sincorana*, a caulescent rosette plant endemic to northeast Brazil. *Acta Bot. Brasilica* 26, 94–100. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062012000100011>
- Conceição, A., Pivello, V., 2011. Biomassa combustível em campo sujo no entorno do Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. *Biodiversidade Bras.* 2, 146–160.
- Coutinho, L.M., 2006. O conceito de bioma. *Acta Bot. Brasilica* 20, 13–23. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062006000100002>
- Coutinho, L.M., 1990. Fire in the Tropical Biota: Ecosystem processes and global challenges, in: Goldammer, J.G. (Ed.), *Fire in the Ecology of the Brazilian*

- Cerrado. Springer Verlag, Berlin, pp. 82–105.
- Cruz, M.G., Kidnie, S., Matthews, S., Hurley, R.J., Slijepcevic, A., Nichols, D., Gould, J.S., 2016. Evaluation of the predictive capacity of dead fuel moisture models for Eastern Australia grasslands. *Int. J. Wildl. Fire* 25, 995–1001. <https://doi.org/10.1071/WF16036>
- Dantas, V. de L., Hirota, M., Oliveira, R.S., Pausas, J.G., 2016. Disturbance maintains alternative biome states. *Ecol. Lett.* 19, 12–19. <https://doi.org/10.1111/ele.12537>
- Dantas, V.L., Pausas, J.G., 2013. The lanky and the corky: Fire-escape strategies in savanna woody species. *J. Ecol.* 101, 1265–1272. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12118>
- Davidson, E.A., Savage, K., Bolstad, P., Clark, D.A., Curtis, P.S., Ellsworth, D.S., Hanson, P.J., Law, B.E., Luo, Y., Pregitzer, K.S., Randolph, J.C., Zak, D., 2002. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agric. For. Meteorol.* 113, 39–51. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00101-6)
- Dias, B.F.S., Miranda, H.S., 2010. O Projeto Fogo, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime de Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Projeto Fogo*. IBAMA, Brasília, pp. 15–22.
- Diniz, I.R., Morais, H.C., 2010. Efeitos do fogo sobre os insetos do Cerrado: consensos e controvérsias, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime Do Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados Do Projeto Fogo*. IBAMA, Brasília, pp. 121–131.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D., Lautenbach, S., 2013. Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography (Cop.)*. 36, 027–046. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Draper, N.R., Smith, H., 1998. *Applied Regression Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics. JohnWiley and Sons, New York.
- Durigan, G., 2017. Fogo amigo no Cerrado [WWW Document]. URL http://agencia.fapesp.br/fogo_amigo_no_cerrado/25865/ (accessed 2.5.18).
- Durigan, G., Hermógenes de Freitas, L.F., Rodrigues, R.R., 1994. Phytosociology and structure of a frequently burnt cerrado vegetation in SE-Brazil. *Flora* 189, 153–160. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)30582-0](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)30582-0)
- Durigan, G., Ratter, J.A., 2015. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *J. Appl. Ecol.* 53, 11–15. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12559>
- Enright, N.J., Fontaine, J.B., Bowman, D.M.J.S., Bradstock, R.A., Williams, R.J., 2015. Interval squeeze: Altered fire regimes and demographic responses interact to threaten woody species persistence as climate changes. *Front. Ecol. Environ.* 13, 265–272. <https://doi.org/10.1890/140231>
- Felfili, M.J., Felfili, M.C., Nogueira, P.E., Armas, J.F.S., Farinas, M.R., Nunes, M., Silva-Júnior, M.C., Rezende, A. V, Fagg, C.W., 2008. Padrões fitogeográficos e

- sua relação com sistemas de terra no Bioma Cerrado, in: Sano, S.M., Almeida, S., Ribeiro, J.F. (Eds.), *Cerrado: Ecologia E Flora*. Embrapa Cerrados, Brasília-DF, pp. 215–228.
- Felício, L.C., 2010. *Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta*. RiMa, São Paulo.
- Fernandes, G.D.A., 2003. *Simulação de incêndio florestal no Parque Estadual Serra do Rola-Moça, Minas Gerais, utilizando o FARSITETM*. Tese, Universidade Federal de Viçosa.
- Fernandes, G.W., Pedroni, F., Sanchez, M., Scariot, A., Aguiar, L.M.S., Ferreira, G., Machado, R., Ferreira, M.E., Diniz, S., Pinheiro, R., Costa, J.A.S., Dirzo, R., Muniz, F., 2016. *Cerrado em busca de soluções sustentáveis*. Rio de Janeiro.
- Ferreira, M.E., Ferreira, L.G., Miziara, F., Soares-Filho, B.S., 2012. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: future scenarios and perspectives for conservation. *J. Land Use Sci.* 1–19. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2012.675363>
- Fichino, S., Dombroski, J.R.G., Pivello, V.R., Fidelis, A., 2016. Does Fire Trigger Seed Germination in the Neotropical Savannas? Experimental Tests with Six Cerrado Species. *Biotropica* 48, 181–187. <https://doi.org/10.1111/btp.12276>
- Fidelis, A., Blanco, C., 2014. Does fire induce flowering in Brazilian subtropical grasslands? *Appl. Veg. Sci.* 17, 690–699. <https://doi.org/10.1111/avsc.12098>
- Fidelis, A., Pivello, V.R., 2011. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos? *Biodiversidade Bras.* 1, 12–25.
- Finney, M.A., 2006. An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities, in: Andrews, P.L., Butler, B.W. (Eds.), *Conference, Fuels Management- How to Mensure Success*. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-41, Rocky Mountain, CO: U.S, pp. 213–220. [https://doi.org/U.S. Forest Serice Research Paper RMRS-P-41](https://doi.org/U.S.ForestSericeResearchPaperRMRS-P-41)
- França, H., Ramos Neto, M.B., Setzer, A., 2007. *O fogo no Parque Nacional das Emas*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gomes, L., Maracahipes, L., Marimon, B.S., Reis, S.M., Elias, F., Maracahipes-Santos, L., Marimon-Junior, B.H., Lenza, E., 2014. Post-fire recovery of savanna vegetation from rocky outcrops. *Flora Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Plants* 3–4. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2014.02.006>
- Gomes, L., Miranda, H., Bustamante, M., 2018a. How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome? *For. Ecol. Manage.* 417, 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.032>
- Gomes, L., Miranda, H., Silvério, D., Bustamante, M., 2018b. *Determinantes do comportamento do fogo e emissões de carbono no Cerrado brasileiro*. Capítulo 2.
- Gorgone-Barbosa, E., Pivello, V.R., Bautista, S., Zupo, T., Rissi, M.N., Fidelis, A., 2015. How can an invasive grass affect fire behavior in a tropical savanna? A community and individual plant level approach. *Biol. Invasions* 17, 423–431. <https://doi.org/10.1007/s10530-014-0740-z>

- Gotelli, N.J., Ellison, A., 2011. *Princípios de estatística em ecologia*. Artmed, Porto Alegre.
- Griffin, G.F., Friedel, M.H., Springs, A., 1984. Effects of fire on central Australian rangelands . I Fire and fuel characteristics and changes in herbage and nutrients. *Aust. J. Ecol.* 9, 381–393.
- Harris, R.M.B., Remenyi, T.A., Williamson, G.J., Bindoff, N.L., Bowman, D.M.J.S., 2016. Climate–vegetation–fire interactions and feedbacks: trivial detail or major barrier to projecting the future of the Earth system? *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* 7, 910–931. <https://doi.org/10.1002/wcc.428>
- Henriques, R.B., 2010. Efeito do fogo na fauna de mamíferos do Cerrado, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime Do Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados Do Projeto Fogo*. IBAMA, Brasília, pp. 133–144.
- Henriques, R.P.B., 2005. Influência da história, solo e fogo na distribuição e dinâmica das fitofisionomias no bioma do Cerrado, in: Scariot, A., Sousa-Silva, J.C., Felfili, J.M. (Eds.), *Cerrado: Ecologia, Biodiversidade E Conservação*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp. 73–92.
- Hoffmann, W.A., 2018. Fire Ecology [WWW Document]. URL <http://www4.ncsu.edu/~wahoffma/FireEcology/FireEcology.html> (accessed 1.5.18).
- Hoffmann, W.A., 2005. Ecologia comparativa de espécies lenhosas de cerrado e mata, in: Scariot, A., Sousa-Silva, J.C., Felfili, J.M. (Eds.), *Cerrado: Ecologia, Biodiversidade E Conservação*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp. 155–165.
- Hoffmann, W.A., Adasme, R., Haridasan, M., Carvalho, M.T., Geiger, E.L., Pereira, M.A., Gotsch, S.G., Franco, A.C., 2009. Tree topkill, not mortality, governs the dynamics of savanna-forest boundaries under frequent fire in central Brazil. *Ecology* 90, 1326–1337. <https://doi.org/10.1890/08-0741.1>
- Hoffmann, W.A., Franco, A.C., 2003. Comparative growth analysis of tropical forest and savanna woody plants using phylogenetically independent contrasts. *J. Ecol.* 91, 475–484. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00777.x>
- Hoffmann, W.A., Geiger, E.L., Gotsch, S.G., Rossatto, D.R., Silva, L.C.R., Lau, O.L., Haridasan, M., Franco, A.C., 2012a. Ecological thresholds at the savanna-forest boundary: How plant traits, resources and fire govern the distribution of tropical biomes. *Ecol. Lett.* 15, 759–768. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01789.x>
- Hoffmann, W.A., Jaconis, S., McKinley, K., Geiger, E., Gotsh, S., Franco, A.C., 2012b. Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savanna-forest boundaries. *Austral Ecol.* 37, 634–643. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02324.x>
- Hoffmann, W.A., Orthen, B., Nascimento, P.K.V., 2003. Comparative fire ecology of tropical savanna and forest trees. *Funct. Ecol.* 17, 720–726. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2003.00796.x>
- Hoffmann, W.A., Solbrig, O.T., 2003. The role of topkill in the differential response of savanna woody species to fire. *For. Ecol. Manage.* 180, 273–286.

[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00566-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00566-2)

- INPE, 2017. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [WWW Document]. Portal do Monit. Queimadas e Incêndios. URL <http://www.inpe.br/queimadas>. (accessed 3.16.15).
- Jin, H., 2010. Drivers of Global Wildfires- Statistical analyses. Thesis, Department of Earth and Ecosystem Sciences, Lund University.
- Justino, F., Mélo, A.S., Setzer, A.S., Sismanoglu, R., Sedyama, G.C., Ribeiro, G.A., Machado, J.P., Sterl, A., 2011. Greenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5 / MPI-OM coupled climate model. *Clim. Change* 106, 285–302. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9902-x>
- Kauffman, J.B., Cummings, D.L., Ward, D.E., 1994. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. *J. Ecol.* 82, 519–531. <https://doi.org/10.2307/2261261>
- Kayll, A., 1968. Heat tolerance of tree seedlings, in: *Proceedings of the Tall Timbers Fire Ecology Conference*. pp. 88–105.
- Keeley, J.E., Rundel, P.W., 2005. Fire and the Miocene expansion of C4 grasslands. *Ecol. Lett.* 8, 683–690. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00767.x>
- Klink, C. a., Machado, R.B., 2005. Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conserv. Biol.* 19, 707–713. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>
- Kolb, R.M., Pilon, N.A.L., Durigan, G., 2016. Factors influencing seed germination in Cerrado grasses. *Acta Bot. Brasilica* 30, 87–92. <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0199>
- Koproski, L., Ferreira, M.P., Goldammer, J.G., Batista, A.C., 2011. Modelo de zoneamento de risco de incêndios para unidades de conservação brasileiras: O caso do Parque Estadual do Cerrado (PR). *Floresta* 41, 551–562.
- Kraft, N.J.B., Adler, P.B., Godoy, O., James, E.C., Fuller, S., Levine, J.M., 2015. Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Funct. Ecol.* 29, 592–599. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12345>
- Krug, T., Figueiredo, H.B., Sano, E.E., Almeida, C.A., Santos, J.R., Miranda, H.S., Sato, M.N., Andrade, S.M.A., 2002. Emissões de gases de efeito estufa da queima de biomassa do Cerrado não-antrópico utilizando dados orbitais. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília.
- Lasslop, G., Thonicke, K., Kloster, S., 2014. SPITFIRE within the MPI Earth system model: Model development and evaluation. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 6, 740–755. <https://doi.org/10.1002/2013MS000284>.Received
- Luke, R., McArthur, A., 1978. *Bushfire in Australia*. Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Maraseni, T.N., Reardon-Smith, K., Griffiths, G., Apan, A., 2016. Savanna burning methodology for fire management and emissions reduction: A critical review of influencing factors. *Carbon Balance Manag.* 11. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0067-4>
- Massochini Frizzo, T.L., Bonizário, C., Borges, M.P., Vasconcelos, H.L., 2011. Revisão

- dos efeitos do fogo sobre a fauna de formações savânicas do Brasil. *Oecologia Aust.* 15, 365–379. <https://doi.org/10.4257/oeco.2011.1502.13>
- McKenzie, D., Kennedy, M.C., 2012. Power laws reveal phase transitions in landscape controls of fire regimes. *Nat Commun* 3, 726. <https://doi.org/10.1038/ncomms1731>
- Medeiros, M.B., 2002. Efeitos do fogo nos padrões de rebrotamento em plantas lenhosas, em campo sujo, após queimadas prescritas. Tese, Universidade de Brasília.
- Medeiros, M.B., Fiedler, N.C., 2011. Heterogeneidade de ecossistemas, modelos de desequilíbrio e distúrbios. *Biodiversidade Bras.* 2, 4–11.
- Medeiros, M.B., Miranda, H.S., 2008. Post-fire resprouting and mortality in cerrado woody plant species over a three-year period. *Edinburgh J. Bot.* 65, 53–68. <https://doi.org/10.1017/S0960428608004708>
- Medeiros, M.B., Miranda, H.S., 2005. Mortalidade pós-fogo em espécies lenhosas de campo sujo submetido a três queimadas prescritas anuais. *Acta Bot. Brasilica* 19, 493–500. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000300009>
- Mélo, A.S., Justino, F., Lemos, C.F., Sedyama, G., Ribeiro, G., 2011. Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas sob condições climáticas atuais e de futuro aquecimento global. *Rev. Bras. Meteorol.* 26, 401–418. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000300007>
- Mélo, A.S., Justino, F.B., Melo, E.C.S., 2012. Comparação entre os Índices de Risco de Fogo de Haines e Setzer em diferentes condições climáticas. *Mercator* 11, 187–207. <https://doi.org/10.4215/RM2012.1124.0012>
- Miranda, H., 2010. Efeitos do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de cerrado: Resultados do Projeto Fogo. IBAMA, Brasília-DF.
- Miranda, H.S., Bustamante, M.M.C., Miranda, A.C., 2002. The fire factor, in: Oliveira, P., Marquis, R. (Eds.), *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna*. Columbia University Press, Nova York, pp. 53–68.
- Miranda, H.S., Neto, W.N., Neves, B.M.C., 2010. Caracterização das queimadas de Cerrado, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime Do Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados Do Projeto Fogo*. IBAMA, Brasília, pp. 23–33.
- Miranda, H.S., Rocha e Silva, E.P., Miranda, A.C., 1996. Comportamento do fogo em queimadas de campo sujo, in: Miranda, H.S., Saito, C.H., Dias, B.F.S. (Eds.), *Impactos Das Queimadas Em Áreas de Cerrado E Restinga*. ECL / UnB, Brasília, pp. 1–10.
- Mistry, J., 1998. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. *Prog. Phys. Geogr.* 22, 425–448. <https://doi.org/10.1191/030913398668494359>
- Mistry, J., Berardi, A., 2005. Assessing fire potential in a Brazilian Savanna nature reserve. *Biotropica* 37, 439–451. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00058.x>
- Mittermeier, R.A., van Dijk, P.P., Rhodin, A.G.J., Nash, S.D., 2015. Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Ecoregions. *Chelonian Conserv. Biol.* 14, 2–10. <https://doi.org/10.2744/ccab-14-01-2-10.1>

- Moreira, F., Catry, F., Duarte, I., Acácio, V., Silva, J.S., 2008. A conceptual model of sprouting responses in relation to fire damage: an example with cork oak (*Quercus suber* L.) trees in Southern Portugal. *Plant Ecol.* 201, 77–85. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9476-0>
- Moritz, M.A., Morais, M.E., Summerell, L.A., Carlson, J.M., Doyle, J., 2005. Wildfires, complexity, and highly optimized tolerance. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102, 17912–17917. <https://doi.org/10.1073/pnas.0508985102>
- Munhoz, C.R., Amaral, A.G., 2010. Efeito do fogo no estrato herbáceo-subarbustivo do Cerrado, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime Do Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados Do Projeto Fogo*. IBAMA, Brasília, pp. 93–102.
- Musso, C., Miranda, H.S., Aires, S.S., Bastos, A.C., Soares, A.M.V.M., Loureiro, S., 2015. Simulated post-fire temperature affects germination of native and invasive grasses in cerrado (Brazilian savanna). *Plant Ecol. Divers.* 8, 219–227. <https://doi.org/10.1080/17550874.2014.910714>
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Myers, R.L., 2006. *Living with Fire—Sustaining Ecosystems & Livelihoods through Integrated Fire Management*. Global Fire Initiative. *Nat. Conserv.* 28.
- Nardoto, G.B., da Cunha Bustamante, M.M., Pinto, A.S., Klink, C.A., 2006. Nutrient use efficiency at ecosystem and species level in savanna areas of Central Brazil and impacts of fire. *J. Trop. Ecol.* 22, 191–201. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002865>
- Neto, W.N., 2005. *Modelagem ecológica de queimadas usando Inteligência Artificial*. Tese, Universidade de Brasília.
- Oliveras, I., Bell, T., 2008. An Analysis of the Australian Literature on Prescribed Burning. *J. For.* 106, 31–37.
- Oliveras, I., Meirelles, S.T., Hirakuri, V.L., Freitas, C.R., Miranda, H.S., Pivello, V.R., 2013. Effects of fire regimes on herbaceous biomass and nutrient dynamics in the Brazilian savanna. *Int. J. Wildl. Fire* 22, 368–380. <https://doi.org/10.1071/WF10136>
- Pausas, J.G., Keeley, J.E., 2009. A burning story: The role of fire in the history of life. *Bioscience* 59, 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>
- Pausas, J.G., Ribeiro, E., 2013. The global fire-productivity relationship. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22, 728–736. <https://doi.org/10.1111/geb.12043>
- Pereira, A.C., 2002. *Métodos de geoprocessamento na avaliação da susceptibilidade do cerrado ao fogo*. Tese, Universidade Federal de São Carlos.
- Pereira, A.C., Oliveira, S.L.J., Pereira, J.M.C., Turkman, M.A.A., 2014. Modelling fire frequency in a Cerrado savanna protected area. *PLoS One* 9, e102380. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102380>
- Peters, D.P.C., Bestelmeyer, B.T., Turner, M.G., 2007. Cross-scale interactions and changing pattern-process relationships: Consequences for system dynamics.

- Ecosystems 10, 790–796. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9055-6>
- Pinheiro, E.D.S., Durigan, G., 2009. Dinâmica espaço-temporal (1962-2006) das fitofisionomias em unidade de conservação do Cerrado no sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Botânica* 32, 441–454. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042009000300005>
- Pinheiro, L.F.S., Kolb, R.M., Rossatto, D.R., 2016. Changes in irradiance and soil properties explain why typical non-arboreal savanna species disappear under tree encroachment. *Aust. J. Bot.* 64, 333–341. <https://doi.org/10.1071/BT15283>
- Pinto, A. de S., Bustamante, M., Kisselle, K., Burke, R., Zepp, R., Viana, L., Varella, R., Molina, M., 2002. Soil emissions of N₂O, NO, and CO₂ in Brazilian Savannas: Effects of vegetation type, seasonality, and prescribed fires. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1029/2001JD000342>
- Pivello, V.R., 2011. The use of fire in the cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. *Fire Ecol.* 7, 24–39. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0701024>
- Pivello, V.R., Coutinho, L.M., 1996. A qualitative successional model to assist in the management of Brazilian cerrados. *For. Ecol. Manage.* 87, 127–138. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03829-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03829-7)
- Pivello, V.R., Oliveras, I., Miranda, H.S., Haridasan, M., Sato, M.N., Meirelles, S.T., 2010. Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. *Plant Soil* 337, 111–123. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0508-x>
- Pivello, R. V, Coutinho, L.M., 1992. Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in an Open Cerrado (Brazilian Savanna). *J. Trop. Ecol.* 487–497.
- Price, O.F., Borah, R., Maier, S.W., 2013. Role of weather and fuel in stopping fire spread in tropical savannas. *Austral Ecol.* 39, 135–144. <https://doi.org/10.1111/aec.12021>
- Price, O.F., Russell-Smith, J., Watt, F., 2012. The influence of prescribed fire on the extent of wildfire in savanna landscapes of western Arnhem Land, Australia. *Int. J. Wildl. Fire* 21, 297–305. <https://doi.org/10.1071/WF10079>
- Prichard, S.J., Stevens-Rumann, C.S., Hessburg, P.F., 2017. Tamm Review: Shifting global fire regimes: Lessons from reburns and research needs. *For. Ecol. Manage.* 396, 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.03.035>
- Pyne, S.J., Andrews, P.L., Richard, D.L., 1996. *Introduction to wildland fire*. John Wileys & Sons Inc, New York.
- R Core Team, 2017. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena. <https://www.r-project.org>.
- Ramos-Neto, M.B., Pivello, V.R., 2000. Lightning fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking management strategies. *Environ. Manage.* 26, 675–684. <https://doi.org/10.1007/s002670010124>
- Ray, D., Nepstad, D., Moutinho, P., 2005. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. *Ecol. Appl.* 15, 1664–1678. <https://doi.org/10.1890/05-0404>
- Resende, J., 2001. A ciclagem de nutrientes em áreas de cerrado e a influência de

- queimadas controladas. Tese, Universidade de Brasília.
- Ribeiro, J.F., Walter, B.M.T., 2008. As Principais Fitofisionomias do bioma Cerrado, in: Sano, S.M., Almeida, S.P., Ribeiro, J.F. (Eds.), *Cerrado: Ecologia E Flora*. Embrapa Cerrados, Planaltina, pp. 151–199.
- Ribeiro, M.N., Sanchez, M., Pedroni, F., Peixoto, K. da S., 2012. Fogo e dinâmica da comunidade lenhosa em cerrado sentido restrito, Barra do Garças, Mato Grosso. *Acta Bot. Brasilica* 26, 203–217. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062012000100020>
- Riggan, P.J., Tissell, R.G., Lockwood, R.N., 2010. Remote measurement of the 1992 Tapera prescribed fire at the Reserva Ecológica do IBGE, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime Do Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados Do Projeto Fogo*. IBAMA, Brasília, pp. 35–57.
- Rios, M.N.S., 2016. Dinâmica de comunidades vegetais em cerrado típico com histórico de fogo no Distrito Federal. Dep. Eng. Florest. Tese. Universidade de Brasília.
- Rissi, M.N., 2016. Efeito da época da queima na dinâmica de campo sujo de Cerrado. Tese, Universidade Estadual Paulista.
- Rissi, M.N., Baeza, M.J., Gorgone-Barbosa, E., Zupo, T., Fidelis, A., 2017. Does season affect fire behaviour in the Cerrado? *Int. J. Wildl. Fire* 26, 427–433. <https://doi.org/10.1071/WF14210>
- Rocha, G.F., Ferreira, L.G., Ferreira, N.C., Ferreira, M.E., 2011. Detecção de desmatamento no bioma Cerrado entre 2002 e 2009: Padrões, Tendência e Impactos. *Rev. Bras. Cartogr.* 63, 341–349.
- Rossi, R.D., Martins, C.R., Viana, P.L., Rodrigues, E.L., Figueira, J.E.C., 2014. Impact of invasion by molasses grass (*Melinis minutiflora* P. Beauv.) on native species and on fires in areas of campo-cerrado in Brazil. *Acta Bot. Brasilica* 28, 631–637. <https://doi.org/10.1590/0102-33062014abb3390>
- Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA, Forest Service Research Paper, Washington.
- Rothermel, R.C., Deeming, J.E., 1980. Measuring and interpreting fire behavior for correlation with fire effects. UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.
- Sano, E.E., Rosa, R., Brito, J.L.S., Ferreira, L.G., 2010. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environ. Monit. Assess.* 166, 113–124. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0988-4>
- Santos, A.J.B., 1999. Fluxos de energia, carbono e água em vegetação de campo sujo. Tese, Universidade de Brasília.
- Sarmiento, A., 1983. The savannas of Tropical America, in: Bourlière, F. (Ed.), *Ecosystems of the World 13: Tropical Savannas*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp. 245–288.
- Sato, M.N., 2003. Efeito a longo prazo de queimadas prescritas na estrutura de comunidade de lenhosas da vegetação do cerrado sensu stricto. Tese, Universidade de Brasília.

- Sato, M.N., Miranda, H.S., Maia, J.M.F., 2010. O fogo e o estrato arbóreo do Cerrado: efeitos imediatos e a longo prazo, in: Miranda, H.S. (Ed.), *Efeitos Do Regime de Fogo Sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Projeto Fogo*. Ibama, Brasília-DF, pp. 77–91.
- Sato, N.M., 1996. Mortalidade de plantas do cerrado submetidas a diferentes regimes de queima. Dissertação, Universidade de Brasília.
- Schmidt, I.B., Fidelis, A., Miranda, H.S., Ticktin, T., 2016a. How do the wets burn? Fire behavior and intensity in wet grasslands in the Brazilian savanna. *Brazilian J. Bot.* 40, 167–175. <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0330-7>
- Schmidt, I.B., Fonseca, C., Ferreira, M., Sato, M., 2016b. Implementação do programa piloto de Manejo Integrado do Fogo em três Unidades de Conservação do Cerrado. *Biodiversidade Bras.* 6, 55–70.
- Schmidt, I.B., Fonseca, C.B., Ferreira, M.C., Sato, M.N., 2016c. Experiências Internacionais de Manejo Integrado do Fogo em Áreas Protegidas – Recomendações para Implementação de Manejo Integrado de Fogo no Cerrado 6, 41–54.
- Scott, A.C., Glasspool, I.J., 2006. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103, 10861–10865. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604090103>
- Silva, C.S., 2016. Modelagem do comportamento do fogo com base em experimentos laboratoriais e simulações utilizando Behaveplus Fire Modeling System. Monografia, Universidade de Brasília.
- Silva, E.P.R., 1999. Efeito do regime de queima na taxa de mortalidade e estrutura da vegetação lenhosa de campo sujo de Cerrado. Dissertação, Universidade de Brasília.
- Silva, E.P.R., Miranda, H.S., 1996. Temperatura do câmbio de espécies lenhosas do cerrado durante queimadas prescritas, in: Pereira, R.C., Nasser, L.C.B. (Eds.), *Biodiversidade E Produção Sustentável de Alimentos E Fibras Nos Cerrados: Proceedings of the VIII Simpósio Sobre O Cerrado*. Embrapa, Brasília, pp. 253–257.
- Silva, F.A.M., Assad, E.D., Evangelista B.A., 2008. Caracterização climática do Bioma Cerrado, in: Sano, S.M., Almeida, S.P., Ribeiro, J.P. (Eds.), *Cerrado: Ecologia E Flora*. Embrapa, Planaltina, pp. 69–88.
- Silva, J.S.O., Haridasan, M., 2007. Acúmulo de biomassa aérea e concentração de nutrientes em *Melinis minutiflora* P. Beauv. e gramíneas nativas do cerrado. *Rev. Bras. Botânica* 30, 337–344. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042007000200016>
- Silva, P., Bastos, A., DaCamara, C.C., Libonati, R., 2016. Future Projections of Fire Occurrence in Brazil Using EC-Earth Climate Model. *Rev. Bras. Meteorol.* 31, 288–297. <https://doi.org/10.1590/0102-778631320150142>
- Silvério, D. V., Brando, P.M., Balch, J.K., Putz, F.E., Nepstad, D.C., Oliveira-Santos, C., Bustamante, M.M.C., 2013. Testing the Amazon savannization hypothesis: fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. *Philos. Trans. R. Soc. B* 8. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0427>

- Silvestrini, R.A., Soares-Filho, B.S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H., Assunção, R., 2011. Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecol. Appl.* 21, 1573–1590. <https://doi.org/10.1890/10-0827.1>
- Simon, M.F., Pennington, T., 2012. Evidence for Adaptation to Fire Regimes in the Tropical Savannas of the Brazilian Cerrado. *Int. J. Plant Sci.* 173, 711–723. <https://doi.org/10.1086/665973>
- Sitch, S., Huntingford, C., Gedney, N., Levy, P.E., Lomas, M., Piao, S.L., Betts, R., Ciais, P., Cox, P., Friedlingstein, P., Jones, C.D., Prentice, I.C., Woodward, F.I., 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Glob. Chang. Biol.* 14, 2015–2039. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01626.x>
- Soares-Filho, B., Silvestrini, R., Nepstad, D., Brando, P., Rodrigues, H., Alencar, A., Coe, M., Locks, C., Lima, L., Hissa, L., Stickler, C., 2012. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. *Landsc. Ecol.* 27, 585–598. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9723-6>
- Soares-Filho, B.S., Coutinho Cerqueira, G., Lopes Pennachin, C., 2002. DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecol. Modell.* 154, 217–235. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00059-5)
- Soares-Filho, B.S., Rodrigues, H.O., Costa, W.L.S., 2009. Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO.
- Soares, R.V., 1985. Incêndios florestais-controle e uso do fogo. FUFPEF, Curitiba.
- Strassburg, B.B.N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R.D., Latawiec, A., Oliveira, F., Scaramuzza, C.A. de M., Scarano, F.R., Soares-Filho, B., Balmford, A., 2017. Moment of truth for the Cerrado. *Science* (80-.). 1, 1–3. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>
- Thonicke, K., Spessa, A., Prentice, I.C., Harrison, S.P., Dong, L., Carmona-Moreno, C., 2010. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: Results from a process-based model. *Biogeosciences* 7, 1991–2011. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1991-2010>
- Trollope, W.S.W., Trollope, L.A., Hartnett, D.C., 2002. Fire behaviour a key factor in the fire ecology of African grasslands and savannas. *Forest fire research & wildland fire safety*, Rotterdam.
- Turner, M.G., Gardner, R.H., O'Neill, R. V, 1995. Ecological dynamics at broadscales: ecosystems and landscapes. *Biosci. Suppl.* 45, 29–35.
- Uhl, C., Kauffman, J.B., 2012. Deforestation , Fire Susceptibility , and Potential Tree Responses to Fire in the Eastern Amazon Author (s): Christopher Uhl and J . Boone Kauffman Reviewed work (s): Published by : Ecological Society of America Stable URL : <http://www.jstor.org/stabl>. *Ecology* 71, 437–449.
- Van Leeuwen, T.T., Van Der Werf, G.R., Hoffmann, A.A., Detmers, R.G., R??cker, G., French, N.H.F., Archibald, S., Carvalho, J.A., Cook, G.D., De Groot, W.J., H??ly,

- C., Kasischke, E.S., Kloster, S., McCarty, J.L., Pettinari, M.L., Savadogo, P., Alvarado, E.C., Boschetti, L., Manuri, S., Meyer, C.P., Siegert, F., Trollope, L.A., Trollope, W.S.W., 2014. Biomass burning fuel consumption rates: A field measurement database. *Biogeosciences* 11, 7305–7329. <https://doi.org/10.5194/bg-11-7305-2014>
- Van Wilgen, B.W., Govender, N., Biggs, H.C., 2007. The contribution of fire research to fire management: A critical review of a long-term experiment in the Kruger National Park, South Africa. *Int. J. Wildl. Fire* 16, 519–530. <https://doi.org/10.1071/WF06115>
- Van Wilgen, B.W., Govender, N., Biggs, H.C., Ntsala, D., Funda, X.N., 2004. Response of Savanna fire regimes to changing Fire-Management Policies in a Large African National Park. *Conserv. Biol.* 18, 1533–1540. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00362.x>
- Vensim, 2017. Vensim PLE Software. Ventana Systems. <http://vensim.com/>.
- Ward, D.E., Susott, R.A., Kauffman, J.B., Babbitt, R.E., Cummings, D.L., Dias, B., Holben, B.N., Kauffman, Y.J., Rasmussen, R.A., Setzer, A.W., 1992. Smoke and Fire Characteristics for Cerrado and Deforestation Burns in Brazil: BASE-B Experiment. *J. Geophys. Res.* 97, 14601–14619.
- Whelan, R.J., 1995. *The Ecology of Fire*, Scientific American. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0461-150>
- White, B., 2014. Modelagem matemática e avaliação do comportamento do fogo em liteira de eucalipto. Tese, Universidade Federal de Sergipe. <https://doi.org/10.13140/2.1.1368.7840>
- White, B.L.A., Ribeiro, G.T., Souza, R.M., 2013. O uso do BehavePlus como ferramenta para modelagem do comportamento e efeito do fogo. *Pesqui. Florest. Bras.* 33, 73–83. <https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.73.409>
- White, L.A.S., White, B.L.A., Ribeiro, G.T., 2016. Modelagem espacial de risco de incêndio florestal para o município de Inhambupe, Bahia, Brasil. *Pesqui. Florest. Bras.* 36, 41. <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.85.850>
- Whitehead, P.J., Purdon, P., Russell-Smith, J., Cooke, P., Sutton, S., 2008. The management of climate change through prescribed savanna burning: emerging contributions of indigenous people in Northern Australia. *Ecol. Soc.* 13, 374–385. <https://doi.org/10.1002/pad>
- Whitlock, C., Shafer, S.L., Marlon, J., 2003. The role of climate and vegetation change in shaping past and future fire regimes in the northwestern US and the implications for ecosystem management. *For. Ecol. Manage.* 178, 5–21. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00051-3)
- Yan, W., Wang, J., Jiang, J., 2016. Subway Fire Cause Analysis Model Based on System Dynamics: A Preliminary Model Framework. *Procedia Eng.* 135, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.152>
- Zupo, T., 2017. Estratégias de persistência e regeneração em campo sujo de Cerrado após o fogo. Tese, Universidade Estadual Paulista.