

Artigo

Influência dos Elementos Meteorológicos Sobre o Comportamento do Fogo

Fillipe Tamiozzo Pereira Torres¹ , Milton Ribas da Silva Júnior¹, Gumercindo Souza Lima¹¹*Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.*

Recebido em: 5 de Março de 2018 - Aceito em: 12 de Maio de 2018

Resumo

Os incêndios florestais geram problemas em diversas escalas em todos os ecossistemas. É amplamente reconhecido que quanto mais se entender sobre o comportamento do fogo e sua resposta às condições ambientais, mais acertadas serão as decisões sobre a gestão dos incêndios. O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento do fogo e suas correlações com os fatores ambientais associados ao clima. Queimas controladas de quatro parcelas por dia, em diferentes horários, e definidas ao acaso, foram realizadas durante 80 dias entre 01/07/2016 e 30/11/2016. O teor de umidade foi o parâmetro mais importante da inflamabilidade dos combustíveis e nas variáveis do comportamento do fogo. A umidade do material combustível reflete as condições atmosféricas e pode variar mais rápida e diretamente com aquelas do comportamento do fogo. A temperatura do ar foi o elemento mais correlacionado com a intensidade do fogo embora não teve correlação alguma com a velocidade de propagação. A variação dos resultados deste com os de outros estudos mostram a importância de se entender o comportamento do fogo em nível local.

Palavras-chave: clima, correlação, incêndios florestais, material combustível.

Influence of Weather on Fire Behavior

Abstract

Forest fires generate problems at various scales in all ecosystems. It is widely recognized that the more you understand about fire behavior and its response to environmental conditions, the better the decisions about fire management. The objective of this study was to evaluate the behavior of fire and its correlations with environmental factors associated with climate. Controlled burnings of four plots per day, at different times and defined at random, were carried out during 80 days between 07/01/2016 and 11/30/2016. The moisture content was the most important parameter of the flammability of the fuels and the variables of the behavior of the fire. The moisture of the combustible material reflects the atmospheric conditions and can vary more quickly and directly with those of the fire behavior. The air temperature was the most correlated element with the fire intensity although it did not have any correlation with the rate of spread. The variation of the results of this with those of other studies show the importance of understanding fire behavior at the local level.

Keywords: climate elements, combustible material, correlation, forest fires.

1. Introdução

Os incêndios florestais geram problemas em diversas escalas. Localmente promovem a degradação da vegetação, impactos sobre a biodiversidade, prejuízos financeiros e até mesmo perdas de vidas. Regionalmente, entre outros, sua fumaça gera problemas sobre a saúde humana e afetam os meios de transporte. Em escala global promovem emissões de carbono para a atmosfera, podendo ter consequências para o clima planetário (Herawati e Santos, 2011).

Em alguns ambientes, como as savanas, o fogo é um elemento natural, recorrente e essencial para o funcionamento dos ecossistemas e manutenção da biodiversidade. Muitas espécies têm adaptações que conferem resistência aos eventos, tendo floração, dispersão ou germinação de sementes favorecidas após a passagem do fogo. Contudo, em ambientes sensíveis como a floresta tropical úmida o fogo pode causar impactos negativos na diversidade ou mesmo aumentar a susceptibilidade da vegetação a queimadas, afetando significativamente o funcionamento e a diversidade biológica destes sistemas (Schmidt *et al.*,

2016). Há também as florestas de produção, no Brasil caracterizadas basicamente por plantios de *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.*, onde a ocorrência do fogo pode trazer danos econômicos e ambientais.

Apesar da importância para ações de prevenção e combate aos incêndios florestais, não existe o registro atualizado de ocorrência de incêndios que permita conhecer o perfil dos incêndios florestais no Brasil. Somente algumas empresas florestais têm mantido registro confiável das ocorrências ao longo dos anos (Tetto *et al.*, 2015). De acordo com Santos *et al.* (2006), no Brasil entre 1998 e 2002 foram registrados 19.377 focos de incêndios florestais em áreas protegidas brasileiras (Unidades de Conservação e plantios comerciais) com uma área queimada de 85.735,02 hectares, considerando que a pesquisa se restringiu à áreas restritas e que apenas 42% das áreas protegidas responderam os questionários, estima-se que o número de ocorrências e tamanho da área queimada no país supere muito os números apresentados.

As características dos incêndios são afetadas pelas complexas interações entre a vegetação, clima, topografia e atividades antrópicas ao longo do tempo. Em escalas regionais, o clima, por determinar o teor de umidade do combustível, além da quantidade de biomassa, é o principal controlador das características dominantes dos incêndios, bem como do tipo de vegetação encontrada. Além disso, uso do solo e topografia também afetam a frequência, velocidade de propagação e tamanho das áreas queimadas (Chang *et al.*, 2015).

Dos três fatores principais (clima, combustíveis e topografia) que controlam o comportamento dos incêndios, o clima é geralmente considerado o mais dinâmico (Jolly *et al.*, 2015). Assim, é amplamente reconhecido que quanto mais se entender sobre o comportamento do fogo e sua resposta às condições climáticas, mais se poderão antecipar situações perigosas ou impactos de grande magnitude e mais acertadas serão as decisões sobre a gestão de combustíveis e dos incêndios (Linn *et al.*, 2012).

Pesquisas recentes se concentraram na quantificação da importância relativa das variáveis ambientais (clima, relevo e combustível) nos padrões de frequência dos incêndios (Hammill *et al.*, 2016; Harvey *et al.*, 2016), na distribuição das ocorrências (Liu *et al.*, 2012; Tonini *et al.*, 2017), no tamanho da área queimada (Slocum *et al.*, 2010; Parisien *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Hantson *et al.*, 2016), e no regime geral dos incêndios em escalas regionais (Falk *et al.*, 2007; Boulanger *et al.*, 2013; Tonini *et al.*, 2017). Contudo, poucos estudos compararam as influências e a importância relativa das variáveis ambientais sobre as variáveis do comportamento do fogo como a intensidade, velocidade de propagação, altura das chamas e do crestamento letal entre outros (Batista *et al.*, 2013; Cansler; McKenzie, 2014; Parks *et al.*, 2014; Fang *et al.*, 2015).

Um dos fatores para esta situação seria que no caso do fogo, o pesquisador tem pouco, ou nenhum, controle

sobre sua gravidade e/ou intensidade. Florestas ou locais queimados com diferentes graus de gravidade não podem ser considerados como verdadeiras repetições, uma vez que de fato foram aplicadas "doses" diferentes do "tratamento". Para serem utilizadas como repetições, as ocorrências devem ser preferencialmente no mesmo ano e se assemelharem em termos de tipo de solo, relevo, vegetação e o clima. Isto significa que as repetições devem estar localizadas em uma área bastante limitada onde todos estes fatores sejam comparáveis (Zaitsev *et al.*, 2016).

Por outro lado, alguns trabalhos indicaram que as contribuições relativas das variáveis ambientais, sobre o comportamento do fogo, podem variar substancialmente entre escalas espaciais (Parisien *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2015). Assim, a análise e síntese dos resultados de vários estudos independentes que examinam a mesma questão, bem como séries de dados inéditos, estão emergindo como uma ferramenta promissora (Wolters *et al.*, 2006; Borenstein *et al.*, 2009; Zaitsev *et al.*, 2016) na gestão de incêndios florestais.

Modelos empíricos de comportamento do fogo são fundamentais para compreender a relação entre fogo e ambiente e servem como instrumentos fundamentais no manejo do fogo. Segundo Batista *et al.* (2013), em muitos países, os modelos de estimativa do comportamento do fogo continuam sendo desenvolvidos empiricamente a partir de experimentos de queima como o desenvolvido neste estudo.

Este entendimento poderá melhorar a modelagem do comportamento do fogo, facilitar ações de prevenção e supressão e tornar mais confiável o uso de queimas prescritas. Além disso, ajuda a compreensão das respostas do fogo às mudanças climáticas dependentes das influências relativas de fatores ambientais bióticos e abióticos (Fang *et al.*, 2015).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi analisar a influência das variáveis ambientais relacionadas ao tempo atmosférico sobre o comportamento do fogo.

2. Material e Métodos

Considerando que combustíveis com características diferentes respondem também de maneira diferente às variações meteorológicas, a fim de se normalizar esta variação, o presente estudo foi realizado no *campus* da Universidade Federal de Viçosa (MG) (Fig. 1) em um experimento clonal de híbridos de *E. urophylla* e *E. grandis*, com 10 anos de idade, espaçamento 3 x 3 metros, com exposição de 302° (noroeste) e declividade (10°) uniformes, generalizando as influências do relevo. Como material combustível, foi amostrada toda a matéria morta depositada sobre o solo mineral e o material vivo (*Melinis minutiflora*).

Durante 80 dias definidos ao acaso, entre 01/07/2016 e 30/11/2016, foram realizadas queimas controladas de

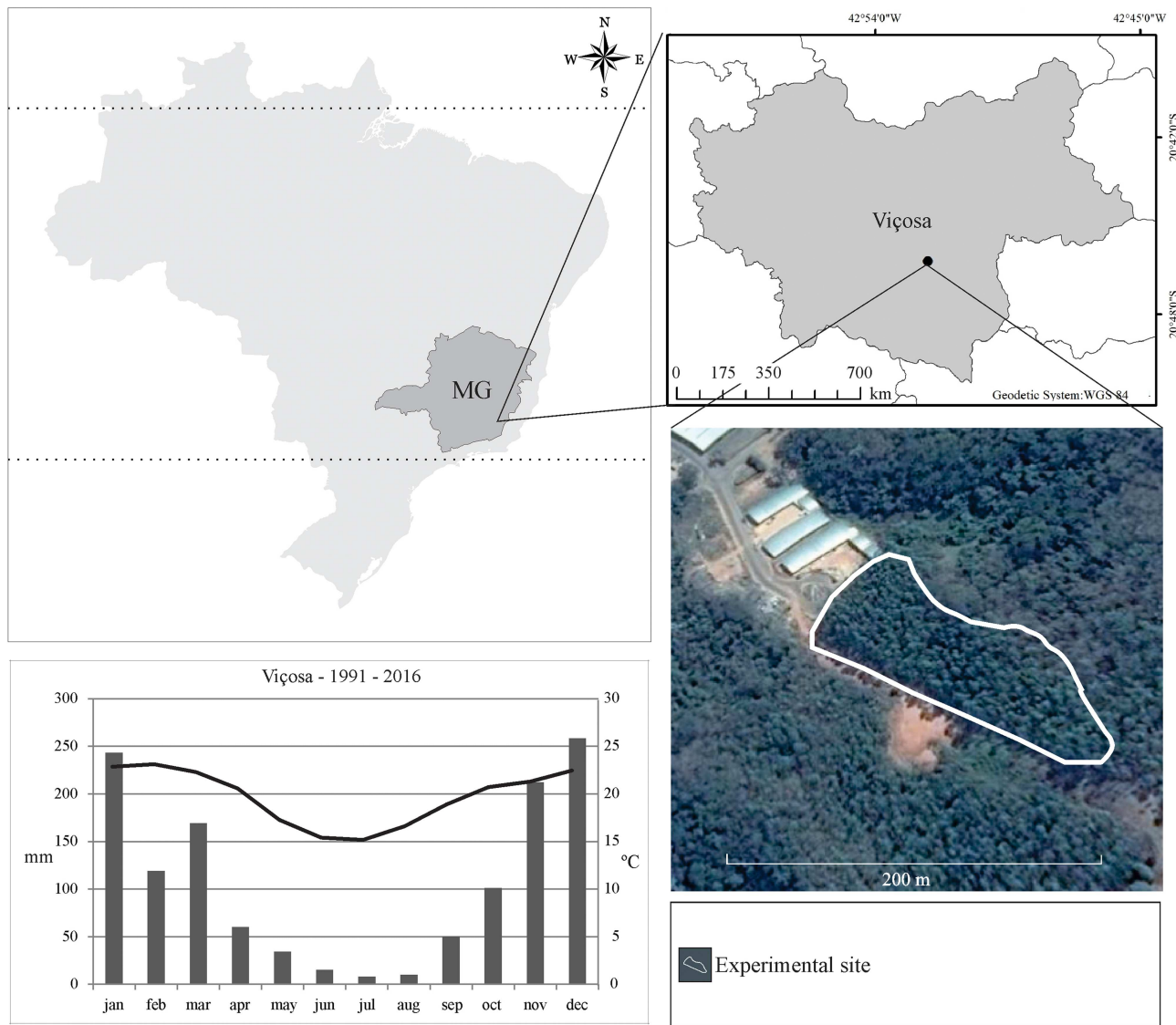


Figura 1 - Localização da área de estudo de queimas controladas em plantios com clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* com 10 anos de idade em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

quatro parcelas por dia em diferentes períodos: período 1 com início às 09:00 horas; período 2 com início às 11:00 horas; período 3 com início às 13:00 horas; e período 4 com início às 15:00 horas, buscando com isto retratar a época do ano (inverno e primavera) e horário mais propensos à ocorrências de incêndios florestais (Torres *et al.*, 2010).

Em cada uma das parcelas de 20 m² (2 m x 10 m), centralizadas entre as linhas de plantio (Fig. 2), foram efetuadas observações e medições sobre o material combustível, variáveis meteorológicas e, durante as queimas, sobre o comportamento do fogo.

2.1. Material combustível

Para a caracterização do material combustível foram levantadas informações do tipo, da quantidade, do

conteúdo de umidade e da espessura formada pela deposição do material sobre o solo. Esses dados foram obtidos através do inventário do material depositado no piso da floresta. Para isso, foram alocados aleatoriamente em cada parcela, gabaritos de 2.500 cm² (50 cm x 50 cm), de onde o material foi coletado e analisado da seguinte forma:

2.1.1. Tipo

O material foi separado em 4 categorias (Brown *et al.*, 1982): material com diâmetro entre 0 e 0,7 cm (aqui denominada CI), material com diâmetro entre 0,7 e 2,5 cm (CII), material com diâmetro entre 2,5 e 7,6 cm (CIII) e material com diâmetro superior à 7,6 cm (CIV). A classe CI foi subdividida em 3 subclasses:

1. CI-V - material orgânico vivo (gramíneas).

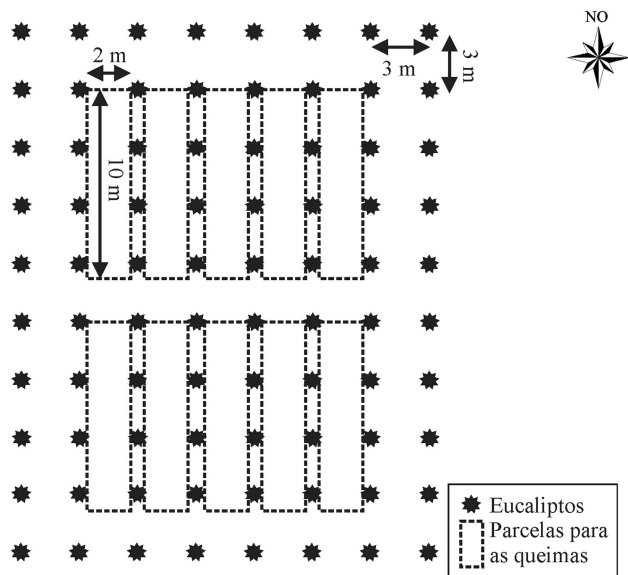


Figura 2 - Delineamento das parcelas para queimas controladas em plantios com clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* com 10 anos de idade em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

2. CI-M - Miscelânea - material orgânico morto, composto em sua maioria por folhas de eucalipto, húmus, gramíneas, etc.
3. CI-L - material lenhoso.

2.1.2. Umidade

O material coletado foi colocado em estufa a 75° C até peso constante para determinação do peso de matéria seca. Pela diferença entre o peso inicial e o de matéria seca das amostras foi estimado o conteúdo de umidade do combustível.

2.1.3. Quantidade

A coleta do material combustível foi feita antes e depois de cada queima. A diferença observada entre o peso antes (combustível total) e depois da queima (combustível residual) forneceu a quantidade de material consumido pela queima (combustível disponível ou CD).

2.1.4. Espessura

A espessura média da camada de material depositado no piso florestal foi mensurada nas amostras durante a coleta do material combustível com a utilização de régua nos quatro vértices do gabarito utilizado, e da mesma forma, após as queimas, mediu-se novamente a espessura do material acamado restante (combustível residual). A diferença entre a espessura da manta antes e depois da queima possibilitou estimar a variável “profundidade da queima” (PQ).

2.2. Variáveis do comportamento do fogo

No momento em que ocorreu a queima de cada parcela, foram feitas observações sobre as seguintes variáveis do comportamento do fogo:

- Velocidade de propagação (VP) - obtida visualmente, determinando-se o tempo necessário para a linha de fogo percorrer distâncias de 1 metro, previamente demarcado em cada parcela, no sentido do seu comprimento (10 m);
- Altura das chamas (Hch) - estimativa visual da altura média alcançada pelas chamas a cada metro de avanço da linha de fogo, com o auxílio de uma régua.

Através destas observações, foram calculados os parâmetros Intensidade do fogo e calor por unidade de área:

- Intensidade do fogo (I) - estimada pela Eq. (1) proposta por [Byram \(1959\)](#):

$$I = H \cdot w \cdot VP \quad (1)$$

sendo I = intensidade do fogo em kW/m/s; H = poder calorífico do material úmido em kcal/kg; w = peso do combustível disponível em kg/m²; VP = velocidade de propagação do fogo em m/s.

A determinação do poder calorífico foi realizada no Laboratório de Energia e Painéis de Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, utilizando-se um calorímetro adiabático da PARR, modelo 1108. A estimativa do poder calorífico do material úmido (poder calorífico real) foi feita a partir da Eq. (2) proposta por [Countryman \(1977\)](#):

$$H_w = H_d \left[\frac{100 - \frac{U}{7}}{100 + U} \right] \quad (2)$$

sendo H_w = Poder calorífico da matéria úmida, em Kcal/kg; H_d = Poder calorífico da matéria seca, em Kcal/kg; U = Conteúdo de umidade do peso de matéria seca, em %.

- Calor por unidade de área - definida pela Eq. (3):

$$CA = \frac{I}{VP} \quad (3)$$

sendo CA = calor liberado em kcal/m²; I = intensidade do fogo em kW/m/s; VP = velocidade de propagação do fogo em m/s.

- Altura de crestamento letal - definida pela Eq. (4):

$$H_{cl} = \frac{3,94I^{\frac{7}{6}}}{(0,107I + VV^3)^{0,5}(60 - T)} \quad (4)$$

sendo H_{cl} = altura de crestamento letal em metros; I = intensidade do fogo em kW/m/s; VV = velocidade do vento m/s; T = temperatura do ar em °C.

2.3. Condições meteorológicas

Durante o período do experimento, as condições meteorológicas (Temperatura e Umidade Relativa do Ar, Temperatura do Ponto de Orvalho, Precipitação, Evaporação, Insolação, Radiação Solar, Velocidade e Direção do Vento) foram monitoradas continuamente através da Estação Meteorológica da Universidade Federal de Viçosa instalada a 1 km do local das queimas (com mesma altitude e exposição do local).

2.4. Análise dos dados

Considerando que foram realizadas 4 repetições por dia, foram determinadas as médias diárias de todas as variáveis levantadas (umidade do material combustível e variáveis do comportamento do fogo), a partir disto, os dados foram analisados através da correlação linear de Pearson em ambiente R. Depois de criadas as matrizes (elementos meteorológicos x umidade do material combustível e elementos meteorológicos x variáveis do comportamento do fogo) foram calculadas as médias das correlações de cada um dos elementos meteorológicos com as variáveis analisadas.

3. Resultados

Analisando-se as correlações entre os elementos meteorológicos e a umidade do material combustível (Tabela 1), que de certa forma é o fator que irá permitir o início e a propagação do fogo (Pyne *et al.*, 1996), a umidade relativa do ar das 15 horas foi que obteve a maior correlação média e maior correlação com o material morto e mais fino. Em seguida vem a temperatura do ponto de orvalho apresentando maior correlação com a umidade do material vivo e umidade total do combustível. A umidade do material mais grosseiro está mais correlacionada com o número de dias sem chuva. Umidade relativa e temperatura do ar apresentam maior correlação quando mensuradas às 15 horas. Por outro lado, temperatura do ponto de orvalho, radiação solar e velocidade do vento são mais correlacionadas com a umidade do material combustível quando mensuradas às 13 horas. A evaporação de Piché foi mais correlacionada com a umidade do material combustível que a evaporação em tanque classe A. Direção do vento e temperatura compensada média não apresentaram correlações significativas com a umidade do material combustível.

As variáveis do comportamento do fogo sofrem mais influência da umidade do material combustível, em seguida tem-se a temperatura do ar das 15 horas, umidade relativa do ar e dias sem chuva. Da mesma forma que com a umidade do material combustível, a direção do vento e temperatura compensada média não apresentaram correlação (Tabela 2).

4. Discussão

Os combustíveis vivos e mortos têm diferentes mecanismos de retenção de água e diferentes respostas às variações do tempo atmosférico. Como mostram os resultados, há uma maior correlação dos elementos meteorológicos com o material morto e mais fino, muito devido à sua rápida resposta às variações meteorológicas. Por outro lado, o material vivo, assim como o material mais grosso, demora mais a responder a estas variações (Brown e Bevins, 1986). A primeira influência da umidade na combustão do material florestal é a necessidade da grande quantidade de energia requerida para transformar em vapor a água existente no combustível. Isso representa uma redução na quantidade de calor disponível para a combustão propriamente dita (Torres *et al.*, 2009).

A variação da umidade do ar é a que obtém a resposta mais rápida da umidade do combustível. A baixa correlação da temperatura com a umidade do material mostra que a maior influência da temperatura está na variação da umidade do ar, quanto menor seu valor, maior a umidade relativa do ar, dando condições para o ar transferir umidade ao combustível, por outro lado, uma maior temperatura significa menor umidade relativa do ar, fazendo então com que o combustível seque, ou seja, transfira umidade para o ar. Daí, em termos de correlação, o papel intermediário da velocidade do vento, que retira este ar, que acabou de receber a umidade, do contato com o combustível (Torres *et al.*, 2009). A correlação positiva do ponto de orvalho está relacionada ao processo de evaporação porque a atmosfera apresenta um alto valor de pressão parcial de vapor de água à temperatura do ponto de orvalho, ou seja, o ar tem dificuldade em “receber” ou “absorver” mais vapor de água (Talaia e Ferreira, 2010), dificultando a secagem do combustível. Dias sem chuva foi o fator que mais influenciou na umidade do combustível mais grosso (CII) visto que este material demora mais a perder a umidade recebida pela precipitação, fato que Wastl *et al.* (2012) e Torres *et al.* (2010) destacam ao analisarem a influência do acúmulo e da distribuição temporal da precipitação sobre o comportamento dos incêndios florestais.

Com relação ao horário das mensurações dos elementos meteorológicos, apesar de pequena a diferença, a umidade relativa e temperatura do ar estão mais relacionadas com altura da camada de ar mais ativa na troca de umidade com o combustível, que tende a ser mais espessa às 15 horas, horário de maior temperatura e menor umidade relativa do ar na região (Torres *et al.*, 2017). Por outro lado, a radiação solar, ponto de orvalho e velocidade do vento influenciam mais no contato com o material combustível, estando mais relacionados com o horário de maior ganho energético que é mais próximo das 13 horas (Torres e Machado, 2011).

A localização do experimento no interior do povoamento diminui a influência da direção do vento, fato que

Tabela 1 - Correlações entre elementos climáticos e umidade do material combustível em queimas controladas de plantios com clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* com 10 anos de idade em espaçamento 3 x 3 metros em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Elementos	Umidade do material combustível					
	CI-M	CI-V	CI-L	CII	CT	Média
Umidade Relativa das 15 horas	0,75	0,66	0,81	0,66	0,74	0,73
Ponto de Orvalho das 13 horas	0,69	0,74	0,68	0,67	0,75	0,71
Ponto de Orvalho das 15 horas	0,70	0,70	0,66	0,64	0,74	0,69
Umidade Relativa das 13 horas	0,68	0,64	0,78	0,60	0,68	0,68
Dias sem chuva	-0,67	-0,63	-0,67	-0,69	-0,68	-0,67
Umidade Relativa média	0,59	0,57	0,70	0,56	0,60	0,60
Evaporação piche	-0,56	-0,33	-0,67	-0,54	-0,52	-0,52
Insolação	-0,57	-0,38	-0,63	-0,50	-0,53	-0,52
Radiação das 13 horas	-0,56	-0,41	-0,64	-0,47	-0,52	-0,52
Temperatura mínima	0,48	0,57	0,42	0,46	0,55	0,50
Precipitação	0,51	0,36	0,71	0,40	0,49	0,49
Radiação das 15 horas	-0,54	-0,24	-0,62	-0,39	-0,46	-0,45
Evaporação tanque classe A	-0,49	-0,23	-0,53	-0,47	-0,43	-0,43
Velocidade do vento das 13 horas	-0,38	-0,46	-0,39	-0,41	-0,41	-0,41
Temperatura do ar das 15 horas	-0,41	-0,32	-0,50	-0,35	-0,36	-0,39
Temperatura máxima	-0,42	-0,29	-0,54	-0,33	-0,36	-0,39
Velocidade do vento das 15 horas	-0,45	-0,24	-0,46	-0,39	-0,38	-0,39
Temperatura do ar das 13 horas	-0,31	-0,26	-0,41	-0,24	-0,27	-0,30
Direção do vento das 15 horas	-0,03*	-0,23	-0,11*	-0,15*	-0,10*	-0,12*
Direção do vento das 13 horas	-0,16*	-0,11*	-0,02*	0,13*	0,19*	0,11*
Temperatura compensada média	0,09*	0,20*	0,01*	0,12*	0,17*	0,11*

*Correlações não significativas.

além da baixa correlação deste elemento, também é responsável pela maior correlação da evaporação, em relação ao tanque, mensurada pelo evaporímetro de Piché, visto que o mesmo faz a leitura na sombra e com pouca influência do vento (Torres e Machado, 2011).

A correlação insignificante da temperatura média compensada pode estar relacionada com o seu cálculo que leva em consideração as temperaturas máximas e mínimas (Torres e Machado, 2011), de acordo com os resultados, a umidade do material combustível responde de maneira inversa a estas duas variáveis, enquanto que maiores valores da temperatura máxima significam menores valores de umidade no combustível (correlação negativa), maiores valores da temperatura mínima significam maiores valores de umidade do material combustível (correlação positiva), por conta da alta correlação desta temperatura com o ponto de orvalho (0,89 observada neste estudo), onde os valores máximos de umidade são atingidos próximo da temperatura mínima do dia (Silva *et al.*, 2004).

A interação fogo-clima é tão intensa que estudos recentes (Littell e Gwozdz, 2011; Morton *et al.*, 2013) incorporam as relações entre os elementos meteorológicos e a umidade do material combustível como uma variável

biofísica independente que apresenta uma ligação mais direta às variáveis do comportamento do fogo do que qualquer variável meteorológica sozinha.

Diferente das correlações com a umidade do material combustível, a temperatura do ar das 15 horas foi o elemento meteorológico mais correlacionado com as variáveis do comportamento do fogo intensidade, calor por unidade de área e altura do crestamento letal. No caso das duas primeiras variáveis, o fato pode ser explicado pela influência da temperatura do ar sobre o poder calorífico real do material combustível. A intensidade do fogo é a variável mais importante do comportamento do fogo descreve a magnitude da combustão em termos de energia liberada. Por isso também é o parâmetro mais empregado para comparar queimas e incêndios florestais, bem como é usada como parâmetro para avaliar os efeitos do fogo no ambiente (Batista *et al.*, 2013). Com relação à altura do crestamento letal (altura em que o ar quente em ascendência leva à morte as folhas em um dossel), a temperatura do ar é diretamente proporcional ao seu valor (Van Wagner, 1973). Estas três variáveis do comportamento do fogo estão diretamente ligadas à intensidade dos danos causados pelo fogo, o entendimento de como os elementos meteorológicos interagem com os mesmos ajuda na

Tabela 2 - Correlações entre elementos climáticos, umidade do material combustível e variáveis do comportamento do fogo em queimas controladas em plantios com clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* com 10 anos de idade em espaçamento 3 x 3 metros em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Elementos	Variáveis do comportamento do fogo							
	PQ	VP	Hch	CD	I	CA	Hcl	Média
UCI-M	-0,85	-0,27	-0,69	-0,89	-0,85	-0,72	-0,84	-0,73
UCI-L	-0,83	-0,25	-0,72	-0,88	-0,84	-0,71	-0,83	-0,72
UCT	-0,82	-0,26	-0,66	-0,88	-0,84	-0,73	-0,86	-0,72
Temperatura das 15 h	0,60	0,00*	0,79	0,88	0,87	0,98	0,88	0,71
UCII	-0,73	-0,20	-0,63	-0,84	-0,80	-0,70	-0,83	-0,67
Um. Relativa das 15 h	-0,68	-0,36	-0,75	-0,78	-0,68	-0,64	-0,66	-0,65
Um. Relativa das 13 h	-0,60	-0,31	-0,74	-0,78	-0,68	-0,67	-0,67	-0,63
Dias sem chuva	0,60	-0,13*	0,57	0,76	0,72	0,76	0,76	0,61
UCI-V	-0,63	-0,26	-0,54	-0,76	-0,68	-0,63	-0,76	-0,61
Radiação das 13 h	0,56	0,33	0,78	0,60	0,65	0,63	0,58	0,59
Um. Relativa média	-0,42	-0,10*	-0,74	-0,71	-0,64	-0,71	-0,65	-0,57
Insolação	0,47	0,21*	0,85	0,65	0,47	0,59	0,41	0,52
Po. de Orvalho das 13 h	-0,55	-0,31	-0,33	-0,56	-0,60	-0,45	-0,67	-0,50
Evaporação classe A	0,31	-0,44	0,55	0,63	0,46	0,57	0,45	0,49
Po. de Orvalho das 15 h	-0,55	-0,33	-0,39	-0,54	-0,53	-0,42	-0,58	-0,48
Radiação das 15 h	0,50	0,30	0,68	0,48	0,46	0,44	0,36	0,46
Temperatura máxima	0,33	0,15*	0,70	0,61	0,41	0,52	0,35	0,44
Vel. do vento das 13 h	0,41	0,12*	0,54	0,46	0,47	0,53	0,47	0,43
Evaporação piche	0,32	-0,11*	0,54	0,58	0,46	0,49	0,44	0,42
Precipitação	-0,50	-0,29	-0,41	-0,44	-0,47	-0,32	-0,42	-0,41
Temperatura das 13 h	0,24	0,10*	0,69	0,58	0,35	0,53	0,30	0,40
Vel. do vento das 15 h	0,40	0,20*	0,64	0,43	0,40	0,40	0,32	0,40
Temperatura mínima	-0,38	-0,16*	-0,27	-0,34	-0,25	-0,25	-0,33	-0,28
Dir. do vento das 15 h	0,14*	0,19*	0,00*	0,18*	0,25	0,19*	0,29	0,18*
Dir. do vento das 13 h	-0,08*	0,08*	0,21*	0,05*	0,18*	0,23	0,12*	0,15*
Temp. compensada média	-0,08*	-0,07*	0,38	0,19*	0,07*	0,24	-0,01*	0,15*

*Correlações não significativas.

alocação mais adequada de recursos em estratégias de prevenção e combate aos incêndios.

A velocidade do vento, apesar de baixa correlação, mostrou sua importância na mais alta correlação da velocidade de propagação com a evaporação em tanque classe A, na mensuração da evaporação por este método, diferente do evaporímetro de Piché, o vento influencia nos resultados (Torres; Machado, 2011), assim, o material combustível por estar rente ao solo, protegido do vento no interior do povoamento, tem maior correlação com a evaporação quando mensurada no evaporímetro de Piché (localizado no interior do abrigo meteorológico protegido do vento), por outro lado, as chamas por alcançarem maiores alturas, e favorecer a convecção, são influenciadas pelo vento, assim, a evaporação mensurada no tanque classe A (que por ser aberto sofre influência do vento) tem maior correlação com as variáveis do comportamento do fogo. A velocidade de avanço do fogo é o resultado da

interação entre uma variedade de processos, incluindo a transferência de calor, umidade, evaporação e taxas de combustão (Linn *et al.*, 2012), é um dos parâmetros mais difíceis de ser estimado, devido a diversidade de fatores ambientais associados à ela. Por isso, modelos empíricos de estimativa da velocidade de propagação do fogo têm sido desenvolvidos em várias regiões do mundo, embora sejam de uso limitado a condições específicas, tanto de ambiente como de características do fogo (Batista *et al.*, 2013).

Apesar de se tratar de um experimento no interior de um povoamento, a insolação foi a mais correlacionada com a altura das chamas, isto pode ser explicado pela íntima ligação deste elemento com a umidade do ar, visto que este, quando mais seco, menor a quantidade de nuvens formadas, o que aumenta a incidência dos raios solares. A insolação está ligada também à radiação do Sol, e, quanto maior o tempo exposto à luz solar, maior o tempo de

exposição à sua radiação, a exposição do combustível à insolação provoca, ainda, a evaporação, acelerando sua secagem (Torres *et al.*, 2010).

Estas observações variam de acordo com a localidade, enquanto na Alemanha, Holsten *et al.* (2013) observaram que a variável meteorológica mais correlacionada com as ocorrências de incêndios, em 9 dos 13 estados estudados, é a umidade relativa e que a menor correlação encontrada foi para a temperatura máxima, no Líbano, Hamadeh *et al.* (2017) observaram que a umidade relativa, velocidade do vento e precipitação têm fraca correlação com as ocorrências de incêndios, por outro lado a temperatura foi a mais correlacionada com as ocorrências. No Paraná, Batista *et al.* (2013) também encontraram maiores correlações entre intensidade do fogo e velocidade de propagação para a temperatura do ar em comparação com a umidade relativa do ar. Já no Japão, Okano e Yamano (2015), concluíram que a intensidade e os principais parâmetros do comportamento do fogo dependem significativamente da velocidade do vento e umidade relativa do ar e menos da temperatura do ar.

A comparação entre os resultados aqui obtidos com os de outros estudos mostram que as potenciais diferenças no comportamento do fogo, entre regiões diferentes, precisam ser consideradas quando do planejamento otimizado e adoção de medidas geograficamente específicas de prevenção de incêndios (Zumbrunnen *et al.*, 2011).

5. Conclusões

Um dos resultados mais relevantes dessa pesquisa, foram as altas correlações encontradas entre algumas variáveis do comportamento do fogo com as variáveis ambientais, viabilizando o desenvolvimento de modelos para estimativa do comportamento do fogo, o que poderá trazer uma maior eficiência nas ações de prevenção e combate a incêndios florestais. Contudo, variações dos resultados obtidos, com os de outros estudos, indicam que modelos matemáticos com as variáveis analisadas podem, também, gerar resultados diferentes. Isto pode levar à estimativa incorreta do comportamento do fogo mostrando que a utilização de modelos empíricos deve ser limitada a áreas com variáveis ambientais homogêneas.

De forma geral, observou-se que o conteúdo de umidade é a mais importante propriedade que controla a inflamabilidade dos combustíveis. A umidade do material combustível é o reflexo das condições atmosféricas e pode variar rapidamente. Por outro lado, os materiais finos constituem uma porção substancial da carga do combustível e sua maior intimidade com as variações meteorológicas, em grande parte, determinam o comportamento do fogo.

Os resultados apresentados mostram que uma variável, isoladamente, não explica o comportamento do fogo, o qual depende da atuação conjunta de todas as variáveis.

Referências

- BATISTA, A.C.; BEUTLING, A.; PEREIRA, J.F. Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliottii*. *Árvore*, v. 37, n. 5, p. 779-787, 2013.
- BORENSTEIN, M.; HEDGES, L. V; HIGGINS, J.; ROTHSTEIN, H. **Introduction to Meta-Analysis**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- BOULANGER, Y.; GAUTHIER, S.; GRAY, D.R.; LE GOFF, H.; LEFORT, P. Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada. *Ecological Applications*, v. 23, n. 4, p. 904-923, 2013.
- BROWN, J.K.; OBERHEU, R.D.; JOHNSTON C.M. **Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior west**. Gen. Tech. Rep. INT 129. Ogden: USDA Forest Service; 1982.
- BROWN J.K.; BEVINS, C. **Surface fuel loadings and predicted fire behavior for vegetation types in the northern Rocky Mountains**. Research Note INT-358. Ogden: USDA Forest Service; 1986.
- BYRAM G.M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS K.P. (Ed.). **Forest fire: control and use**. New York: McGraw-Hill, 1959.
- CANSLER, C.A.; MCKENZIE, D. Climate, fire size, and biophysical setting control fire severity and spatial pattern in the northern Cascade Range, USA. *Ecological Applications*, v. 24, n. 5, p. 1037-1056, 2014.
- CHANG, Y.; ZHU, Z.; BU, R.; LI, Y.; HU, Y. Environmental controls on the characteristics of mean number of forest fires and mean forest area burned (1987-2007) in China. *Forest Ecology and Management*, v. 356, p. 13-21, 2015.
- COUNTRYMAN C.M. **The nature of heat**. Portland: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1977.
- FALK, D.A.; MILLER, C.; MCKENZIE, D.; BLACK, A.E. Cross-scale analysis of fire regimes. *Ecosystems*, v. 10, n. 5, p. 809-823, 2007.
- FANG, L.; YANG, J.; ZU, J.; LI, G.; ZANG, J. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. *Forest Ecology and Management*, v. 356, p. 2-12, 2015.
- HAMADEH, N.; KAROUNI, A.; DAYA, B.; CHAUVET, P. Using Correlative Data Analysis to Develop Weather Index That Estimates the Risk of Forest Fires in Lebanon & Mediterranean: Assessment versus Prevalent Meteorological Indices. *Case Studies in Fire Safety*, v. 7, p. 8-22, 2017
- HAMMIL, K.; PENMAN, T.; BRADSTOCK, R. Responses of resilience traits to gradients of temperature, rainfall and fire frequency in fire-prone, Australian forests: potential consequences of climate change. *Plant Ecology*, v. 217, n. 6, p. 403-412, 2016.
- HANTSON, S.; PUEYO, S.; CHUVIECO, E. Global fire size distribution: From power law to log-normal. *International Journal of Wildland Fire*, v. 25, n. 4, p. 403-412, 2016.
- HARVEY, B.; DONATO, D.; TURNER, M. Burn me twice, shame on who? Interactions between successive forest fires across a temperate mountain region. *Ecology*, v. 97, n. 9, p. 2272-2282, 2016.

- HERAWATI, H.; SANTOSO, H. Tropical forest susceptibility to and risk of fire under changing climate: A review of fire nature, policy and institutions in Indonesia. **Forest Policy and Economics**, v. 13, n. 4, p. 227-233, 2011.
- HOLSTEN, A.; DOMINIC, A.R.; COSTA, L.; KROPP, J.P. Evaluation of the performance of meteorological forest fire indices for German federal states. **Forest Ecology and Management**, v. 287, p. 123-131, 2013.
- JOLLY, W.M.; COCHRANE, M.A.; FREEBORN, P.H.; HOLDEN, Z.A.; BROWN, T.J. *et al.* Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. **Nature Communications**, v. 6, n. 5, p. 1-11, 2015
- LINN, R.R.; CANFIELD, J.M.; CUNNINGHAM, P.; EDMISTER, C.; DUPUY, J.L. *et al.* Using periodic line fires to gain a new perspective on multi-dimensional aspects of forward fire spread. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 157, p. 60-76, 2012.
- LITTELL, J. S.; GWOZDZ, R.B. Climatic Water Balance and Regional Fire Years in the Pacific Northwest, USA: Linking Regional Climate and Fire at Landscape Scales. In: MCKENZIE, D; MILLER, C.; FALK, D. A. (Orgs.). **The Landscape Ecology of Fire**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011.
- LIU, Z.; YANG, J.; CHANG, Y.; WEISBERG, P.; HE, H.S. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. **Global Change Biology**, v. 18, n. 6, p. 2041-2056, 2012.
- LIU, Z.; YANG, J.; HE, H.S. Identifying the Threshold of Dominant Controls on Fire Spread in a Boreal Forest Landscape of Northeast China. **PLoS ONE**, v. 8, n. 1, 2013.
- MORTON, D.C.; COLLATZ, G.J.; WANG, D.; RANDERSON, J.T.; GIGLIO, L.; *et al.* Satellite-based assessment of climate controls on US burned area. **Biogeosciences**, v. 10, n. 1, p. 247-260, 2013.
- OKANO, Y.; YAMANO, H. Forest fire propagation simulations for a risk assessment methodology development for a nuclear power plant. **Case Studies in Fire Safety**, v. 4, p. 1-10, 2015.
- PARKS, S.A.; PARISIEN, M.A.; MILLER, C.; DOBROWSKI, S.Z. Fire activity and severity in the western US vary along proxy gradients representing fuel amount and fuel moisture. **PLoS ONE**, v. 9, n. 6, p. 1-8, 2014
- PARISIEN, M.A.; PARKS, S.A.; KRAWCHUK, M.A.; FLANNIGAN, M.D.; BOWMAN, L.M.; *et al.* Scale-dependent controls on the area burned in the boreal forest of Canada, 1980-2005. **Ecological Applications**, v. 21, n. 3, p. 789-805, 2011.
- PYNE, S.K.; ANDREWS, P.L.; LAVEN, R.D. **Introduction to Wildland Fire**. New York: JohnWiley & Sons, 1996.
- SANTOS, J.F.; SOARES, R.V.; BATISTA, A.C. Perfil dos incêndios florestais no Brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 93-100, 2006.
- SCHMIDT, I.B.; FONSECA, C.B.; FERREIRA, M.C.; SATO, M.N. Experiências Internacionais de Manejo Integrado do Fogo em Áreas Protegidas - recomendações para implementação de manejo integrado de fogo no Cerrado. **Biodiversidade Brasileira**, v. 6, n. 2, p. 41-54, 2016.
- SILVA, M.A.A.; GALVANI, E.; ESCOBEDO, J.F. Avaliação de elementos meteorológicos durante a ocorrência de geadas em cultivo de pimentão, nas condições de ambiente protegido e campo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 1, p. 35-41, 2004.
- SLOCUM, M.; BECKAGE, B.; PLATT, W.; ORZELL, S.; TAYLOR, W. Effect of climate on wildfire size: a cross-scale analysis. **Ecosystems**, v. 13, n. 6, p. 828-840, 2010.
- TALAIA, M.A.R.; FERREIRA, V. Stress térmico na frente de fogo no combate a incêndio florestal: avaliação de risco. **Territorium**, v. 17, p. 83-91, 2010.
- TETTO, A.F.; SOARES, R.V.; BATISTA, A.C.; WENDLING, W.T. Incêndios florestais atendidos pela Klabin do Paraná no período de 1965 a 2009. **Cerne**, v. 21, n.3, p. 345-351, 2015.
- TONINI, M.; PEREIRA, M.; PARENTE, J.; OROZCO, C. Evolution of forest fires in Portugal: from spatio-temporal point events to smoothed density maps. **Natural Hazards**, v. 85, n. 3, p. 1489-1510, 2017.
- TORRES, F.T.P.; MACHADO, P.O. **Introdução à Climatologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- TORRES, F.T.P.; RIBEIRO, G.A.; MARTINS, S.V.; LIMA, G.S. Relações entre incêndios em vegetação e elementos meteorológicos na cidade de Juiz de Fora, MG. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 379-389, 2009.
- TORRES, F.T.P.; RIBEIRO, G.A.; MARTINS, S.V.; LIMA, G.S. Determinação do período mais propício às ocorrências de incêndios em vegetação na área urbana de Juiz de Fora, MG. **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 297-303, 2010.
- TORRES, F.T.P.; LIMA, G.S.; MARTINS, S.V.; VALVERDE, S. R. Analysis of efficiency of fire danger indices in forest fire prediction. **Revista Árvore**, v. 41, n. 2, p. 1-10, 2017.
- VAN WAGNER, C.E. Height of crown scorch in forest fires. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 3, n. 3, 1973.
- WASTL, C.; SCHUNK, C.; LEUCHNER, M.; PEZZATTI, G.B.; MENZEL, A. Recent climate change: Long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 162-163, p. 1-13, 2012.
- WOLTERS, V.; WOLTERS, V.; BENGTTSSON, J. Relationship among the Species richness of different taxa. **Ecology**, v. 87, n. 8, p. 1886-1895, 2006.
- ZAITSEV, A.S.; GONGALSKY, K.B.; MALMSTRÖM, A.; PERSSON, T.; BENGTTSSON, J. Why are forest fires generally neglected in soil fauna research? A mini-review. **Applied Soil Ecology**, v. 98, p. 261-271, 2016.
- ZUMBRUNNEN, T.; PEZZATTI, G.B.; MENÉNDEZ, P.; BUGMANN, H.; BÜRGI, M.; *et al.* Weather and human impacts on forest fires: 100 years of fire history in two climatic regions of Switzerland. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 12, p. 2188-2199, 2011.