

## Perigo de incêndio florestal: aplicação da Fórmula de Monte Alegre e avaliação do histórico para Piracicaba, SP

Forest fire danger: application of Monte Alegre Formula and assessment of the historic for Piracicaba, SP

Clayton Alcarde Alvares<sup>1</sup>, Ítalo Ramos Cegatta<sup>2</sup>, Lucas Augusto Abra Vieira<sup>2</sup>,  
Rafaela Freitas Pavani<sup>2</sup>, Eduardo Moré de Mattos<sup>2</sup>, Paulo Cesar Sentelhas<sup>2</sup>,  
José Luiz Stape<sup>3</sup> e Ronaldo Viana Soares<sup>4</sup>**Resumo**

O objetivo deste trabalho foi analisar o histórico do perigo de incêndio florestal dos últimos 70 anos na região de Piracicaba e validar a Fórmula de Monte Alegre (FMA) com dados de focos de calor provenientes de sensoriamento remoto orbital. Foram usados dados de umidade relativa do ar ( $UR_d$ ) e precipitação de uma estação meteorológica convencional (EMC) e de uma estação meteorológica automática (EMA), ambas localizadas na ESALQ/USP. Dados de focos de calor do município Piracicaba, entre 1999 e 2012, foram resgatados do sistema de monitoramento de queimadas do INPE a fim de testar a FMA. Uma vez que a FMA requer o uso da umidade relativa registrada às 13 h ( $UR_{13}$ ), e usando-se os dados da EMA, foi obtida uma relação exponencial altamente significativa entre a  $UR_d$  e a  $UR_{13}$  ( $R^2 = 0,86$ ;  $p < 0,0001$ ). Usando-se essa equação foi possível aplicar a FMA à série histórica da EMC, de 1943 a 2012. As ocorrências das classes de perigo de incêndio nulo, pequeno, médio, alto e muito alto, foram, respectivamente, iguais a 14,2%, 10,9%, 17,8%, 22,4% e 34,8%. No período de 1999 a 2012 um total de 1943 focos de calor foram detectados na área rural de Piracicaba, concentrados no outono e inverno. Mesmo em uma região de tipo climático diferente de onde ela foi desenvolvida, a FMA demonstrou eficiência na previsão do grau de perigo de incêndios, conforme mostraram as significativas correlações entre os graus de perigo e os focos de calor obtidos por sensoriamento remoto.

**Palavras-chave:** Umidade relativa, meteorologia florestal, sensoriamento remoto

**Abstract**

This study aimed at analyzing the historic of the forest fire danger in the last 70 years in Piracicaba and to validate the Monte Alegre Formula (FMA) with data of heat spots from remote sensing. A database of relative humidity ( $RH_d$ ) and rainfall from a conventional weather station (EMC) and from an automatic weather station (EMA), both located in ESALQ/USP, were used. Heat spots data of Piracicaba municipality, between 1999 and 2012, were recovered from monitoring of vegetation fires system of INPE in order to test the FMA. Since FMA requires the use of relative humidity observed at 13 p.m. ( $RH_{13}$ ) and using the EMA data, a highly significant exponential relationship between the  $RH_d$  and  $RH_{13}$  was achieved ( $R^2 = 0.86$ ,  $p < 0.0001$ ). Using this model it was possible to implement the FMA to EMC time series, from 1943 to 2012. The occurrences of the forest fire danger classes null, small, medium, high and very high, were respectively, of 14.2%, 10.9%, 17.8%, 22.4% and 34.8%. During the period 1999 - 2012 a total of 1943 heat spots were detected in the rural area of Piracicaba, concentrated in autumn and winter. Even in a climate type region different from where the FMA was developed, it was efficient for the prediction of fire danger, as shown by the significant correlations between the forest fire danger classes and heat spots obtained by remote sensing.

**Keywords:** Relative humidity, forest meteorology, remote sensing.

<sup>1</sup>IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais e FPC - Forest Productivity Cooperative. Av. Comendador Pedro Morgante, 3500. 13415-000, Piracicaba, SP. E-mail: [caalvares@yahoo.com.br](mailto:caalvares@yahoo.com.br).

<sup>2</sup>USP - Universidade de São Paulo, ESALQ - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, SP. E-mail: [italocegatta@gmail.com](mailto:italocegatta@gmail.com), [lucas.vieira@usp.br](mailto:lucas.vieira@usp.br), [rafaela.pavani@yahoo.com](mailto:rafaela.pavani@yahoo.com), [more.mattos@yahoo.com.br](mailto:more.mattos@yahoo.com.br) e [pcsentel.esalq@usp.br](mailto:pcsentel.esalq@usp.br).

<sup>3</sup>NCSU - North Carolina State University, 3108 Jordan Hall, 27695-8008, Raleigh, NC, EUA. e-mail: [jlstape@ncsu.edu](mailto:jlstape@ncsu.edu)

<sup>4</sup>UFPR - Universidade Federal do Paraná, Av. Pref. Lothário Meissner, 632, 80.210-170, Curitiba, PR. e-mail: [rvsoares@ufpr.br](mailto:rvsoares@ufpr.br)

## INTRODUÇÃO

Proteção Florestal é uma área da Ciência Florestal que estuda os incêndios florestais (CIANCIULLI, 1981). Incêndio florestal é a ocorrência de fogo tanto na vegetação natural com em plantações florestais, e as suas causas podem ter origens naturais, como raios, vulcões e meteoritos, mas em sua maioria eles são originados por efeitos antrópicos, por negligência, acidental ou intencionalmente.

Os incêndios florestais são tratados com notável importância devido aos grandes impactos causados, uma vez que seus efeitos estão relacionados à modificação do ambiente, onde a combustão da vegetação gera perdas nos âmbitos econômico, social e ambiental. O uso do fogo nos meios agrícolas e florestais é um assunto polêmico e muitas vezes mal compreendido, pois se por um lado o incêndio florestal é visto com apreensão, em algumas regiões e culturas a queima controlada da vegetação pode ser uma valiosa ferramenta no manejo agrícola e florestal (HOXIE, 1910; Mc NABB, 1995; SANTAELLA; DIAS PAES, 1995; SOARES, 1995). Sobre o tema, o Brasil sancionou a nova Lei Florestal, onde fica proibido o uso de fogo na vegetação, exceto em locais ou regiões cujas peculiaridades justifiquem o emprego do fogo em práticas agropastoris ou florestais e o plano de manejo seja aprovado por órgãos ambientais (BRASIL, 2012).

No Brasil, a preocupação com os impactos causados pelos incêndios florestais é antiga (ANDRADE, 1911; FRAGA, 1949), mas ganhou destaque após o grande incêndio que atingiu o estado do Paraná no inverno de 1963 (WASILEWSKI, 1965). Naquele ano os planaltos do estado do Paraná experimentaram severas geadas nos meses de junho a agosto e que somadas a uma pronunciada e prolongada seca de vários meses, culminaram com a maior catástrofe do gênero no país (TORTORELLI, 1964). Segundo o mesmo autor, quase uma centena de pessoas perderam a vida e aproximadamente 2.000.000 ha de florestas foram queimados, sendo 20.000 ha de plantações de *Araucaria angustifolia*, 500.000 ha de florestas primárias e 1.500.000 ha de florestas secundárias.

Anualmente, no Brasil, milhares de hectares sofrem com a queima descontrolada da vegetação natural e de plantações agrícolas e florestais (SANTOS et al., 2006; SOARES, 1988; SOARES; SANTOS, 2004; VASCONCELOS et al., 2013) e a maior parte destes incêndios florestais está

concentrada no centro-oeste, norte e parte do sudeste do Brasil, nos biomas do Cerrado e da Amazônia (REVISTA REFERÊNCIA FLORESTAL, 2013). Nessas regiões, predominam os tipos climáticos Aw, As, BSh e Cwa (ALVARES et al., 2013a), os quais combinam os períodos secos do ano à baixa umidade do ar fazendo com que a ocorrência de incêndios em matas, pastos e plantações florestais seja facilitada. Desta forma, os incêndios florestais podem variar bastante de região para região e durante as estações do ano. Na região de Piracicaba, muitos incêndios florestais foram registrados nos últimos anos (CATHARINO, 1989; LUZ; FERREIRA, 1985; NASCIMENTO et al., 1999; OLIVEIRA, 1997), os quais têm impactado as florestas tanto do ponto de visto biológico, econômico e científico.

A ocorrência dos incêndios florestais, assim como a intensidade e a velocidade com que eles se propagam, está diretamente relacionada a fatores climáticos, como umidade relativa, temperatura e velocidade do vento (NUNES et al., 2006). Assim, por meio de métodos agrometeorológicos pode-se determinar o grau de perigo de ocorrência de incêndios nas áreas rurais, e tal sistema de alerta possibilita a tomada das devidas providências para a prevenção e estratégias de controle do fogo (PEREIRA et al., 2002). Recentemente, outras tecnologias vêm sendo usadas no monitoramento do perigo de incêndio florestal como o uso de radar meteorológico (SARAIVA, 2013) e de sensoriamento remoto orbital (DEPPE et al., 2005), o que tem aumentado a eficiência dos métodos agrometeorológicos.

A utilização de índices como indicadores de perigo de incêndio iniciou-se nos anos de 1930 no Canadá (WRIGHT, 1933) e nos Estados Unidos (LOVERIDGE, 1935). Os índices são divididos em métodos não cumulativos e cumulativos (PEREIRA et al., 2002). Os classificados como não cumulativos são aqueles que se baseiam somente nas condições do tempo vigentes no dia, e nesse tipo enquadra-se o índice de Angström. Esse índice foi introduzido no Brasil pelo Ministério da Agricultura na década de 1960, após um incêndio florestal no estado do Paraná (SOARES, 1998). Os métodos cumulativos são aqueles que levam em consideração as condições climáticas de uma sucessão de dias. Soares (1972) testou vários elementos meteorológicos (umidade relativa, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, e ponto de orvalho), em diferentes equações de perigo de incêndio florestal, e o índice que obteve melhor desempenho para

a região sul do Brasil foi a Fórmula de Monte Alegre (FMA), a qual foi desenvolvida e validada para a região de Telêmaco Borba, PR. Nos últimos anos a FMA tem sido testada em outras regiões do Brasil (SILVA et al., 2001; PEZZOPANE et al., 2001; RIBEIRO et al., 2011).

A aplicação de um índice de perigo de incêndio aliada a estratégias de prevenção, detecção e combate ao fogo, pode reduzir em muito as perdas causadas por esses eventos. Assim, os objetivos deste trabalho foram: i) desenvolver de uma equação de estimativa da umidade relativa do ar registrada às 13 h em função da umidade relativa média diária, de modo a viabilizar o uso da Fórmula de Monte Alegre; ii) analisar o histórico do perigo de incêndio florestal dos últimos 70 anos para a região de Piracicaba; iii) avaliar o desempenho da Fórmula de Monte Alegre com dados de focos de calor provenientes de sensoriamento remoto orbital.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

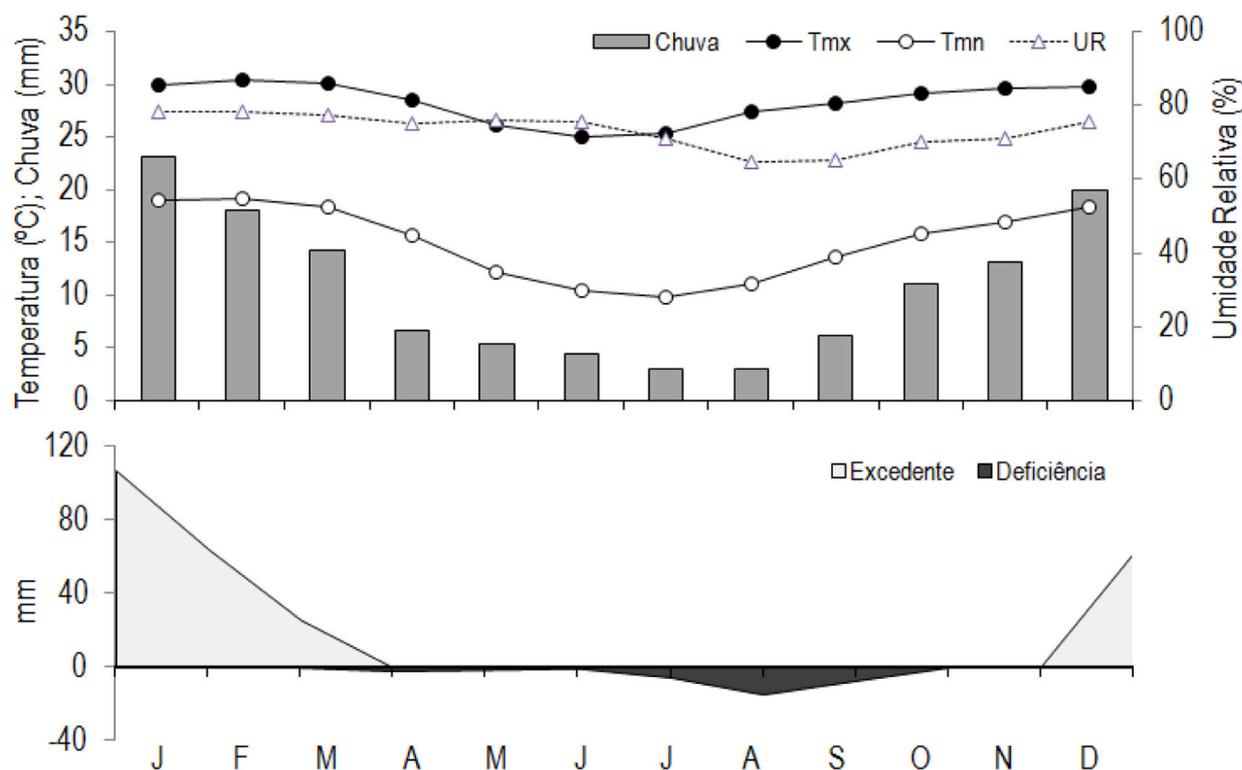
O município de Piracicaba está localizado no centro-sul do estado de São Paulo. O clima da região é mesotérmico, ocorrendo os tipos climáticos Cwa e Cfa, respectivamente, no norte e no sul do município (ALVARES et al., 2013a). Am-

bos os tipos climáticos caracterizam Piracicaba como uma região subtropical com verões quentes e chuvosos e com invernos moderadamente frios e secos (Cwa) ou sem estação seca (Cfa). A precipitação anual é de 1.278 mm e a temperatura média anual é 21,6 °C (ALVARES et al., 2013b). A média histórica da umidade relativa do ar varia de 65%, entre agosto e setembro, a 78% entre janeiro e fevereiro (Figura 1).

### Dados de estações meteorológicas

Foram usados dados de umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica de duas estações meteorológicas instaladas na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), nas coordenadas 22° 42' 30" S - 47° 38' 00" W e altitude 546 m, sendo: i) EMC: estação meteorológica convencional, a qual registra dados diários de precipitação desde 1917 e umidade relativa do ar ( $UR_d$ ) desde 1943; ii) EMA: estação meteorológica automática, a qual registra dados de umidade relativa do ar a cada 15 minutos desde 1997.

Para calcular o perigo de incêndio florestal da EMC foi necessário estimar a umidade relativa do ar registrada às 13h ( $UR_{13}$ ) para aplicá-la na marcha de cálculos da FMA, uma vez que a EMC registra apenas valores de  $UR_d$ . Para isso, empregou-se a série temporal, de 1997 a 2012,



**Figura 1.** Caracterização climática e balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP. Fonte: Estação meteorológica convencional da ESALQ/USP (22° 42' 30" S; 47° 38' 00" W; 546 m) entre 1917 e 2012.

**Figure 1.** Climate characterization and normal climate water balance for Piracicaba, SP. Source: Conventional weather station of the ESALQ/USP (22° 42' 30" S; 47° 38' 00" W; 546 m) between 1917 and 2012.

contendo os valores diários de  $UR_{13}$  (variável dependente) e  $UR_d$  (variável independente) da EMA. A equação obtida foi então aplicada para estimar a  $UR_{13}$  da EMC e assim calcular, de forma contínua, a FMA dos últimos 70 anos (1943 a 2012) em Piracicaba, SP.

### Fórmula de Monte Alegre

O perigo de incêndio florestal foi calculado aplicando-se a Fórmula de Monte Alegre - FMA (SOARES, 1972), que é um índice cumulativo baseado em apenas duas variáveis meteorológicas: a umidade relativa do ar registrada às 13 h ( $UR_{13}$ ), empregada diretamente no cálculo do perigo, e o total diário de precipitação pluviométrica, o qual é aplicado como fator restritivo (Equação 1), conforme as regras apresentadas na Tabela 1. Soares (1972) também estabeleceu uma escala de interpretação da FMA, e uma vez calculado o índice de incêndio, os valores acumulados são classificados em diferentes graus de perigo de incêndio (Tabela 2).

$$FMA = \sum_{i=1}^n \frac{(100)}{URi_{13h}} \quad (1)$$

Em que:

FMA = Fórmula de Monte Alegre;

$URi_{13h}$  = umidade relativa do ar (%) às 13 h no i-ésimo dia; e

n = número de dias sem chuva maior que 12,9mm

### Dados de sensoriamento remoto

Os dados de focos de calor utilizados neste estudo são provenientes da plataforma Sistema de Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais por Satélite em Tempo Quase-Real, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2013). A detecção dos focos ativos de queima de vegetação em imagens de satélites é realizada no INPE desde meados da década de 1980 (BATISTA, 2004). Os dados são obtidos nas imagens

**Tabela 2.** Interpretação do grau de perigo de incêndio florestal da Fórmula de Monte Alegre (FMA).  
**Table 2.** Forest fire danger classes for the Monte Alegre Formula (FMA).

FMA	Grau de perigo
0 - 1,0	Nulo
1,1 - 3,0	Pequeno
3,1 - 8,0	Médio
8,1 - 20,0	Alto
> 20,0	Muito alto

termais dos satélites meteorológicos NOAA quatro vezes ao dia, GOES oito vezes ao dia, e Terra e Aqua duas vezes por dia, e em seguida são integrados a um sistema de informações geográficas (SIG) (SOUZA et al., 2003). As informações relativas aos algoritmos usados pelo INPE para identificação de focos de calor nas imagens de satélite podem ser obtidos em Setzer et al. (1992, 2013).

Todos os dados de focos de calor, entre 1999 e 2012, dentro dos limites do município de Piracicaba foram resgatados do sistema de monitoramento de queimadas do INPE. Em seguida, os dados foram carregados e espacializados em um SIG e aqueles que se encontravam dentro do perímetro urbano municipal foram apagados do banco de dados, pois se confundiam com ilhas de calor formadas pelos diferentes usos da terra em alguns bairros de Piracicaba (ALVARES et al., 2005). Após isso, os dados de focos de calor foram usados para avaliar o desempenho da FMA para as condições climáticas de Piracicaba. Primeiramente, o número de focos de calor foi verificado em termos de distribuição de frequência mensal e anual. Usando essa mesma base de dados, e dentro de cada classe de perigo da FMA, todos os dias, entre 1999 e 2012, foram classificados como dia de incêndio, se pelo menos um foco de calor foi registrado no referido dia, e dia de não-incêndio, caso não tenha nenhum registro de foco de calor no referido dia. Para avaliar o desempenho da FMA foram

**Tabela 1.** Restrições na somatória da Fórmula de Monte Alegre (FMA) para perigo de incêndio, em função da ocorrência de precipitação.

**Table 1.** Restrictions in the Monte Alegre Formula (FMA) for fire danger, related to rainfall occurrence.

Precipitação mm dia <sup>-1</sup>	Modificação no cálculo
< 2,5	Nenhuma, isto é, continuar o cálculo e a somatória como se não houvesse precipitação
2,5 a 4,9	Abater 30% na FMA acumulada até a véspera e somar (100/H) do dia, isto é, $FMA_{hoje} = 0,7 * FMA_{ontem} + FMA_{i(hoje)}$
5,0 a 9,9	Abater 60% na FMA acumulada até a véspera e somar (100/H) do dia, isto é, $FMA_{hoje} = 0,4 * FMA_{ontem} + FMA_{i(hoje)}$
10,0 a 12,9	Abater 80% na FMA acumulada até a véspera e somar (100/H) do dia, isto é, $FMA_{hoje} = 0,2 * FMA_{ontem} + FMA_{i(hoje)}$
> 12,9	Interromper o cálculo anterior (FMA = 0) e começar novo cálculo no dia seguinte

usados dois métodos de comparação entre as classes do índice e o número de focos de calor em cada classe de perigo. O primeiro método foi verificar a proporção de dias de incêndio e dias de não-incêndio para cada classe de perigo da FMA. O segundo método constou de relacionar, na escala mensal, o número de foco de calor com o número de dias de cada classe de perigo da FMA, entre 1999 e 2012.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

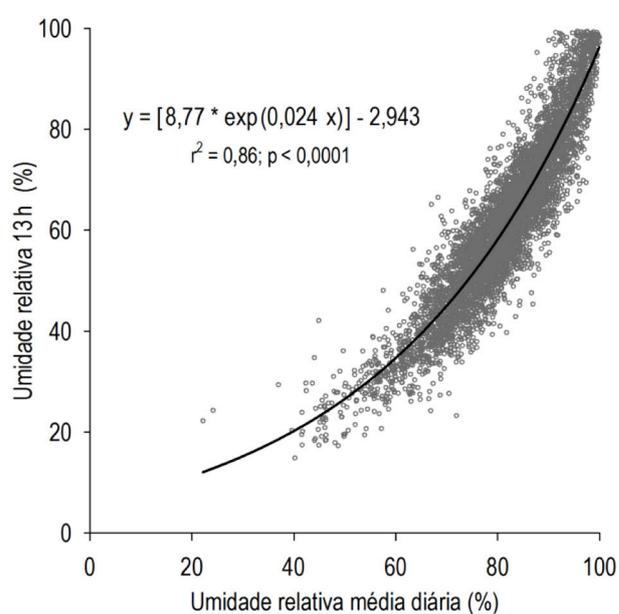
### Estimava da umidade relativa às 13 h

Entre o período estudado da EMA, de abril de 1997 a julho de 2013, foram compilados 6051 pares de dados, relativos a  $UR_d$  e a  $UR_{13}$  (Figura 2). A sazonalidade média apresentada pela  $UR_d$  foi semelhante àquela apresentada pelos dados de umidade relativa da EMC (Figura 1). Nestes quase 17 anos de dados da EMA, a  $UR_d$  variou de 22,2 a 99,9%, enquanto que a  $UR_{13}$  variou de 14,9 a 100%. Na média geral, a  $UR_{13}$  foi 23% inferior a  $UR_d$ , e na média anual, essa diferença variou de 18% (2009) a 26% (1999). A proporção mensal entre a  $UR_{13}$  e  $UR_d$  foi marcadamente estacional: entre dezembro e março, a  $UR_{13}$  manteve-se 20% inferior a  $UR_d$ , com mínima de 15% em janeiro; entre abril a junho e outubro e novembro a  $UR_{13}$  foi entre 20 a 25% inferior a  $UR_d$ ; e entre julho a setembro essa diferença foi superior a 25%. Sobre esse período do ano, Reis et al. (2012) analisando o ajuste da distribuição dos valores mínimos mensais de umidade relativa do ar de Piracicaba entre 1943 e 2011, verificaram que setembro teve os menores níveis de umidade relativa e que para os tempos de retorno de 10, 30, 50 e 100 anos, o método previu valores mínimos de umidade relativa iguais a 27,7%, 21,4%, 19% e 16%, respectivamente.

Considerando-se todo o período de dados da EMA (6051 dias), a  $UR_d$  apresentou relação exponencial altamente significativa com a  $UR_{13}$  ( $R^2 = 0,86$ ;  $p < 0,0001$ ), explicando 86% da variabilidade desta variável. Aplicando-se essa equação, por exemplo, em dias com  $UR_d$  de 30, 60 e 90%, obteve-se  $UR_{13}$  de 15, 34 e 73%, respectivamente. Nunes et al. (2005), em situação semelhante, desenvolveram equações que estimam a  $UR_{13}$  por meio da umidade relativa das 9 e 15 h, que são os horários padrões utilizados nas estações meteorológicas do Paraná, permitindo a utilização da Fórmula de Monte Alegre a partir deles. Para as condições climáticas daquele estado, os autores encontraram uma equa-

ção não-linear que explica a  $UR_{13}$  em função da umidade relativa das 15 h, e com alto coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,86$ ), semelhante ao encontrado no presente estudo.

Para Piracicaba, SP, a equação obtida da relação entre  $UR_{13}$  e  $UR_d$ , com dados da EMA, foi aplicada aos dados da EMC para se estimar a  $UR_{13}$  dos últimos 70 anos. Embora haja diferenças tecnológicas nos sensores das estações meteorológicas, Sentelhas et al. (1997) realizaram uma análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática, nas mesmas estações (EMA e EMC) do presente estudo, e concluíram que o desvio médio da umidade relativa foi de apenas 2,9%.



**Figura 2.** Relação entre a umidade relativa média diária e a umidade relativa às 13 h, em Piracicaba, SP. Todos os coeficientes da equação são significativos ao nível de 5% de probabilidade.

**Figure 2.** Relationship between mean daily relative humidity and relative humidity at 1:00 PM, in Piracicaba, São Paulo state, Brazil. All coefficients are statistically significant at the 5% level.

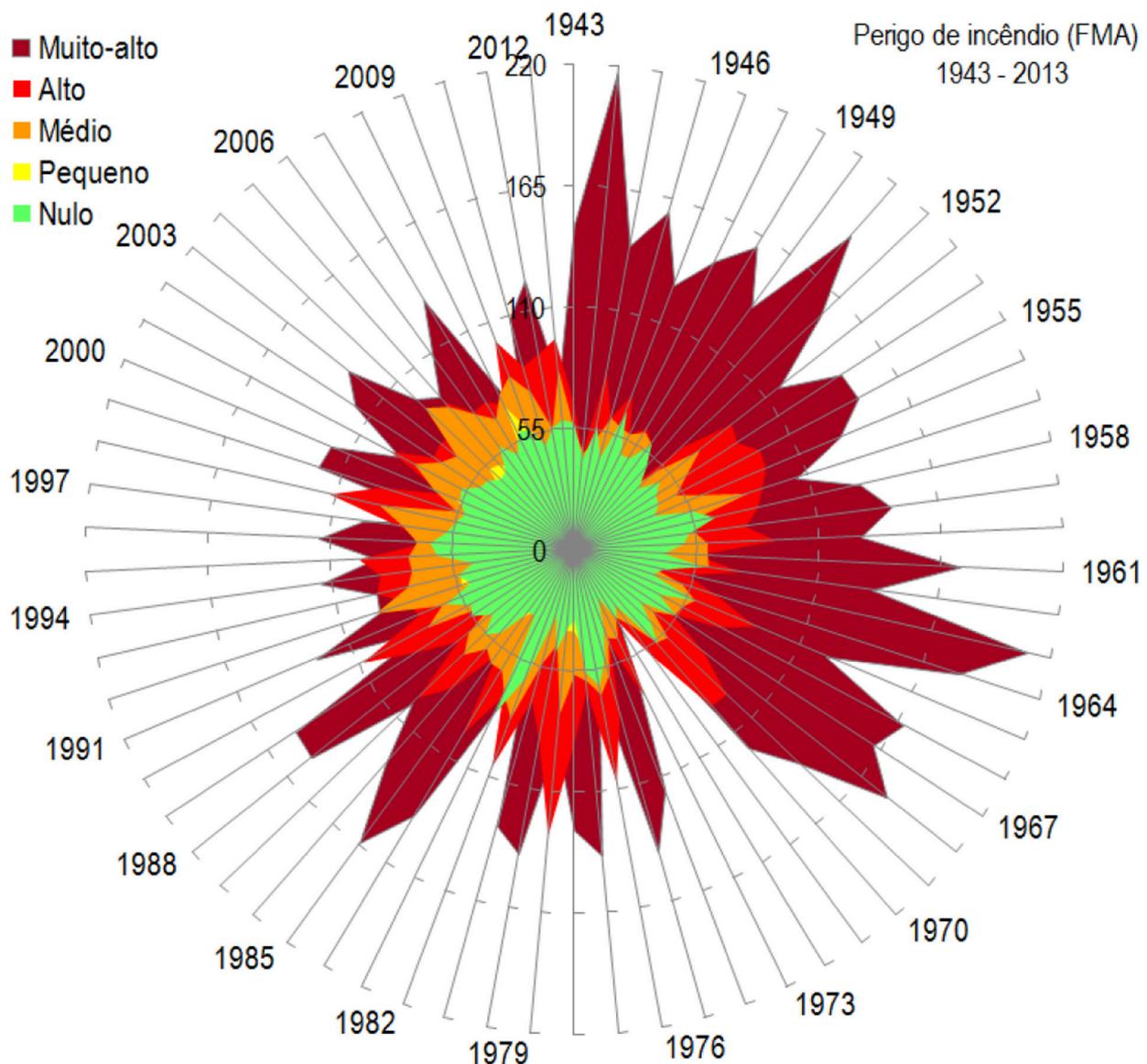
### Histórico da Fórmula de Monte Alegre

Com base nos dados do período de 1943 a 2012 (70 anos) utilizou-se a Fórmula de Monte Alegre para a determinação do perigo de incêndio florestal para as condições climáticas de Piracicaba, o que somou quase 25000 dias de avaliação do índice. Devido à inexistência de dados meteorológicos, de umidade relativa e de precipitação, não foi possível determinar o índice em apenas 3,2% dos dias.

Entre 1943 e 2012 a FMA registrou um valor acumulado máximo de 351,5, atingido em 16 de agosto de 1963. Dentro de toda a séria histórica o índice superou o valor de 300 em ape-

nas 20 dias (0,08%); em 85 dias (0,34%) a FMA foi maior que 250; em 235 dias (0,94%) a FMA foi maior que 200; em 578 dias (2,32%) a FMA foi maior que 150; e em 1443 dias (5,79%) a FMA foi maior que 100. Desta forma, em 90,5% dos dias a FMA oscilou entre 0 e 100. Em Irati (PR), para um período de 37 anos de dados meteorológicos, Tetto et al. (2010) encontraram uma FMA máxima acumulada de 86,8. Durante o período utilizado para o desenvolvimento da FMA (1965 a 1971) o valor máximo registrado em dias de ocorrência de incêndios foi 85,33 (SOARES, 1972). Isto demonstra que a região de Piracicaba apresenta um período seco mais longo do que a região paranaense para a qual a FMA foi desenvolvida.

As classes de interpretação de perigo de incêndio não apresentaram a mesma frequência ao longo do período estudado. As ocorrências das classes de perigo de incêndio nulo, pequeno, médio, alto e muito alto, foram, respectivamente, iguais a 14,2%, 10,9%, 17,8%, 22,4% e 34,8%. Entre 1943 e 1970, mais de 33% de cada ano foi classificado como perigo de incêndio muito alto. Após 1970, essa porcentagem foi menor e apresentou forte oscilação na década de 1980 (Figura 3), principalmente devido à sazonalidade das chuvas, a qual é fator restritivo ao acúmulo do índice FMA. Sobre isso, Pezzopane et al. (2001) mostraram uma forte correlação ( $R^2 = 0,83$ ) entre a FMA e a precipitação total para as condições climáticas de Viçosa, MG.



**Figura 3.** Número de dias, por ano, nas classes da Fórmula de Monte Alegre (FMA) para perigo de incêndio, no período de 1943 a 2012 (70 anos), em Piracicaba, SP.

**Figure 3.** Number of days, per year, in the classes of fire danger of Monte Alegre Formula (FMA), for the period 1943 to 2012 (70 years), in Piracicaba, São Paulo state, Brazil.

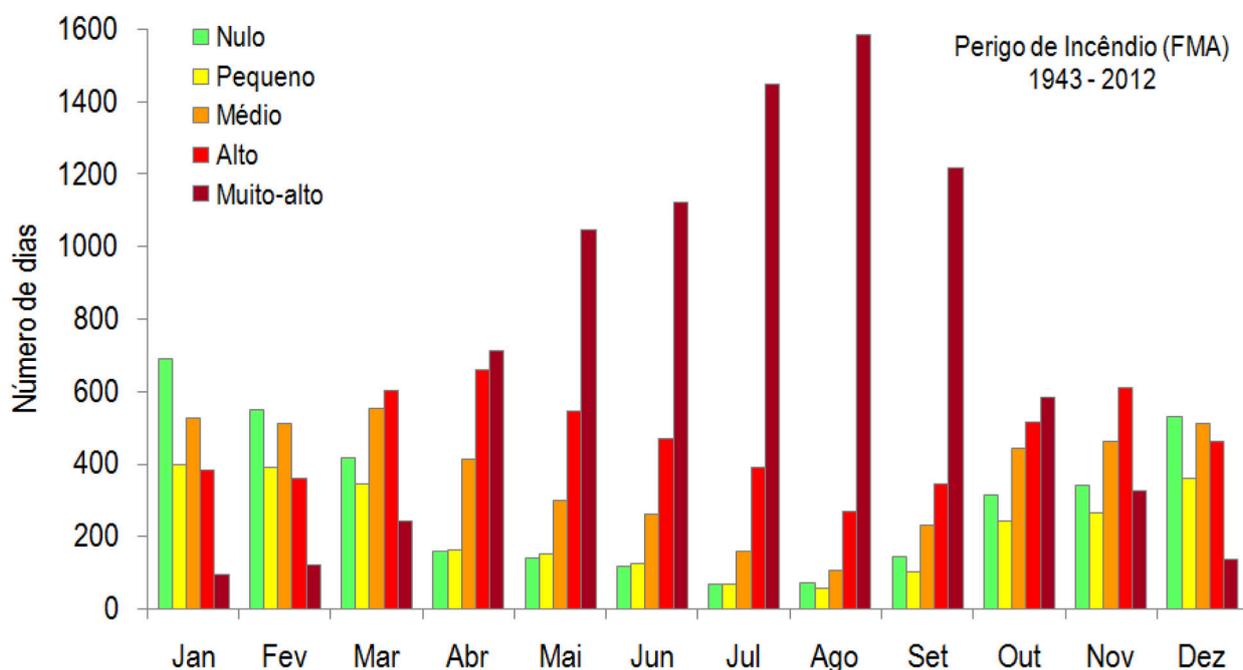
A FMA, por ser resultante de variáveis meteorológicas sazonais, apresentou na região de Piracicaba uma marcante distribuição das classes de perigo de incêndio ao longo dos meses (Figura 4). A classe de perigo nulo foi a mais frequente de dezembro a fevereiro, enquanto que de abril a outubro há predomínio da classe de perigo muito alto. Porém, entre junho e setembro a região de Piracicaba é mais suscetível aos incêndios florestais, pois a classe de perigo muito alto foi mais frequente que a soma de todas as outras. Nesta mesma época, a classe de perigo nulo representou apenas 5% dos dias.

### Focos de calor e a FMA

No período de 1999 a 2012 um total 1943 focos de calor foram detectados na área rural de

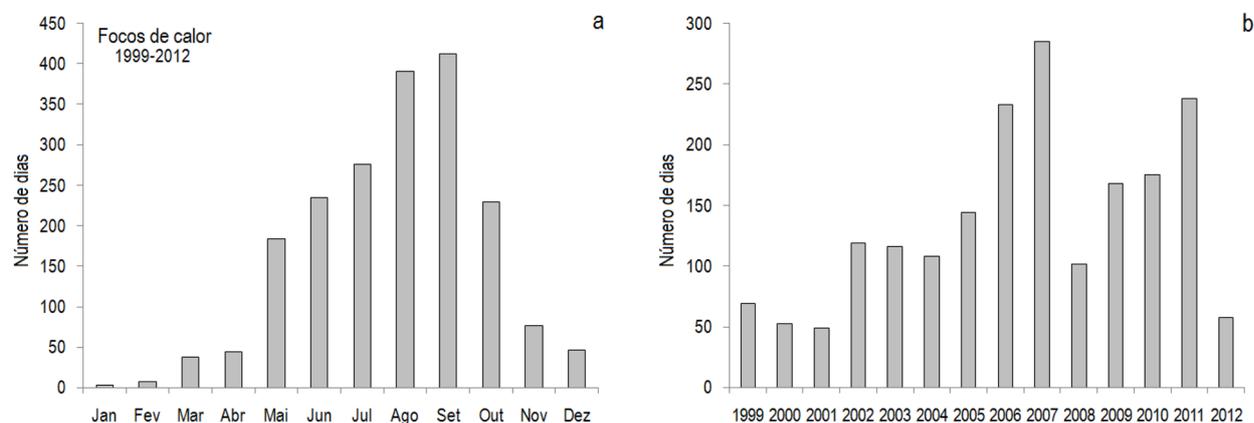
Piracicaba. A distribuição dos focos de calor é sazonal, e são concentrados no outono e inverno, quando 89% desses focos foram registrados em apenas seis meses do ano, entre maio e outubro (Figura 5). A variabilidade inter-anual foi elevada, sendo que nos anos 2000, 2001 e 2012 houve menos de 60 focos de calor, enquanto que em 2007 mais de 280 foram detectados.

A validade da Fórmula de Monte Alegre foi testada por meio da comparação entre seus resultados em termos do perigo de incêndio e dados de focos de calor provenientes dos levantamentos junto ao sistema de monitoramento de queimadas do INPE. Foram comparadas por classes de perigo de incêndio as proporções de dias com e sem focos de calor. Entre 1999 e 2012, 98% dos dias considerados apresentaram



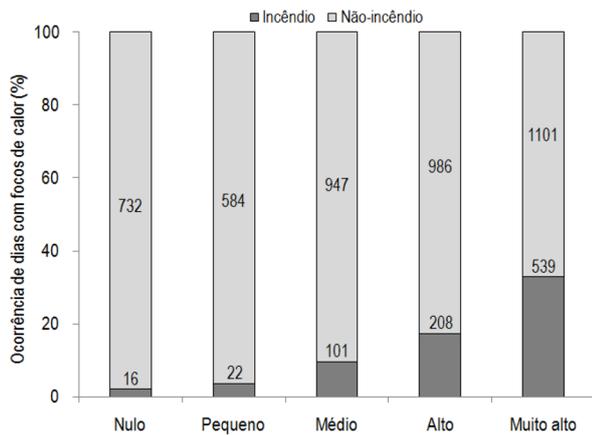
**Figura 4.** Número de dias, por mês, nas classes da Fórmula de Monte Alegre (FMA) para perigo de incêndio, no período de 1943 a 2012 (70 anos), em Piracicaba, SP.

**Figure 4.** Number of days, per month, in the classes of fire danger of Monte Alegre Formula (FMA), for the period 1943 to 2012 (70 years), in Piracicaba, São Paulo state, Brazil.



**Figura 5.** Número de focos de calor por mês (a) e por ano (b) registrados em Piracicaba (SP) pelo sistema de monitoramento de queimadas do INPE, de 1999 a 2012. Fonte: INPE (2013)

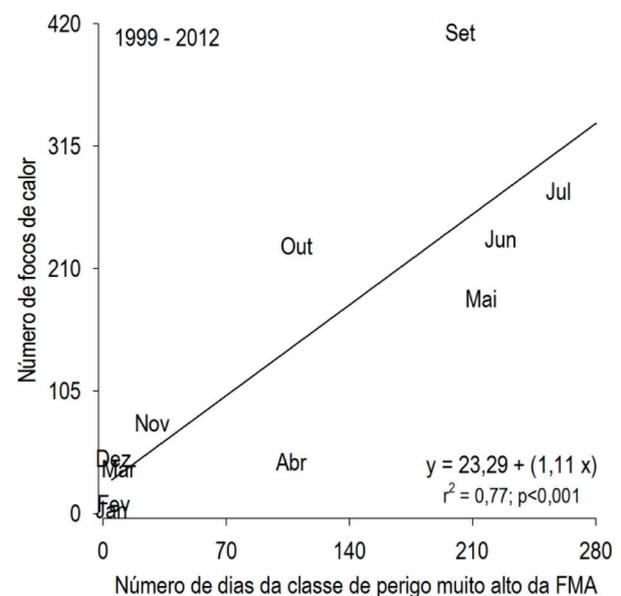
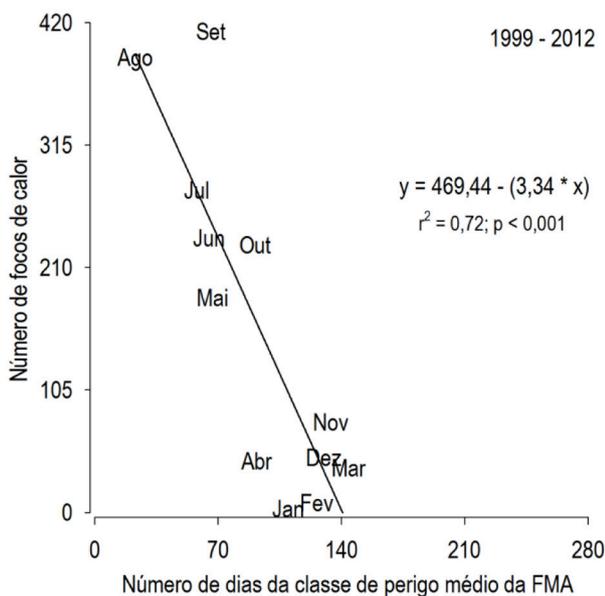
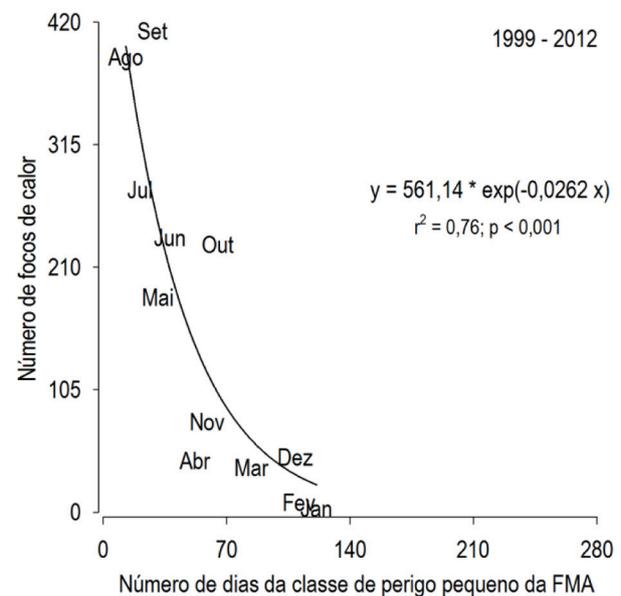
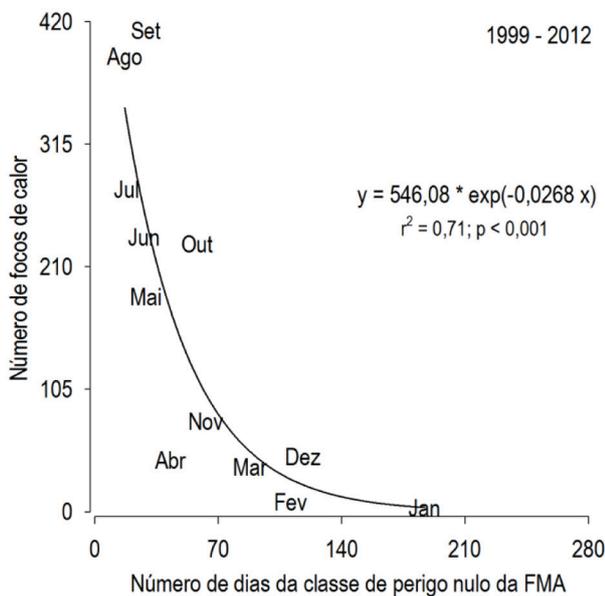
**Figure 5.** Number of heat spots, per month (a) and per year (b), recorded in Piracicaba, São Paulo state, Brazil, by the INPE system of fire monitoring, 1999 to 2012 (INPE, 2013). Source: INPE (2013).



**Figura 6.** Proporção de dias com e sem focos de calor classificados por perigo de incêndio.

**Figure 6.** Proportion of days with and without heat spots ranked by forest fire danger.

a classe de perigo nulo, ou seja, como de não incêndio (ausência de focos de calor), enquanto que na classe de perigo muito alto essa proporção caiu para 67% (Figura 6). O número de dias das classes de perigo de incêndio da FMA apresentou relação, na escala mensal, com o número de focos de calor. Significativas interações negativas foram encontradas entre as classes de perigo nulo ( $R^2 = 0,71$ ;  $p < 0,001$ ), pequeno ( $R^2 = 0,76$ ;  $p < 0,001$ ) e médio ( $R^2 = 0,72$ ;  $p < 0,001$ ) com o número de focos de calor (Figura 7). Por outro lado, foi obtida uma significativa relação positiva entre o número número de dias da classe de perigo muito alto ( $R^2 = 0,77$ ;  $p < 0,001$ ) com número de focos de calor. Deppe et al.



**Figura 7.** Relações entre o número de dias das classes de perigo de incêndio da Fórmula de Monte Alegre (FMA) e o número de focos de calor registrados pelo sistema de monitoramento de queimadas do INPE, em Piracicaba, SP, de 1999 a 2012. Todos os coeficientes da equação são significativos ao nível de 5% de probabilidade.

**Figure 7.** Relationship between the frequency of Monte Alegre Formula (FMA) forest fire danger classes and monthly totals of heat spots recorded by the INPE system of fire monitoring, in Piracicaba, São Paulo state, Brazil, 1999 to 2012. All coefficients are statistically significant at the 5% level.

(2005), no Paraná, e Oliveira (2006), em Minas Gerais, também demonstraram com sucesso a relação entre a Fórmula de Monte Alegre e os focos de calor obtidos por sensoriamento remoto.

No estado de São Paulo, entre abril e novembro ocorre o período da safra da cana-de-açúcar, quando a colheita era realizada com o método manual, com a queima da cana (AGUIAR et al., 2010). Desta forma, muitos focos de calor devem estar associados às queimadas na cultura da cana-de-açúcar, principalmente no período de colheita. No município de Piracicaba, Biziak e Ballester (2013) encontraram que 90% focos de calor registrados no período de maio a novembro de 2010 estiveram associados com áreas de plantio de cana de açúcar. Então, considerando-se que os 10% restantes de focos de calor são provenientes de queimadas em outro tipo de vegetação, como pastagens e fragmentos florestais, o valor ainda é considerado alto, e a forma da distribuição sazonal deles ainda é mantida, o que está de acordo com o perigo de incêndio apresentado para o período analisado. A partir de 2010, houve uma forte tendência ao uso da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, o que deixou de exigir o processo de queima da cultura. Conforme o sistema Canasat (RUDORFF et al., 2010), Piracicaba teve no ano de 2006, aproximadamente, 51,4% (22.491 ha) dos seus canaviais queimados, e cinco anos depois, em 2011, a proporção de área queimada caiu para 20,2% (8.479 ha). Contudo, o número de focos de calor entre 2006 e 2011 foi semelhante, o que sugere, neste último, uma quantidade bem mais alta de incêndios florestais da região, ou um número elevado de alarmes falsos, já que nem sempre focos de calor representam incêndios ou queimadas (SETZER et al., 2013).

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que é possível estimar com bastante precisão e acurácia a umidade relativa do ar às 13 h, necessária para o cálculo da FMA, em função da UR média do dia.

A FMA apresentou valores muito elevados em alguns dias, demonstrando que a região de Piracicaba apresenta um período seco mais longo, e assim é mais suscetível à incêndios florestais, do que a região paranaense para a qual a FMA foi desenvolvida.

Mesmo em uma região de tipo climático diferente de onde ela foi desenvolvida, a FMA de-

monstrou adequada previsão do grau de perigo de incêndios, conforme mostraram as significativas correlações entre os graus de perigo e os focos de calor obtidos por sensoriamento remoto.

## AGRADECIMENTOS

Ao Grupo Florestal Monte Olimpo (GFMO, [www.gfmo.esalq.usp.br](http://www.gfmo.esalq.usp.br)) pelo apoio na construção e monitoramento do sistema físico e virtual do Grau de Perigo de Incêndio Florestal em Piracicaba e região. O sistema online monitora diariamente o grau de perigo de incêndio florestal e pode ser acessado via website do grupo: [www.gfmo.esalq.usp.br](http://www.gfmo.esalq.usp.br). Aos professores do Depto. de Ciências Florestais, Fernando Seixas e Mário Tomazello Filho, somos gratos pelo apoio ao projeto. Agradecemos o James Stahl (Klabin S.A.) por ter nos enviado informações, a partir da placa original da Fazenda Monte Alegre em Telêmaco Borba-PR, para a construção da nossa placa de incêndio florestal que hoje se encontra no Campus "Luiz de Queiroz".

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F. Monitoramento do modo de colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo – Brasil por meio de imagens de sensores orbitais em dois anos-safra. *Selper*, São José dos Campos, v. 30, n. 1, p. 34 - 43, 2010.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711 - 728, 2013a.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 113, n. 3-4, p. 407 - 427, 2013b.

ALVARES, C. A.; SILVA FILHO, D. F.; POLIZEL, J. L. Caracterização termal dos bairros de Piracicaba (SP), no verão e inverno, através da emissão de radiação eletromagnética coletada por sistema sensor orbital. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - Agropecuária - Ciências Florestais, 13., 2005, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: USP, 2005.

ANDRADE, E. N. *Manual do plantador de eucalyptos*. São Paulo: Typographia Brazil, 1911. 338p.

- BATISTA, A. C. Detecção de incêndios florestais por satélites. *Floresta*, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 237 - 241, 2004.
- BIZIAK, L. D.; BALLESTER, M. V. R. Queima de cana-de-açúcar no município de Piracicaba - SP e seus impactos legais e ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2013. p. 8584 - 8591.
- BRASIL. **Lei n.12651, de 25 de maio de 2012. Novo Código Florestal.** 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm)>. Acesso em: 27 dez. 2013.
- CATHARINO, E. L. M. **Estudos fisionômico-florísticos e fitossociológicos em matas residuais secundárias no município de Piracicaba, SP.** 1989. 190 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.
- CIANCIULLI, P. L. **Incêndios florestais: prevenção e combate.** São Paulo: Nobel, 1981. 169 p.
- DEPPE, F.; PAULA, E. V.; MENEGHETTE, C. R.; VOSGERAU, J. Comparação de índice de risco de incêndio florestal com focos de calor no estado do Paraná. *Floresta*, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 119 - 126, 2005.
- FRAGA, M. V. G. Ensinaamentos dum incêndio em plantação de araucária. *Anuário Brasileiro de Economia Florestal*, Rio de Janeiro, v. 2, p. 193 - 199, 1949.
- HOXIE, G. L. How fire helps forestry. *Sunset*, v. 25, p. 145-151, 1910.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAS. **Sistema de Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais por Satélite em Tempo Quase-Real.** 2013. Disponível em <[www.inpe.br/queimadas](http://www.inpe.br/queimadas)>. Acesso em: 9 out. 2013.
- LOVERIDGE, E. W. A country-wide forest fire weather hazard index. *Journal of Forestry*, Bethesda, v. 33, n. 4, p. 379 - 384, 1935.
- LUIZ, H. F.; FERREIRA, M. Ipê felpudo (*Zeyhera tuberculosa* (Vell) Bur.): essência nativa pioneira com grande potencial silvicultural. IPEF, Piracicaba, v. 31, p. 13 - 21, 1985.
- Mc NABB, K. The silvicultural use of fire in the southeastern United States. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1, Piracicaba, 1995. *Anais...* Piracicaba: IPEF/FUPEF/SIF, 1995. p. 1 - 2.
- NASCIMENTO, H. E. M.; DIAS, A. S.; TABANEZ, A. A. J.; VIANA, V. M. Estrutura e dinâmica de populações arbóreas de um fragmento de floresta estacional semidecidual na região de Piracicaba, SP. *Revista Brasileira de Biologia*, São Carlos, v. 59, p. 329 - 342, 1999.
- NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. FMA+ - um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná, Brasil. *Floresta*, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 75 - 91, 2006.
- NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Estimativa da umidade relativa das 13:00 h, com base nos dados das 9:00 h e das 15:00 h, para o estado do Paraná. *Floresta*, Curitiba, v. 35, n. 2, p. 247 - 58, 2005.
- OLIVEIRA, A. L. S. **Avaliação dos sensores EOS/MODIS e NOAA/AVHRR na detecção e registro de incêndios e queimadas.** 2006. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- OLIVEIRA, R. E. **Aspectos da dinâmica de um fragmento florestal em Piracicaba-SP: silvigênese e ciclagem de nutrientes.** 1997. 87 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L.R., SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478 p.
- PEZZOPANE, J. E. M.; OLIVIERA NETO, S. N.; VILELA, M. F. Risco de incêndios em função de característica do clima, relevo e cobertura do solo. *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 161 - 6, 2001.
- REIS, C. J.; BEIJO, L. A.; AVELAR, F. G. Análise dos níveis mínimos de umidade relativa do ar via distribuição generalizada de valores extremos. *Sigmae*, Alfenas, v. 1, n. 1, p. 57 - 64, 2012.

- REVISTA REFERÊNCIA FLORESTAL. Alerta vermelho: Incêndios florestais aumentam consideravelmente no Brasil. As causas são inúmeras, mas a boa notícia é que há soluções para evitá-los. **Referência Florestal**, Curitiba, v. 15, p. 50 - 58, 2013.
- RIBEIRO, L.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; SILVA, I. C. Análise do perigo de incêndios florestais em um município da Amazônia mato-grossense, Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 257 - 70, 2011.
- RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote sensing**, Basel, v. 2, n. 4, p. 1057 - 1076, 2010.
- SANTAELLA, M.; DIAS PAES, L. A. Utilização do fogo em cultura de cana-de-açúcar. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1, Piracicaba, 1995. **Anais...** Piracicaba: IPEF/FUPEF/SIF, 1995. p. 3 - 5.
- 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**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 93 - 100, 2006.
- SARAIVA, E. A. **Deteção de incêndios florestais e queimadas com radar meteorológico**. 2013. 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- SENTELHAS, P. C.; MORAES, S. O.; PIEDADE, S. D. S.; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, p. 215 - 221, 1997.
- SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C.; PEREIRA, A. C. O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 7, p. 41 - 53, 1992.
- SETZER, A. W.; SOUZA, P. A. L.; MORELLI, F. Modificação do algoritmo de focos de queima AVHRR do INPE e sua avaliação com um método dinâmico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 6395 - 6400.
- SILVA, J. C.; FIEDLER, N. C.; SILVA, G. F. Uso da Fórmula de Monte Alegre na determinação dos períodos críticos de ocorrência de incêndios florestais nas áreas de proteção ambiental do Gama Cabeça-de-Veados, Brasília, DF. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 20, n. 1, p. 29 - 36, 2001.
- SOARES, R. V. Desempenho da "Fórmula de Monte Alegre" índice brasileiro de perigo de incêndios florestais. **Cerne**, Lavras, v. 4, p. 87 - 99, 1998.
- SOARES, R. V. Queimadas controladas: prós e contras. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1, Piracicaba, 1995. **Anais...** Piracicaba: IPEF/FUPEF/SIF, 1995. p. 6 - 10.
- SOARES, R. V. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1984 a 1987. **Floresta**, Curitiba, v. 18, p. 94 - 121, 1988.
- SOARES, R. V. **Determinação de um índice de perigo de incêndio para a região centro paranaense, Brasil**. 72 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas da OEA, Turrialba, Costa Rica, 1972.
- SOARES, R. V.; SANTOS, J. F. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997. **Floresta**, Curitiba, v. 32, p. 219 - 232, 2004.
- SOUZA, P. A.; SISMANOGLU, R. A.; LONGO, K. M.; MAURANO, L. E.; RECUERO, F. S.; SETZER, A. W.; YOSHIDA, M. C. Avanços no Monitoramento de queimadas realizado no INPE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET 2003.
- TETTO, A. F.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; NUNES, J. R. S. Comportamento e ajuste da Fórmula de Monte Alegre na Floresta Nacional de Irati, estado do Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 409 - 417, 2010.
- TORTORELLI, L. A. Efeitos catastróficos do fogo nos bosques do Paraná: exemplo a ser difundida na América Latina. **Anuário Brasileiro de Economia Florestal**, Rio de Janeiro, v. 16, p. 71 - 74, 1964.
- WASILEWSKI, T. Nota prévia sobre os incêndios em plantações de *Araucaria angustifolia* na fazenda Monte Alegre. In: SIMPÓSIO DE REFLORESTAMENTO DA REGIÃO DA ARAUCÁRIA, 1., Curitiba, 1963. **Anais...** Curitiba: FIEP, 1965. p. 75-77.

WRIGHT, J. G. **Forest-fire hazard tables for mixed red and white pine forests**: Eastern Ontario and Western Quebec Regions. Ottawa: Dominion Forest Service, Department of the Interior Canada, 1933. 20 p.

VASCONCELOS, S. S. D.; FEARNSSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. D. A.; NOGUEIRA, E. M.; OLIVEIRA, L. C. D.; FIGUEIREDO, E. O. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: estimates of area and potential carbon emissions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 291, p. 199 - 208, 2013.

Recebido em 19/02/2014  
Aceito para publicação em 03/07/2014