

MEDIDAS DE TEMPERATURAS EM TRONCOS DURANTE QUEIMADAS

Fernando de Souza Costa – fernando@cptec.inpe.br

José Carlos dos Santos – jcarlos@cptec.inpe.br

INPE, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão

C.P. 01, Cachoeira Paulista, 12630-000, SP, Brasil

Carlos Alberto Gurgel Veras – gurgel@enm.unb.br

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica

Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

João Andrade de Carvalho-Jr – joao@feg.unesp.br

UNESP, Departamento de Energia

Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, 12500-000, SP, Brasil

David V. Sandberg – David.Sandberg@orst.edu

USDA Forest Service, 3200 SW Jefferson Way, Corvallis, Oregon 97331, USA

Ralf Gielow – ralf@met.inpe.br

INPE, Divisão de Ciências Meteorológicas

C.P. 515, São José dos Campos, 12201-970, SP, Brasil

Resumo. Este trabalho descreve medidas de temperaturas e de fluxos de calor em troncos durante queimadas realizadas em áreas localizadas no município de Alta Floresta, norte de Mato Grosso, região do arco de desflorestamento da Amazônia. Os dados obtidos poderão ser utilizados no modelamento numérico e em estudos analíticos dos processos de queima de biomassa, nas condições existentes em queimadas. As diferentes fases de queima foram investigadas, incluindo-se os períodos de secagem, volatilização, queima com chama, calcinação e incandescência. Os efeitos do tempo de secagem e da convecção nas bordas foram analisados. O conhecimento das condições de flamabilidade da mata derrubada e da floresta virgem permite indicar os momentos mais adequados para a realização de queimadas controladas, sem grandes riscos de propagação de incêndios para áreas contíguas de mata virgem ou de pastagens.

Palavras-chave: *combustão, biomassa, incandescência, temperaturas, amazônia*

1. INTRODUÇÃO

Foram realizadas medidas de temperaturas e de fluxo de calor em troncos durante queimadas em áreas delimitadas localizadas no município de Alta Floresta, no norte de Mato Grosso, situado no arco de desflorestamento da Amazônia, nos anos de 1998 e 1999.

Os dados obtidos poderão ser utilizados como referência no modelamento numérico e em estudos analíticos dos processos de queima de biomassa, nas condições existentes em queimadas. Os dados referem-se às diferentes fases de queima, incluindo os períodos de secagem, volatilização, queima com chama, calcinação e incandescência. O efeito do tempo de secagem da floresta derrubada foi analisado. O conhecimento das condições de flamabilidade da mata derrubada e da floresta virgem permitem indicar os momentos mais adequados para a realização de queimadas controladas, sem grandes riscos de propagação de incêndios para áreas contíguas de mata virgem ou de pastagens. O consumo de biomassa em uma das queimadas descritas, importante para se quantificar o efeito das queimadas sobre o aquecimento global, foi apresentado por Carvalho et al. (1998).

As áreas de teste foram derrubadas usando-se o método empregado pelos fazendeiros da região amazônica. O período anual de estiagem ocorre de maio a setembro e ao final são realizadas queimadas para limpeza e preparo do solo.

Deve-se observar que medidas de temperaturas durante a queima de madeira têm sido feitas em laboratório usando-se amostras pequenas e com atmosferas controladas (Roberts e Clough, 1963, Tinney, 1965, Salazar, 1983, Saastamoinen, 1994).

2. DESCRIÇÃO DAS QUEIMADAS

2.1 Queimadas realizadas em 1999

Foram feitas queimadas em duas áreas de 200x200m² em 1999. As medidas de temperaturas foram realizadas em troncos com características físicas (porosidade, dimensões e teor de umidade) propícias a sustentarem um processo de incandescência após a fase de queima com chama. O objetivo do teste temperaturas durante a fase de incandescência. Este é a fase de oxidação heterogênea sem chama, controlada pela difusão e convecção do oxigênio até a zona de reação, com propagação de uma frente de combustão de baixa velocidade.

Devido aos efeitos convectivos e à maior umidade da mata derrubada junto à borda da floresta virgem, mediram-se as temperaturas e a massa consumida apenas na região central de 100 x 100 m² dentro de cada área queimada.

A primeira área, designada área 1D, foi derrubada em maio de 1998 e deixada secar por 15 meses, até o mês de agosto de 1999. Essa área foi queimada no dia 21 de agosto de 1999, com ignição às 14:05 hr, horário de grande incidência solar e menor umidade do ar. O processo de queima com chama concentrou-se por cerca de 50 minutos no dia 21, porém as fases de calcinação e de incandescência prolongaram-se por vários dias em muitos dos troncos, especialmente os apodrecidos, os mais porosos e os que cruzavam sobre outros.

A segunda área queimada em 1999, área 2D, foi derrubada em maio de 1999 e deixada secar por 3 meses, durante o período de estiagem de 1999, e foi queimada no dia 24 de agosto de 1999, com ignição às 11:35 hr, horário de grande incidência solar e menor umidade do ar. Da mesma forma que a área 1D, a área 2D apresentou uma fase de queima com chama, por um período de cerca de 1 hr 30 min em seguida à ignição.

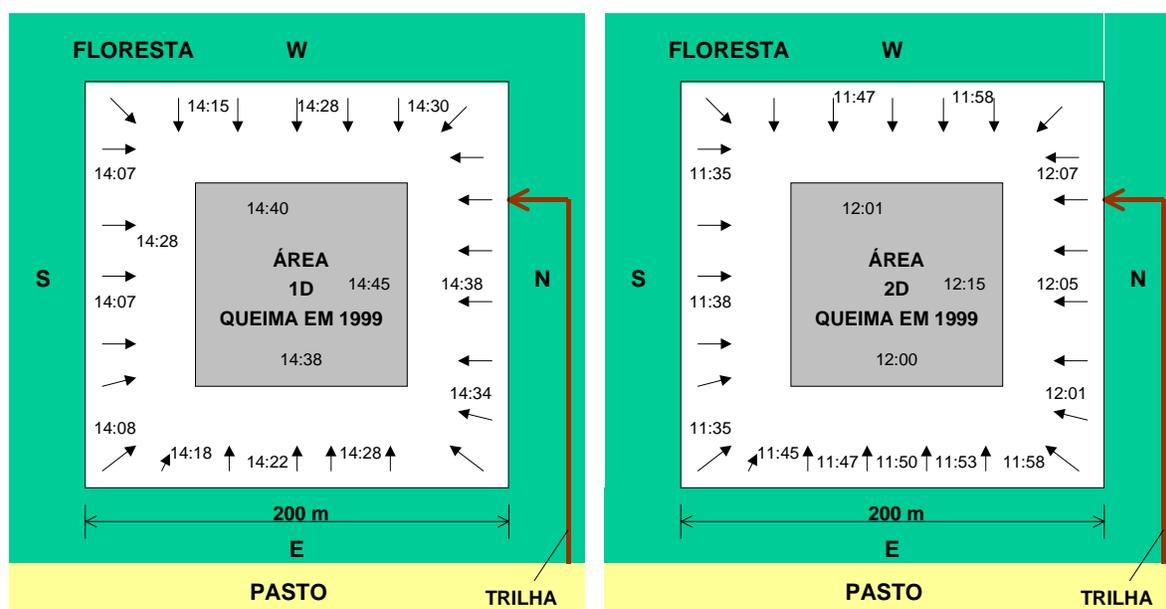
As condições climáticas na região foram monitoradas durante os períodos de secagem. O fogo foi iniciado a partir das bordas das áreas 1D e 2D. A figura 1 mostra o espalhamento do fogo nos diversos instantes.

Verificou-se que a queima na área mais seca, derrubada em 1998, foi mais rápida que na área mais úmida, derrubada em 1999. Algumas chamas superaram a altura das árvores, maiores que 35 metros.

2.2 Queimada realizada em 1998

Uma área de 300x300m² foi queimada em 1998. O objetivo do teste foi comparar os fluxos de calor em troncos suspensos e em troncos junto ao solo. A área de teste, designada 2C, foi derrubada em maio de 1998 e deixada secar por 3 meses até agosto de 1998. A queima ocorreu em 31 de agosto de 1998, com ignição às 14:40 hr. O processo de queima com chama na área de teste concentrou-se por cerca de 1 hr 30 min, porém as fases de calcinação e de incandescência prolongaram-se por vários dias em muitos troncos.

As medidas de temperatura e da biomassa consumida também foram feitas em um quadrado de 100 x 100 m² no centro da área devido aos efeitos convectivos induzidos pelo fogo e à maior umidade da mata derrubada junto à borda da floresta virgem. Também foram monitoradas as condições climáticas na região durante todo o período de secagem da mata derrubada.



a) área 1D: derrubada em 1998

b) área 2D: derrubada em 1999

Figura 1 – Propagação do fogo nas áreas 1D e 2D.

3. MEDIDAS DE TEMPERATURA

3.1 Troncos da Área 1D

Um tronco de garapeira e um tronco de amesca aroeira foram escolhidos na área 1D para medição de temperaturas. São árvores comuns na região e os troncos escolhidos possuíam diâmetros adequados para a medida de temperatura com os meios disponíveis, além de apresentarem as condições propícias à manter processos de incandescência.

A figura 2 mostra um esquema do posicionamento dos troncos. Os troncos foram apoiados em suportes na posição mostrada na figura 2 e também ficaram parcialmente apoiados por árvores e galhos derrubados, para garantir uma boa condição inicial de queima. As dimensões dos troncos são mostradas na tabela 1 a seguir. Os pesos dos troncos foram medidos antes e depois do fogo e são mostrados na tabela 2. A umidade foi calculada por secagem em estufa de amostras retiradas de cada tronco pouco antes da queima. Os dados de umidade são mostrados na tabela 3 a seguir.

Foram utilizados 8 termopares para as medidas das temperaturas em cada tronco, sendo posicionados 2 termopares em cada uma de 4 seções, espaçadas cerca de 60 cm uma da outra. A profundidade média dos termopares em cada seção era de 6,8 e 13,5 cm.

Um *datalogger* CR21X com 16 canais foi utilizado para o registro das temperaturas medidas. Os termopares foram introduzidos em furos feitos por furadeira manual com brocas de comprimento e diâmetro aproximados ao do termopar. As folgas existentes entre os termopares e o tronco eram preenchidas com a própria serragem resultante da furação. A saída do furo era recoberta com durepox, permitindo fixar o termopar e vedar o furo, eliminando-se a saída de gases pelo mesmo. Os fios dos termopares ao saírem do tronco foram protegidos por troncos úmidos de açai, com diâmetros de 6 a 10 cm, conforme a figura 2, de forma a influenciar minimamente as medidas de temperatura.

Os termopares utilizados foram do tipo E, lineares até 540 °C, sem revestimento e, devido às condições de aquecimento, radiação e convecção bastante variáveis no tempo, não foram realizados cálculos de correção das temperaturas medidas.

3.2 Tronco na Área 2D

Foi escolhido um tronco de inharé leiteira na área 2D, por ter as dimensões adequadas para as medidas de temperaturas e por apresentar condições propícias ao processo de incandescência após a queima com chama.

Foram empregados 12 termopares, sendo posicionados 2 termopares em cada uma de 6 seções, espaçadas cerca de 40 cm uma da outra. As profundidades médias dos termopares em cada seção eram de 7 e 11 cm. Os termopares utilizados foram também do tipo E sem revestimento.

O tronco de 300 cm ficou apoiado em um suporte na posição mostrada na figura 3, suspenso a 75 cm do solo, aproximadamente, e estava cercado e parcialmente apoiado em árvores e galhos derrubados, para garantir uma boa condição inicial de queima.

3.3 Troncos da Área 2C

Foram escolhidos dois troncos cortados de inharé leiteira, com 3 metros de comprimento cada, conforme o esquema mostrado na figura 4. São árvores comuns na região e os troncos escolhidos possuíam diâmetros adequados para a medida de temperatura com os meios disponíveis. Os troncos ficaram em posição horizontal e paralelos, apoiados em suportes, na posição mostrada na figura 4. Os troncos ficaram isolados, sem contato com outros galhos ou troncos.

Para a medida das temperaturas nos troncos, foram utilizados 16 termopares tipo K, com isolamento de alumina cerâmica, bainha de inconel de 1 metro, junta aterrada e linearidade até 1200°C. Foram empregados 9 termopares para as medidas no tronco superior e empregados 7 termopares para as medidas no tronco inferior. As profundidades

dos termopares foram de 25 e 50 mm nos pontos A, B e D e de 25, 37,5 e 50 mm nos pontos C, conforme mostrado na figura 4.

O *datalogger* CR10X com 16 canais foi utilizado e as leituras foram feitas de 1 em 1 segundo, sendo as médias registradas de 1 min em 1 min durante a queima. Os termopares foram introduzidos com a mesma técnica descrita acima.

Tabela 1 – Dimensões dos troncos na área 1D.

Tronco	Código	diâmetro inicial (cm)	diâmetro final (cm)	diâmetro médio (cm)	comprimento (cm)
Garapeira	1DC	28,8	30	29,4	300
Amesca Aroeira	1DD	25,5	29	27,3	302

Tabela 2 – Peso dos troncos na área 1D.

Tronco	Código	Peso antes da queima (kg)	Peso após queima (kg)	Percentagem queimada (%)
Garapeira	1DC	174	4,2	97,59
Amesca Aroeira	1DD	134,6	72,2	46,36

Tabela 3 – Dados de umidade dos troncos na área 1D.

Tronco	Código	Peso úmido (kg)	Peso seco (kg)	umidade (%)
Garapeira	1DC	1,700	1,060	37,65
Amesca Aroeira	1DD	1,600	1,100	32,25

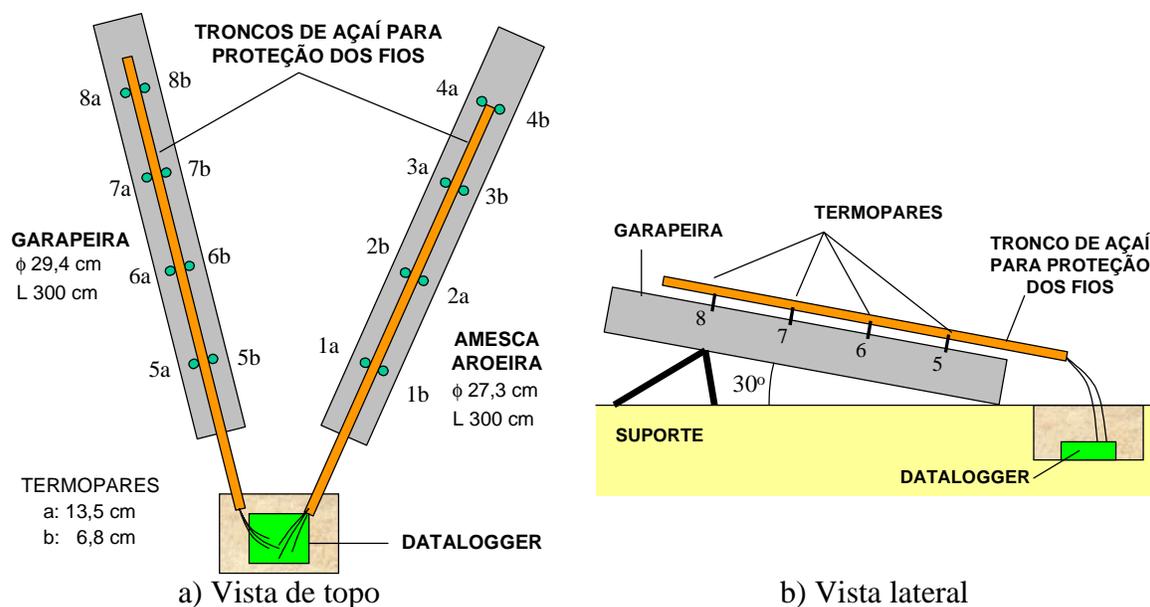


Figura 2 – Posicionamento dos termopares e troncos na área 1D.

4. RESULTADOS

A figura 5 mostra as temperaturas obtidas nos troncos da área 1D durante a fase de incandescência. O tempo inicial ($t = 0$) equivale a 22:30 hr, ou seja, 8:25 hr após o início

do fogo na borda da área, ocorrido às 14:05. O intervalo de tempo total mostrado corresponde a mais de 40 horas de registro de dados, indo até 48 horas após o início do fogo. Os dados foram registrados de 5 em 5 minutos, com médias de valores obtidos a cada 10 segundos.

A figura 6 mostra temperaturas obtidas no tronco de inharé da área 2D durante a fase intermediária de queima. Embora não mostrado, posteriormente ocorreu processo de incandescência, observando-se a existência de picos sequenciais de temperatura. Deve-se observar que o período completo de queima do tronco de inharé se estendeu por mais de 30 horas após o início da queimada, ocorrido às 11:35 da manhã do dia 24 de agosto de 1999.

A figura 7 mostra a razão dos fluxos de calor entre 3 pontos correspondentes (B,C,D) dos troncos superior e o inferior de inharé na queimada realizada em 1998. O tempo mostrado corresponde aos primeiros 400 minutos do início da queima.

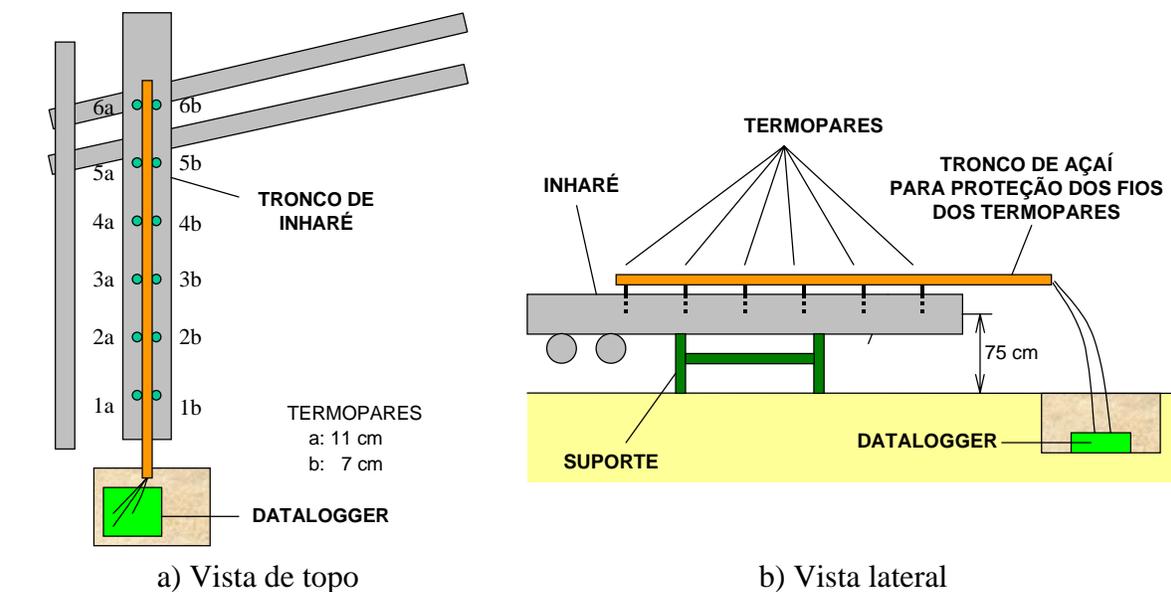


Figura 3 – Posicionamento do tronco de inharé (área 2D).

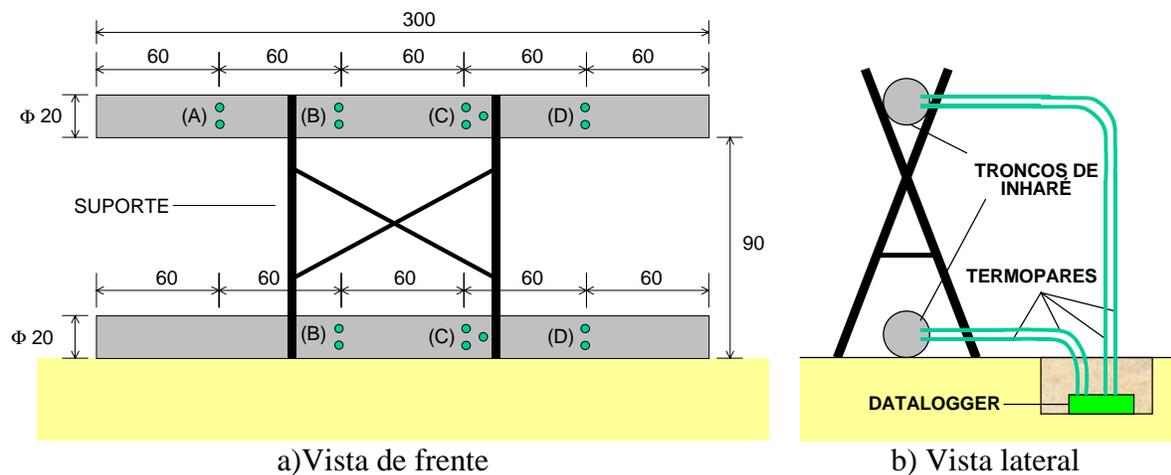


Figura 4 – Posicionamento dos troncos de inharé e dos termopares (área 2C).

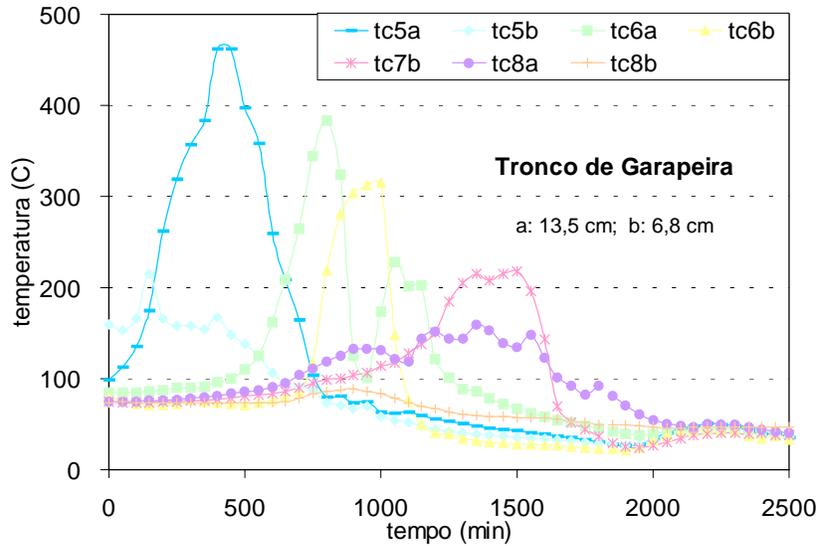


Fig. 5 - Temperaturas no tronco de Garapeira durante a fase de incandescência (Área 1D).

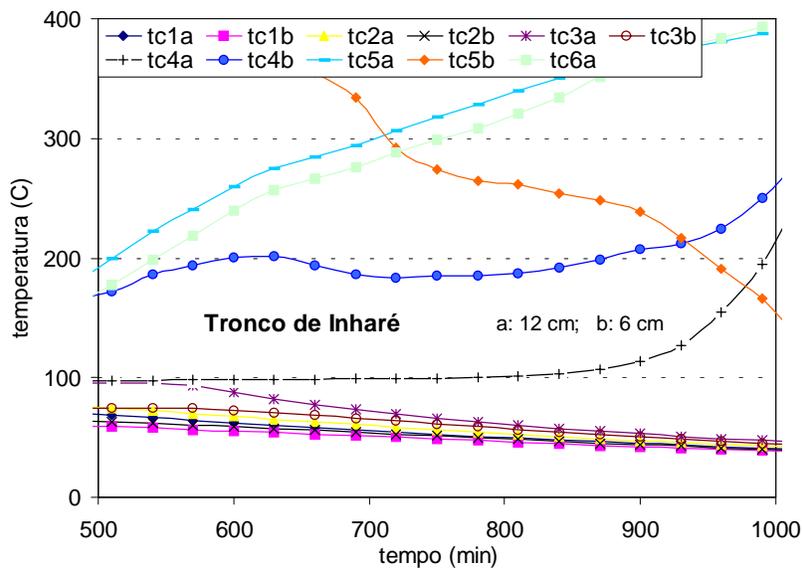


Fig. 6 - Temperaturas no tronco de Inharé na fase intermediária de queima (Área 2D).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Análise dos Resultados Obtidos em 1999

Observaram-se diferenças significativas de comportamento entre o tronco de garapeira e o tronco de amesca após a fase inicial de queima com chama na área 1D, área derrubada um ano antes da queimada. A amesca apresentou temperaturas bem inferiores à garapeira, indicando que não passou por processos de calcinação ou de incandescência. A existência de picos de temperatura de forma sequencial, conforme mostrado na figura 5, indica que a garapeira sofreu um processo de combustão por incandescência por um período de mais de 30 horas, com temperaturas acima de 400°C. O comportamento diferenciado dos dois

troncos deve-se às diferentes constituições físicas e às distintas condições térmicas sofridas pelos troncos ao longo da queimada. O tronco de inharé na área 2D também apresentou temperaturas elevadas, acima dos 400 °C, após a fase de queima com chama, embora tivesse maior teor de umidade que a amesca ou a garapeira, por ter sido derrubado no mesmo ano da queimada. Devido à existência de picos de temperatura verificou-se a ocorrência de um processo de incandescência por mais de 30 horas após o início da queimada. Observações visuais também confirmaram o ocorrência do processo. A área com período de secagem de 15 meses apresentou uma propagação do fogo mais rápida e um consumo maior de biomassa que a área com período de secagem de 3 meses.

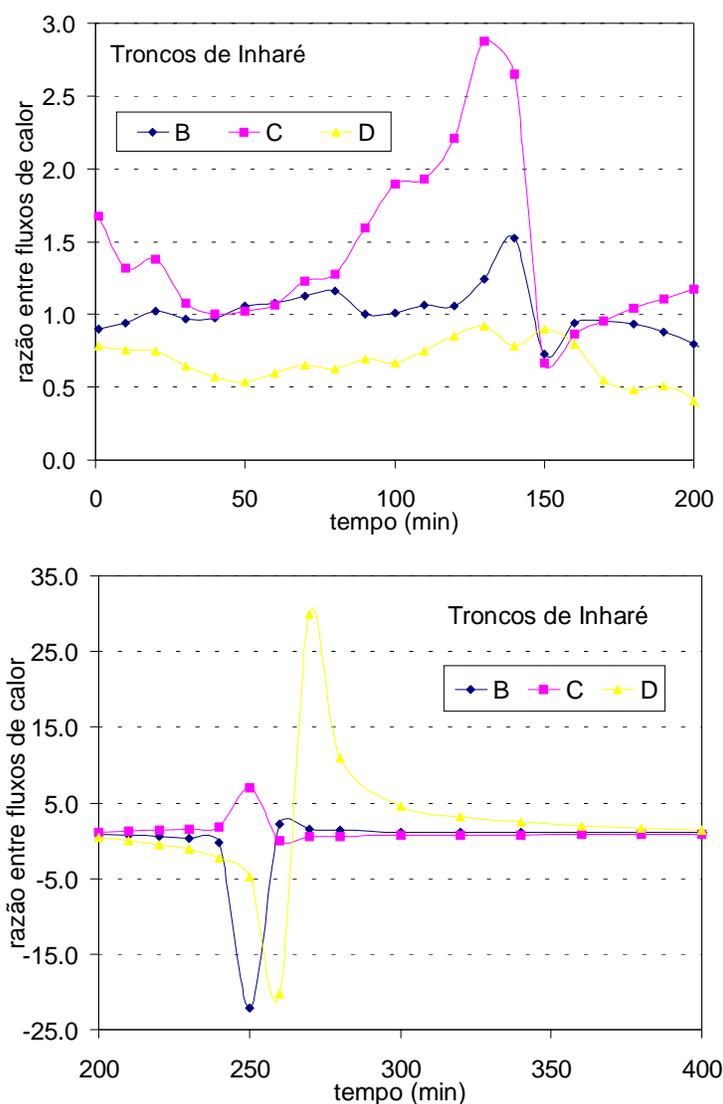


Figura 7 – Razão entre fluxos de calor em pontos correspondentes (B, C e D) dos troncos de inharé superior e inferior, razão = $\nabla T_{sup}/\nabla T_{inf}$ (Área 2C).

5.2 Análise dos Resultados Obtidos em 1998

As temperaturas atingidas nos pontos de medição (pontos A, B, C e D, figura 4) mantiveram-se abaixo dos 110 °C durante as 10 primeiras horas de queima, visto que os troncos de teste foram deixados isolados, sem contato direto com folhagens, galhos ou outros troncos, embora próximos. Portanto houve apenas um processo de secagem da madeira nos pontos de medida nesse período. No entanto, no dia seguinte à queima, verificaram-se que as partes inferiores dos troncos tornaram-se calcinadas. Isto deveu-se à radiação incidente das cinzas do solo e de troncos vizinhos calcinando e, no caso do tronco junto ao solo, também deveu-se à menor ventilação.

Os fluxos de calor foram comparados em pontos correspondentes nos troncos suspenso e no solo e verificadas as direções dos fluxos de calor. A razão entre os fluxos de calor foi calculada pela razão entre os gradientes de temperatura nos pontos correspondentes dos dois troncos: razão = $(\nabla T_{sup}/\nabla T_{inf})_i$, onde $\nabla T = T_{25} - T_{50}$.

Verificou-se, inicialmente, um maior fluxo no tronco superior do que no inferior (razão > 1), devido à exposição a radiação dos focos distantes. Nos momentos finais ocorreu uma inversão, havendo menor fluxo de calor no tronco superior do que no inferior, devido ao maior resfriamento do tronco suspenso pelas correntes de ar e ao aquecimento do tronco inferior pelas cinzas quentes no solo.

Os fluxos de calor mantiveram-se nos primeiros 20 minutos da queimada do exterior para o interior dos troncos, havendo uma inversão nos momentos seguintes, com o fluxo de calor indo do interior para o exterior dos troncos. Isto deveu-se à geração interna de calor por reações de degradação exotérmicas e, mais ao final da queimada, devido ao processo natural de resfriamento. Os fluxos de calor nos troncos superior e inferior tiveram direções diferentes, nos pontos de medição, razão < 0, apenas entre 230 e 260 minutos após o início da queimada, mantendo-se nos demais momentos com direções iguais. Considerando a condutividade térmica da madeira igual a 0,15 W/m/K, os valores médios de fluxo de calor (pontos A, B, C e D) medidos foram de 40 W/m² durante a fase inicial de aquecimento, com picos de 400 W/m², enquanto na fase final de incandescência, após 260 min do início da queimada, foram de 50 W/m².

6. CONCLUSÕES

O primeiro experimento realizado permitiu comparar as temperaturas e os fluxos de calor em dois troncos, um junto ao solo e outro suspenso, de uma mesma espécie de madeira durante uma queimada na Amazônia. O tronco suspenso apresentou uma resposta mais rápida às condições do ambiente devido à uma maior exposição inicial às fontes radiantes distantes e, ao final da queima, devido a uma maior ventilação. Inicialmente os fluxos de calor no tronco suspenso foram maiores que no tronco junto ao solo, havendo uma reversão deste comportamento ao final da queimada.

O segundo experimento permitiu acompanhar a evolução de temperaturas em troncos de diferentes espécies especialmente na fase de combustão incandescente, durante dezenas de horas após a queimada.

Observou-se que o tempo de queimada nas áreas de teste e a evolução inicial das temperaturas dos troncos dependem do modo de ignição, isto é, se a ignição ocorre em um ou vários lados da área de teste. Todavia o consumo total de biomassa na área de teste não

é afetado de forma significativa. O consumo da biomassa depende basicamente da razão área/volume, do nível de umidade e da constituição física e da composição do material.

Verificou-se nos experimentos que a liberação de gases poluentes estende-se bem além da fase de queima com chama, que dura menos de 2 horas, com os processos de calcinação e incandescência durando por dias após o início do fogo. Portanto os modelos numéricos ou analíticos de queimadas e de incêndios florestais devem considerar as diferentes fases de queima, a fim de se evitarem erros significativos na predição da liberação de poluentes e do consumo de biomassa.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio da FAPESP através dos Projetos 96/11742-0 e 98/00104-9.

REFERÊNCIAS

- Carvalho-Jr, J.A., Costa, F.S., Alvarado, E., Higuchi, N., Araújo, T.M., Veras, C.A.G., Serra Jr., A.M., Gielow, R., Negreiros, G.H. e J.C. Santos, 1998, Combustion Completeness in Rainforest Clearings in the Brazilian Amazon Region, III International Conference on Forest Fire Research, 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Vol II, pp. 1417-1431, Luso, 16/20, Nov.
- Roberts, A.F., Clough, G., 1963, Thermal Decomposition of Wood in an Inert Atmosphere, Proc. of the Ninth Symposium (International) on Combustion, pp 158-166.
- Saastamoinen, J.J., 1994, Fundamentals of Biomass Drying, Pyrolysis and Combustion, Proc. Of the IEA Biomass Combustion Conference, Cambridge, UK.
- Salazar, C.M., Connor, M.A., 1983, Kinetic Studies of Pyrolysis of Wood, with Particular reference to Eucalyptus Regnans, Proc. Eleventh Australian Conference on Chemical Engineering, paper 22b, pp. 753-761.
- Tinney, E.R., 1965, The Combustion of Wooden Dowels in Heated Air, Proc. 10th Symposium International on Combustion, pp. 925-930.

TEMPERATURE MEASUREMENTS IN LOGS DURING PRESCRIBED BURNS

Abstract. *This work describes temperature and heat flux measurements in logs obtained during prescribed burns at Alta Floresta, Mato Grosso, in the arc of deforestation of the Amazon basin. Different phases of burning were followed by measuring temperatures in several points inside the felled logs, including drying, devolatilization, flaming, calcination and smoldering phases. The effects of the drying period and convection in the border were analyzed. The collected data can be useful in the numerical modelling and in analytical studies of biomass combustion, specially in the conditions of forest clearing for soil preparation, as made by farmers in the Amazon region. The knowledge of flamability conditions in the fallen tree areas and in the virgin forest allow to indicate the more appropriate conditions for burns, with lower risks of fire spread to neighbour areas. Also it allows to quantify more precisely the effects of biomass burning on global warming.*

Keywords: *combustion, biomass, smoldering, temperatures, Amazonia*