



Comportamento do fogo em fitofisionomia de Cerrado típico no Tocantins

Ronnie Pinto de Melo Júnior ^a, Micael Moreira Santos ^{a*}, José Fernando Pereira ^a,
Damiana Beatriz da Silva ^a, Gil Rodrigues dos Santos ^a, Marcos Paulo Barboza Reis ^a, Marcos Giongo ^a

^a Universidade Federal do Tocantins, Brasil

* Autor correspondente (moreirasmicael@gmail.com)

INFO

Keywords

biodiversity
fuel load
prescribed fire
climatic variables

Palavras-chaves

biodiversidade
material combustível
queimas controladas
variáveis climáticas

ABSTRACT

Fire behavior in typical Cerrado phytophysiology in Tocantins

This study aimed to analyze fire behavior in a typical Cerrado area at Fazenda Verdes Mares, Sucupira-TO. Experimental burns were conducted on 14 plots during the dry season (in October) to evaluate flame height, propagation speed, fire intensity, and heat release, correlating these with fuel load and climatic variables. The results showed average values of 49.91 cm (± 5.13) for flame height, 1.83 m/min (± 0.43) for propagation speed, 82.30 Kcal/m/s (± 19.91) for fire intensity, and 2,879.35 kcal/m² (± 224.73) for heat release. A significant correlation ($p < 0.05$) was observed between fire behavior and climatic variables such as air temperature, wind speed, and relative humidity. Adjusted regression models reliably estimated fire behavior ($R^2 > 0.91$), with climatic variables explaining the variation, especially wind speed. The study demonstrates the importance of climatic conditions in fire behavior in typical Cerrado areas, which is essential for proper management and fire prevention.

RESUMO

Este estudo analisou o comportamento do fogo em área de Cerrado típico na Fazenda Verdes Mares, localizada no município de Sucupira-TO. Queimas experimentais foram realizadas em 14 parcelas durante o período seco, no mês de outubro, com o objetivo de avaliar a altura das chamas, a velocidade de propagação, a intensidade do fogo e o calor liberado. Os dados foram correlacionados com as características do material combustível e as variáveis climáticas presentes no momento da queima. Os resultados indicaram os seguintes valores médios: altura das chamas de 49,91 cm ($\pm 5,13$), velocidade de propagação de 1,83 m/min ($\pm 0,43$), intensidade do fogo de 82,30 Kcal/m/s ($\pm 19,91$) e calor liberado de 2.879,35 kcal/m² ($\pm 224,73$). Foi observada uma correlação significativa ($p < 0,05$) entre o comportamento do fogo e as variáveis climáticas, como a temperatura do ar, a velocidade do vento e a umidade relativa. Os modelos de regressão ajustados permitiram estimar o comportamento do fogo de forma confiável, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,91. As variáveis climáticas foram as que melhor explicaram a variação no comportamento do fogo, com destaque para a velocidade do vento. O estudo demonstra a importância das condições climáticas no comportamento do fogo em áreas de Cerrado típico, o que é essencial para o manejo adequado e a prevenção de incêndios.



INTRODUÇÃO

O fogo, ao longo da evolução do planeta, tem sido um agente natural fundamental na seleção e modificação das comunidades vegetais. Sua ocorrência em formações vegetais remonta a tempos antigos, sendo as descargas elétricas sua principal causa natural (Goldammer, 1993). Com o domínio do fogo pelo homem, este passou a ser amplamente utilizado para a abertura de novas áreas em todos os continentes (Simon et al., 2009).

No Cerrado, o fogo é o método de manejo mais antigo empregado por comunidades humanas. No entanto, a expansão agrícola não pode ocorrer indiscriminadamente, devido aos desastres que podem resultar do uso inadequado do fogo (Bond et al., 2005). Quando utilizado corretamente, pode auxiliar na limpeza do solo, na disponibilização de nutrientes para a agricultura, na rebrota de gramíneas para pastagem e no manejo de recursos florestais não madeireiros (Schmidt et al., 2011).

O manejo sustentável dos recursos naturais exige o aprimoramento de técnicas para seu uso adequado (Menezes e Souza, 2011). A supressão total do fogo em ecossistemas pirofíticos pode levar a mudanças significativas na estrutura e composição da vegetação (Klink e Machado, 2005). Entretanto, há carência de estudos sobre os efeitos das queimadas no Cerrado, bioma vasto e com diversas fitofisionomias. Atualmente, 93,6 milhões de hectares são ocupados por agropecuária, 12,7 milhões por vegetação herbácea e arbustiva e 88,9 milhões por formação florestal e savânica (MapBiomas, 2025).

Ribeiro e Soares (1998) apontam que a falta de conhecimento sobre queima controlada e incêndios florestais compromete sua gestão. A queima controlada é planejada, com objetivos e limites bem definidos, enquanto o incêndio florestal ocorre de forma descontrolada, podendo gerar impactos ambientais irreversíveis (Soares e Santos, 2002). Além disso, variáveis climáticas influenciam o comportamento do fogo, como a temperatura, que favorece sua propagação, e a umidade do combustível, que afeta a combustão (Medeiros e Miranda, 2005).

O planejamento de ações de combate e manejo do fogo exige dados sobre essas interações. No Brasil, estudos sobre a relação entre técnica de queima, condições meteorológicas e material combustível ainda são escassos (Ramos Neto, 1997). Algumas pesquisas indicam que a vegetação do Cerrado se recupera em ciclos de três a cinco anos após queimadas (Henriques e Hay, 2002). Outros estudos destacam a rapidez das queimadas e o aporte de nutrientes ao solo a curto prazo (Conceição e Pivello, 2011), bem como a velocidade de propagação e consumo do material

combustível (Medeiros e Miranda, 2005). Contudo, desafios permanecem na aplicação prática desses conhecimentos, devido à complexidade das interações ecológicas e à variabilidade ambiental. Quando mal manejado, o fogo pode causar degradação da vegetação, do solo e reduzir a biodiversidade (Pivello, 2006).

Apesar dos avanços no entendimento do papel do fogo no Cerrado, ainda faltam estudos que modelem seu comportamento em diferentes fitofisionomias, especialmente no Cerrado típico. A escassez de informações sobre a interação entre clima, material combustível e fogo limita a eficácia das estratégias de manejo e prevenção. Estudos preditivos são necessários para embasar decisões mais assertivas no uso do fogo como ferramenta de manejo.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo analisar os principais parâmetros do comportamento do fogo (altura das chamas, velocidade de propagação, intensidade e calor liberado) em área de Cerrado típico, buscando estimar sua relação com as variáveis do material combustível e do clima, por meio de modelos de regressão.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área de dois hectares de mata nativa, classificada como Cerrado típico, localizada na Fazenda Verdes Mares (12°10'17" S; 48°49'33" O; 300 m), a 25 km do município de Sucupira-TO. Essa fitofisionomia é caracterizada por vegetação predominantemente arbóreo-arbustiva, com cobertura arbórea variando de 20% a 50%, altura média de três a seis metros, árvores de pequeno porte com o fuste tortuoso e gramíneas características do bioma Cerrado (Ribeiro e Walter, 1998).

Para otimizar o aproveitamento e a representatividade da área de estudo, foram delimitadas 20 parcelas de 10x20 metros, das quais 14 foram queimadas para a coleta de dados. As queimas foram distribuídas ao longo do dia em diferentes períodos: (i) Duas queimas entre 10:00 e 12:00 h; (ii) Três queimas entre 12:00 e 14:00 h; (iii) Quatro queimas entre 14:00 e 16:00 h; (iv) Três queimas entre 16:00 e 18:00 h; e (v) Duas queimas após as 18:00 h.

Coleta do material combustível

Para quantificar o material combustível, antes da queima, foi utilizado o método destrutivo de Brown et al. (1982), onde três amostras aleatórias de biomassa vegetal foram coletadas por parcela em quadrados de 30x30 cm. O material, armazenado

em sacos de papel, teve sua massa úmida medida. Após secagem em estufa a 70°C até atingir massa constante, obteve-se a massa seca. O teor de umidade do material (T_u) é calculado pela razão entre a diferença entre a massa úmida (M_u) e a massa seca (M_s) do material, e a massa seca (M_s), multiplicada por 100.

Após a queima, o mesmo processo foi repetido para amostras residuais, determinando a umidade após secagem. O material combustível consumido foi calculado pela relação entre a massa antes e após a queima, expressa em percentagem. A fórmula para calcular o material combustível consumido é:

$$M_{cons} = \frac{(M_{ca} - M_{cd})}{M_{cd}} * 100$$

Onde:

M_{cons} = Material combustível consumido

M_{ca} = Material combustível antes da queima

M_{cd} = Material combustível depois da queima

Variáveis climáticas e do comportamento do fogo

Durante as queimas, as variáveis climáticas foram monitoradas por uma estação meteorológica portátil, instalada em um tripé a 1,50 m do solo e a 20 metros das áreas experimentais. Os dados coletados incluíram a (i) velocidade média ($m.s^{-1}$) e sentido do vento; (ii) temperatura (°C); (iii) umidade relativa do ar (%). Adicionalmente, foram observadas a velocidade de propagação e a altura das chamas, variáveis relacionadas ao comportamento do fogo. A partir desses dados, estimou-se a energia liberada por unidade de área e a intensidade do fogo.

Velocidade de propagação

Para determinar a velocidade de propagação do fogo, foram instaladas estacas graduadas a cada dois metros nas laterais das parcelas (20 metros de comprimento) para registrar o tempo de passagem do fogo (Figura 01). A linha de fogo foi iniciada para percorrer o maior comprimento da parcela (20 metros), e o tempo foi medido com um cronômetro em minutos e segundos. A velocidade de propagação foi expressa como a média de 10 observações por parcela em $m.s^{-1}$.



Figura 01 - Estacas graduadas dispostas a cada dois metros para obter leitura temporal do fogo

Altura das chamas

Para determinar a altura das chamas, foram utilizadas estacas graduadas a cada 20 cm, dispostas a cada dois metros ao longo da parcela no sentido do comprimento (20 m). Uma leitura foi obtida para cada intervalo de 2 metros. A altura das chamas durante a queima foi expressa em centímetros, considerando a média de 10 observações por parcela.

Intensidade do Fogo

A intensidade da frente de chamas, também conhecida como intensidade de Byram (Byram, 1959), quantifica a taxa de liberação de calor por metro linear da frente de chama. Ela é definida

como a taxa de energia liberada por unidade de tempo e por unidade de comprimento da linha frontal, sendo estimada através de uma adaptação da seguinte equação:

$$I = H \cdot w \cdot r$$

Onde:

I = intensidade do fogo ($kcal.m^{-2} s^{-1}$);

H = Poder calorífico do material combustível, em $Kcal.Kg^{-1}$ (3.850,00);

w = Peso do material combustível disponível, em $Kg.m^{-2}$;

r = velocidade de propagação do fogo $m.s^{-1}$.

Calor liberado

O calor liberado foi estimado por meio da relação entre a intensidade do fogo e a velocidade

de propagação conforme formula abaixo expressa:

Onde:

$$ha = \frac{I}{r}$$

ha = calor liberado (kcal.m^{-2});

I = intensidade do fogo ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$);

r = velocidade de propagação do fogo (m.s^{-1}).

Análise dos dados

Inicialmente, foram calculadas as médias e o erro padrão da média para cada variável. Em seguida, realizou-se uma análise de correlação (Pearson e Spearman; $p > 0,05$) entre as variáveis do comportamento do fogo e as demais variáveis, como material combustível e condições meteorológicas. As variáveis mensuradas e/ou estimadas neste estudo foram:

- i. ACH (Altura das chamas durante a queima): medida em centímetros (cm).
- ii. VPROP (Velocidade de propagação do fogo): medida em metros por segundo (m.s^{-1}).
- iii. INT (Intensidade do fogo): medida em $\text{Kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.
- iv. CAL (Calor liberado): medido em Kcal.m^{-2} .
- v. MCA (Massa material combustível antes da queima): medida em toneladas por hectare (t.ha^{-1}).
- vi. MCD (Massa material combustível depois da queima): medida em toneladas por hectare (t.ha^{-1}).
- vii. MCONS (Material combustível consumido): medido em toneladas por hectare (t.ha^{-1}).
- viii. PMCONS (Percentual de material combustível consumido): medido em porcentagem (%).
- ix. PERÍODO (Período do dia da realização da queima): escala de 2 a 6, onde 2 representa o

período das 10 às 12 horas, 3 das 12 às 14 horas, 4 das 14 às 16 horas, 5 das 16 às 18 horas e 6 após as 18 horas.

- x. TEMP (Temperatura do ar no início da queima da parcela): medida em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- xi. UR (Umidade relativa do ar no início da queima da parcela): medida em porcentagem (%).
- xii. VV (Velocidade média do vento durante a queima da parcela): medida em metros por segundo (m.s^{-1}).
- xiii. SV (Presença e sentido do vento): escala de 0 a 2, onde 0 indica ausência de vento, 1 indica presença de vento e queima realizada a favor, e 2 indica presença de vento e queima realizada contra.

Para ajustar os modelos de regressão linear, o método *backward* foi empregado, selecionando os melhores modelos com base no maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), no menor erro padrão da estimativa ($S_{xy}\%$) e no valor de F calculado. As variáveis do comportamento do fogo foram consideradas como dependentes.

Adicionalmente, uma análise de componentes principais foi realizada, seguindo os critérios de Hair Jr. et al. (2006) e Figueiredo Filho e Silva Júnior (2010), utilizando a matriz de correlação entre as variáveis e rotação varimax para gerar as cargas fatoriais em cada componente principal extraído.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A carga média de material combustível na área de estudo (Cerrado típico) foi estimada em $7,48 \text{ t.ha}^{-1}$ ($\pm 0,58 \text{ t.ha}^{-1}$), situando-se dentro da faixa de $4,9$ a $13,1 \text{ t.ha}^{-1}$, conforme Conceição e Pivello (2011). Após a queima, observou-se uma redução para $3,20 \text{ t.ha}^{-1}$ ($\pm 0,29 \text{ t.ha}^{-1}$), representando um consumo de $4,28 \text{ t.ha}^{-1}$ ($\pm 0,48 \text{ t.ha}^{-1}$), ou seja, 56%.

Tabela 01 - Estatística descritiva das variáveis ambientais e de comportamento do fogo obtidas durante a queima controlada de parcelas em remanescente de Cerrado típico

Sigla	Variáveis	Média	Erro padrão
ACH	Altura das chamas durante a queima	49,91	$\pm 5,13$
VPROP	Velocidade de propagação	1,83	$\pm 0,43$
INT	Intensidade do fogo	82,30	$\pm 19,91$
CAL	Calor liberado	2.879,35	$\pm 224,73$
MCA	Combustível antes da queima	7,48	$\pm 0,58$
MCD	Combustível depois da queima	3,20	$\pm 0,29$
MCONS	Combustível consumido	4,28	$\pm 0,48$
PMCONS	% de combustível consumido	0,56	$\pm 0,04$

Legenda: ACH = altura das chamas durante a queima; VPROP = velocidade de propagação do fogo; INT = intensidade do fogo; CAL = calor liberado; MCA = material combustível antes da queima; MCD = material combustível depois da queima; MCONS = material combustível consumido; PMCONS = % de material combustível consumido; TEMP = Temperatura do ar; UR = Umidade relativa do ar; VV = Velocidade média do vento; SV = Presença e sentido do vento.

As variáveis de comportamento do fogo (altura das chamas, velocidade de propagação, intensidade do fogo e calor liberado) não apresentaram correlação significativa ($p > 0,05$) com a quantidade de material combustível antes e depois da queima (Figura 02), com exceção do calor liberado. Este resultado pode ser atribuído à homogeneidade das

parcelas quanto à carga total de material combustível, contrastando com a heterogeneidade na distribuição deste material dentro de cada parcela. A presença e sentido do vento também não influenciaram significativamente o comportamento do fogo ($p > 0,05$).

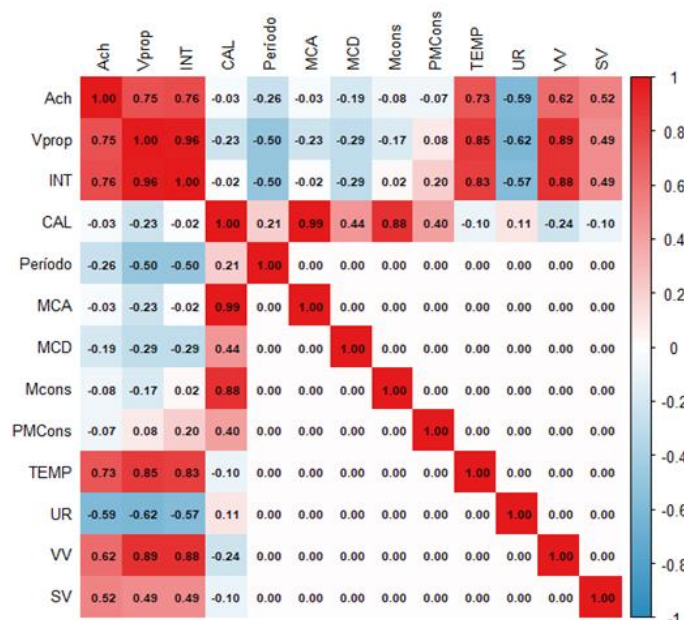


Figura 02 - Coeficientes de correlação de Spearman (rS) entre as variáveis ambientais, de material combustível e as de comportamento do fogo. ACH = altura das chamas durante a queima; VPROPA = velocidade de propagação do fogo; INT = intensidade do fogo; CAL = calor liberado; MCA = material combustível antes da queima; MCD = material combustível depois da queima; MCONS = material combustível consumido; PMCONS = % de material combustível consumido; TEMP = Temperatura do ar; UR = Umidade relativa do ar; VV = Velocidade média do vento; SV = Presença e sentido do vento.

Durante as queimas, as variáveis climáticas apresentaram as seguintes médias: temperatura do ar de $41,61 \pm 0,90^\circ \text{C}$, umidade relativa do ar de $15,70 \pm 1,62\%$ e velocidade do vento de $0,40 \pm 0,08 \text{ m.s}^{-1}$. Cabe destacar que a estação do ano, referente a época da queima das parcelas é a estação seca, em que as temperaturas máximas anuais estão situadas entre 34 e 41°C , com as chuvas acumuladas para o mês de outubro de 80 mm , abaixo da média anual de acordo com a norma climatológica 61-90 (Inmet, 2015).

A velocidade média de propagação do fogo foi de $1,83 \text{ m.min}^{-1}$ ($0,03 \text{ m.s}^{-1}$), inferior aos valores observados em outros estudos em condições de Cerrado, como no trabalho de Castro e Kauffman (1998) que observaram velocidade de propagação entre $0,1$ e $1,4 \text{ m s}^{-1}$, dependendo da época do ano. Essa variação pode estar relacionada às condições climáticas, como relatado por Camargos et al. (2015). No presente estudo, a temperatura, a velocidade do vento e a umidade relativa

apresentaram correlação significativa com a velocidade de propagação ($r = 0,85$; $0,89$; $-0,62$, respectivamente), conforme se observa na Figura 02.

A altura das chamas também apresentou relação com as variáveis climáticas, como velocidade do vento e temperatura ($r = 0,73$; $0,62$, respectivamente). No entanto, a média de $49,91 \pm 5,13 \text{ cm}$ está abaixo da média obtida por Beutling (2009) e de Seger et al (2012) que obtiveram valores médios de $84,02 \text{ cm}$ para linha de fogo contra o vento e $126,04 \text{ cm}$ quando a linha de fogo estava a favor do vento. Tais resultados podem ter relação com a composição do material combustível na área de estudo, bem como no arranjo espacial do mesmo e/ou a baixa velocidade do vento ($< 0,40 \text{ m.s}^{-1}$).

A intensidade do fogo variou ao longo do experimento, com média de $82,30 \pm 19,91 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, podendo ser explicado pela influência das variáveis climáticas, como a velocidade do vento.

No presente estudo, a correlação entre intensidade e velocidade do vento foi $r = 0,88$ e da intensidade do fogo com a temperatura foi de $r = 0,83$, resultados que demonstram forte interação entre essas a intensidade com estas duas variáveis climáticas.

A média de calor liberado durante as queimas foi de $2.879,35 \text{ kcal.m}^{-2}$, com um erro padrão de $\pm 224,73 \text{ kcal.m}^{-2}$. Em um estudo similar conduzido por Miranda et al. (1996) em uma área experimental com vegetação de Cerrado, os valores obtidos variaram de $1.999,85$ a $3.405,94 \text{ kcal.m}^{-2}$, o que é muito próximo aos resultados encontrados neste estudo. Notavelmente, o calor liberado foi a única variável que apresentou uma correlação significativa com o material combustível antes da queima e o material consumido pelo fogo ($r = 0,99$; $0,88$, respectivamente). De acordo com Seger et al. (2012), a tendência geral é que quanto mais lenta a combustão do material, maior o calor liberado e maior a quantidade de material consumido.

Com o uso da análise fatorial, foram extraídos os componentes principais, cujas cargas das parcelas queimadas são ilustradas na Figura 3, representando as variáveis do comportamento do fogo, as variáveis climatológicas e as variáveis do

material combustível. De forma geral, a análise de componentes principais pode ser utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados, agrupando as variáveis coletadas em novas variáveis com base na similaridade (por exemplo, a matriz de correlação). A análise realizada neste estudo permitiu a extração de três componentes principais que explicam 81% da variação original dos dados. O agrupamento das variáveis foi o seguinte: (i) CP1 - velocidade de propagação, altura das chamas, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento; (ii) CP2 - porcentagem de material combustível consumido, período, material combustível após a queima e sentido do vento; (iii) CP3 - material combustível antes da queima.

Na representação bidimensional, ao considerar os dois primeiros componentes principais extraídos, pode-se observar que no quadrante superior direito, há uma parcela influenciada pela velocidade do vento e pela temperatura do ar. Enquanto que, no quadrante superior esquerdo, existe um agrupamento de parcelas, o que pode indicar homogeneidade na queima dessas parcelas, embora sem relação direta com os componentes extraídos (Figura 02).

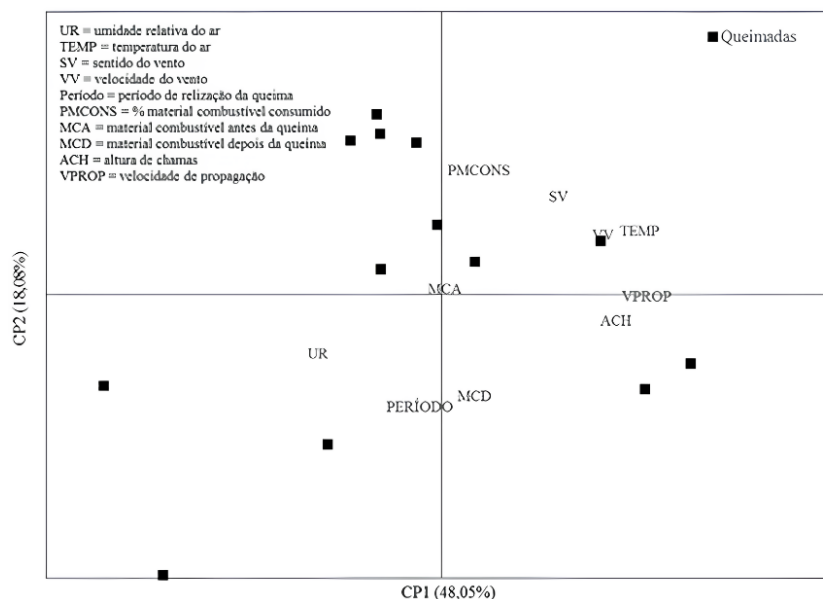


Figura 02 - Cargas fatoriais de dez variáveis relacionadas ao comportamento do fogo, clima e material combustível de 14 queimadas em Cerrado típico no Tocantins, nos dois primeiros componentes principais extraídos (CP).

Dessa forma, é possível visualizar o comportamento de cada queima com base no agrupamento das variáveis. A partir do gráfico gerado, observa-se que, nos quadrantes superiores, algumas parcelas estão agrupadas próximas ao material combustível antes da queima, sugerindo um padrão no material nessas áreas (Figura 02).

As demais parcelas apresentaram uma dispersão acentuada nos quadrantes inferiores, indicando uma grande variação nas variáveis avaliadas na área de estudo. Essa dispersão reflete a heterogeneidade das condições ambientais, tanto na distribuição do material combustível quanto nas condições climáticas (velocidade do vento,

temperatura do ar e umidade relativa).

Os modelos de regressão para estimativa das variáveis do comportamento do fogo em função das variáveis ambientais, período do dia, características

dos combustíveis e componentes principais extraídos estão apresentados nas Tabelas 02, 03, 04 e 05.

Tabela 02 - Modelos de regressão para estimativa de Altura das chamas em queimas controladas de parcelas em remanescente de Cerrado típico

Altura das chamas	R ² aj	Syx%	F
-192,764 + 8,976*Período + 4,969*TEMP	0,33	31,50	4,18
-395,337 + 59,019* TEMP ^0,5 + 32,868*Período^0,5	0,32	31,67	4,07
62,679 – 31,562*VV + 20,997*CP1	0,62	23,68	11,61
182,281 + 2,270*UR – 10,412*SV + 21,088*CP1 + 8,247*CP2 + 51,115*CP3 - 21,273*MCA	0,96	7,87	50,44
49,908 + 14,245*CP1 + 7,040*CP3	0,63	23,40	12,02

Legenda: MCA = material combustível antes da queima; TEMP = Temperatura do ar; UR = Umidade relativa do ar; VV = Velocidade média do vento; SV = Presença e sentido do vento; CP = Componente principal. R²aj = coeficiente de determinação; Syx% = erro padrão da estimativa, em %; F = valor do teste F.

Nos modelos de regressão para altura das chamas (Tabela 02) e velocidade do fogo (Tabela 03), observa-se uma forte interação entre as variáveis temperatura do ar e velocidade do vento,

influenciando o resultado do modelo de forma positiva e negativa, o que demonstra a forte interação entre as variáveis climáticas e o comportamento do fogo.

Tabela 03 - Modelos de regressão para estimativa Velocidade de propagação do fogo em queimas controladas de parcelas em remanescente de Cerrado típico

Velocidade de propagação do fogo	R ² aj	Syx%	F
-11,642 + 0,629*Período + 0,224* TEMP + 4,054*VV	0,73	45,71	12,70
-21,088 + 2,789*TEMP^0,5 + 5,067*VV^0,5 – 1,800*SV^0,5 + 1,835*Período^0,5	0,66	51,19	7,34
0,516 + 0,323*Período + 2,609*VV + 0,964*CP1 + -0,279*CP3	0,81	38,57	14,65
-3,126 + 0,545*Período - 0,191* TEMP - 1,755*VV + 2,969*CP1 + 0,916*CP2 - 4,051*CP3 + 1,531*MCA	0,97	14,92	63,78
1,831 + 1,381*CP1 -0,425*CP3	0,77	42,15	22,78

Legenda: MCA = material combustível antes da queima; TEMP = Temperatura do ar; VV = Velocidade média do vento; SV = Presença e sentido do vento; CP = Componente principal. R²aj = coeficiente de determinação; Syx% = erro padrão da estimativa, em %; F = valor do teste F.

No modelo de regressão da intensidade do fogo (Tabela 04), destaca-se a interação proeminente da velocidade do vento, que atua positivamente com valores expressivos. Observa-se também a

interação positiva do período ao longo do dia e o tempo da linha de fogo, afetando o modelo de forma positiva.

Tabela 04 - Modelos de regressão para estimativa da Intensidade do fogo em queimas controladas de parcelas em remanescente de Cerrado típico

Intensidade do fogo	R ² aj	Syx%	F
-557,694 + 27,185*Período + 11,35* TEMP + 145,46*VV	0,51	63,50	5,473
-586,821 + 25,947*Período + 10,590* TEMP + 164,860*VV + 7,746*MCA	0,52	62,67	4,529
-267,778 + 230,832*vv^0,5 + 112,963*Período^0,5	0,48	65,12	7,061
-349,356 + 8,805*TEMP + 161,28*VV -35,899*CP2 + 20,916*CP3	0,61	56,34	6,139
-484,183 – 82,853*VV + 101,145*CP1 – 173,185*CP3 + 80,227*MCA	0,89	29,54	28,26

Legenda: MCA = material combustível antes da queima; TEMP = Temperatura do ar; VV = Velocidade média do vento; SV = Presença e sentido do vento; CP = Componente principal. R²aj = coeficiente de determinação; Syx% = erro padrão da estimativa, em %; F = valor do teste F.

Nos modelos de regressão do calor liberado (Tabela 05), a velocidade do vento e o material

combustível antes da queima são as variáveis mais influentes dentro do modelo.

Tabela 05 - Modelos de regressão para estimativa de variáveis do comportamento do fogo em queimas controladas de parcelas em remanescente de Cerrado típico

Calor liberado	R ² aj	Syx%	F
$-2.930,081 + 99,897 * \text{Periodo}^{0,5} + 2.072,040 * \text{MCA}^{0,5}$	0,97	1,87	1.572
$2.585,214 + 726,909 * \text{VV} - 263,680 * \text{CP1} + 875,718 * \text{CP3}$	0,95	6,74	78,71
$2879,353 - 108,160 * \text{CP1} + 804,207 * \text{CP3}$	0,92	8,32	74,50

Legenda: MCA = material combustível antes da queima; VV = Velocidade média do vento; CP = Componente principal. R²aj = coeficiente de determinação; Syx% = erro padrão da estimativa, em %; F = valor do teste F.

Em relação aos valores de ajustes dos modelos de regressão para estimativa do comportamento do fogo, os que melhor expressaram esse comportamento foram aqueles em que o coeficiente de determinação mais se aproximou de (R²=1,0) e aqueles em que o erro padrão da estimativa apresentou menores valores de variação: (i) Altura das chamas (R² > 0,96; Syx% = 7,87); (ii) Velocidade de propagação (R² > 0,97; Syx% = 14,92); (iii) Intensidade do fogo (R² > 0,89; Syx% = 29,54); (iv) Calor liberado (R² > 0,97; Syx% = 1,87).

CONCLUSÕES

Com base nas observações do comportamento do fogo durante as queimas controladas em área de Cerrado típico, foi possível concluir que:

- Os parâmetros de altura das chamas, intensidade do fogo, velocidade de propagação e calor liberado podem ser quantificados de forma acessível e precisa com os métodos aplicados neste trabalho, permitindo a descrição adequada do comportamento do fogo.
- As variáveis do comportamento do fogo demonstraram correlação significativa com as variações meteorológicas de temperatura, velocidade do vento e umidade do ar, sendo as que melhor explicaram a variação do comportamento do fogo dentro desta área de Cerrado. A variável de calor liberado teve forte correlação com o material combustível.
- A dispersão das parcelas nos quadrantes inferiores da análise fatorial indica uma grande variação nas variáveis avaliadas na área de estudo. Essa heterogeneidade ambiental, tanto na distribuição do material combustível quanto nas condições climáticas, pode influenciar o comportamento do fogo e dificultar a generalização dos resultados para outras fitofisionomias de Cerrado.
- As conclusões deste estudo têm implicações importantes para o manejo do fogo em áreas de Cerrado típico. O conhecimento da influência das variáveis climáticas e do material

combustível no comportamento do fogo pode auxiliar no planejamento de queimas controladas, na prevenção de incêndios florestais e na conservação da biodiversidade.

REFERÊNCIAS

- Anderson MK. The ethnobotany of deergrass, *Muhlenbergia rigens* (Poaceae): its uses and fire management by California Indian Tribes. **Economic Botany**, v. 50, p. 409-422, 1996. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02866523>
- Batista AC. **Incêndios florestais**. Recife: UFRPE, 115p, 1990.
- Beutling A. Modelagem do comportamento do fogo com base em Experimentos laboratoriais e de campo. Curitiba, 2009. 121f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- Bond WJ, Woodward FI, Midgley GF. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, p. 525-538, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x>
- Brown JK, Reinhardt ED, Fischer WC. Predicting duff and woody fuel consumption in Northern Idaho prescribed fires. **Forest Science**, v. 37, n.6, p.1550-1566, 1991. <https://doi.org/10.1093/forestscience/37.6.1550>
- Byram GM. Combustion of forest fuels. In: Davis, Kp. **Forest fire - control and use**. New York: Mc Graw Hill, p. 77-84, 1959.
- Camargos VL, Ribeiro GA, da Silva AF, Martins SV, da Silva Carmo, FM. Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta estacional semidecídua no município de Viçosa, Minas Gerais. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, 2015, p. 537-545. <https://doi.org/10.5902/1980509819605>
- Castro EA, Kauffman, JB. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: A vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, v.14, n.3, p.263-283, 1998. <https://www.jstor.org/stable/2559908>
- Conceição A, Pivello VR. Biomassa Combustível em Campo Sujo no Entorno do Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. **Biodiversidade Brasileira**, v.1, n.2, p.146-160, 2011. <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v1i2.112>

- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Embrapa Cerrados e a região dos Cerrados: informações básicas e dados estatísticos**. Planaltina, 24p, 1998.
- Figueiredo Filho DB, Silva Júnior JA. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião pública**, v.16, n.1, p.160-185, 2010.
<https://doi.org/10.1590/S0104-62762010000100007>
- Goldammer JG. Wildfire management in forests and other vegetation : A global perspective. **Disaster Management**, v. 5, n. 1, p.3-10, 1993.
- Hair Jr, JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. **Multivariate Data Analysis**. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006. 816 p.
- Henriques RPB, Hay JDV. Patterns and dynamics of plant populations. In: Oliveira, OS, Marquis, RJ. (Eds.). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, p.140-158, 2002.
- INMET - Instituto Nacional De Meteorologia. **Dados Climatológicos**. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>. Acesso em 10 de janeiro de 2017.
- Klink CA, Machado RB. Conservation of the brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p.707-713, 2005.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>
- Medeiros MB, Miranda HS. Mortalidade pós-fogo em espécies lenhosas de campo sujo submetido a três queimadas prescritas anuais São Paulo, Brasil. **Acta Botanica Brasileira**, v. 19, n. 3, p. 493-500, 2005.
<https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000300009>
- Menezes R, Souza BI. Manejo sustentável dos recursos naturais em uma comunidade rural do semiárido nordestino, Paraíba, Brasil. **Cadernos do Logepa**, v.6, n.1, p.41-57, 2011. <https://periodicos.ufpb.br/index.php/logepa/article/view/10571>
- Miranda HS, Rocha e Silva, EP, Miranda AC. Comportamento do fogo em queimadas de campo sujo. In: Miranda HS, Saito CH, Dias BFS. (Org.) **Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga**. Brasília: UnB, ECL, p. 1-10, 1996.
- Pivello VR. Fire management for biological conservation in the Brazilian Cerrado. In: Mistry J, Berardi A. **Savannas and dry forests – linking people with nature**. Ashgate, Hants, p.129-154, 2006.
- Projeto MapBiomass – Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, 2025.
- Ramos Neto MB. Avaliação do manejo do fogo no Parque Nacional das Emas. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Unidades de Conservação**, p. 670-683, 1997.
- Ribeiro GA, Soares RV. Caracterização do material combustível superficial e efeitos da queima controlada sobre sua redução em um povoamento de *Eucalyptus viminalis*. **Cerne**, v.4, n.1, p.58-72, 1998.
- Ribeiro JF, Walter BMT. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano SM, Almeida SP. (ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Brasília, Embrapa Cerrados, p.87-166, 1998.
- Schmidt IB, Sampaio MB, Figueiredo IB, Ticktin T. Fogo e artesanato de capim-dourado no Jalapão - Usos tradicionais e consequências ecológicas. **Biodiversidade Brasileira**, v.1, p.67-85, 2011.
<https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v1i2.116>
- Seger CD, Batista AC. **Avaliação do comportamento do fogo em vegetação de estepes do estado do Paraná**. Curitiba, 2012. 14p.
- Simon MF, Grether R, Queiroz LP, Skema C, Pennington RT, Hughes CE. Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. **Proceedings Of The National Academy Of Science**, v.106, n.18, p.20359–20364, 2009.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0903410106>
- Soares RV, Santos JF. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997. **Floresta**, v.32, n.2, p.219 – 225, 2002.
<https://doi.org/10.5380/uf.v32i2.2287>