

COMBUSTÃO DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO EM QUEIMADA FLORESTAL: MÉTODO INDIRETO PARA DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO E CO₂

S. S. Amaral^{1*}, J. A. Carvalho Jr., ¹, M. A. M. Costa ², T. G. Sores Neto³, J. C. dos Santos³

Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, Brazil, 12516-410

*e-mail: simonesimoessi@gmail.com

¹Departamento de Energia, UNESP- Univ Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, SP, Brasil

²Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química, UNESP- Univ Estadual Paulista, Campus de Araraquara, SP, Brasil

³Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.

RESUMO

A queima de materiais lignocelulósicos madeireiros pode ocorrer com a finalidade de geração de energia em indústrias, assim como durante incêndios ou queimadas florestais controladas. Independentemente da forma de ocorrência, a combustão de materiais lignocelulósicos resulta na emissão de inúmeros compostos poluentes. Neste trabalho, as emissões de CO e CO₂ foram determinadas durante queima florestal controlada, conduzida em Candeias do Jamari/ RO. As emissões de CO e CO₂ foram obtidas a partir de métodos indiretos e envolveram: (i) a quantificação da biomassa total por hectare; (ii) a determinação do consumo de biomassa; e (iii) o balanço estequiométrico da reação de combustão. A biomassa fresca total, contida na área de queima foi de 701,5 t/ha. O consumo total de material lignocelulósico foi estimado em 26,2%. As emissões de CO e CO₂ foram 11,6 e 164 t/ha, respectivamente. A taxa de emissão anual de CO₂ foi estimada em 224,5Mt/ano.

Palavras-chave: combustão, emissão de CO, emissão de CO₂, queima controlada, incêndio florestal.

INTRODUÇÃO

A queima de materiais lignocelulósicos madeireiros pode ocorrer com a finalidade de geração de energia em indústrias, assim como durante incêndios ou queimas florestais controladas.

Considerável atenção tem sido dada aos incêndios florestais, especialmente em relação à questão ambiental, devido aos seus efeitos nos ecossistemas, a contribuição para as emissões de carbono e o impacto à biodiversidade ⁽¹⁾.

Ottmar (2014)⁽²⁾ descreveu que tanto incêndio florestais quanto queimadas controladas emitem grandes quantidades de gases do efeito de estufa.

Na Amazônia, agricultores tem utilizado o fogo controlado como uma técnica para estabelecer e manter as pastagens. A continuidade desta técnica pode fazer com que a floresta Amazônica torne-se uma fonte líquida de carbono atmosférico, perdendo sua função como um sumidouro de carbono, devido aos efeitos combinados de seca e incêndios frequentes ^(3,4).

Independentemente da forma de ocorrência, a combustão de materiais lignocelulósicos resulta na emissão de inúmeros compostos poluentes. Os compostos poluentes emitidos para a atmosfera, como consequência da combustão incompleta de materiais lignocelulósicos, incluem: monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, material particulado, metano e outros hidrocarbonetos, além de pequenas quantidades de amônia⁽⁵⁻⁷⁾. Nos estudos de Lobert et al. (1990)⁽⁸⁾, o principal composto emitido foi o dióxido de carbono CO₂ (90%), seguido por 10% de CO e cerca de 2% de CH₄ e outros hidrocarbonetos.

A quantificação das emissões, provenientes das queimadas florestais, é essencial para prever os seus impactos sobre o meio ambiente ^(6,9,10). Além disso, a redução das emissões de carbono pode ser uma importante estratégia para minimizar as mudanças no clima^(11,12).

Assim, o objetivo principal deste trabalho foi determinar as emissões de CO e CO₂ durante queima florestal controlada conduzida na Amazônia.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento de queima foi realizado no assentamento Jequitibá, nas proximidades da Usina Hidrelétrica Samuel, município de Candeias do Jamari, estado de Rondônia (Figura 1).

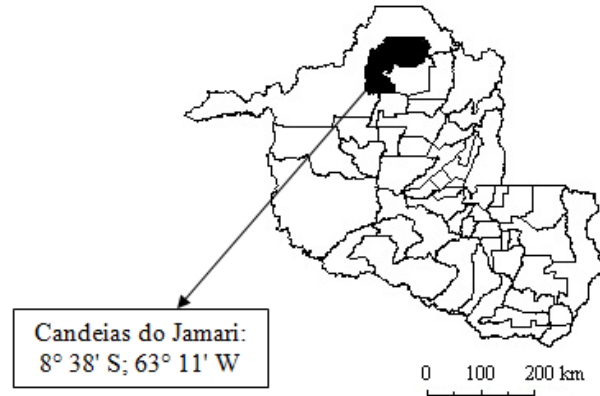


Figura 1- Localização do município onde o experimento de queima foi realizado: Candeias do Jamari, estado de Rondônia.

O estado de Rondônia está localizado entre as latitudes de 07°55' e 13°41' S e a longitudes de 59°51' e 66° 15' W. A principal estrada é a interestadual BR-364, que liga a região à capital do estado, Porto Velho, cerca de 20 km de Candeias do Jamari. A taxa de precipitação anual é de 2300 mm/ano, com estação chuvosa entre novembro a abril⁽¹³⁾.

Os experimentos foram conduzidos em uma área quadrada de 2,25 hectares (150 x 150 m²), denominada por Área de inflamabilidade (A3). Nesta área, toda a vegetação foi inventariada, cortada e submetida à queima. No entanto, os dados foram coletados considerando apenas o hectare central (100 x 100 m²), denominado como área central (A4).

Um esquema da área florestal, onde o experimento de queima foi conduzido, pode ser visualizado na Figura 2.

Na Figura 2 pode ser observado que, além da área de inflamabilidade (A3) e área central (A4), duas outras áreas constituíram a região onde o experimento de queima foi realizado: A1- Acero e A2- Zona de amortecimento. As áreas A1 e A2 foram construídas com o objetivo de impedir a propagação do fogo para regiões além daquela delimitada experimentalmente. A Zona de amortecimento é uma região onde a vegetação não foi derrubada. No acero, diferentemente da Zona de amortecimento, toda a vegetação é criteriosamente removida.

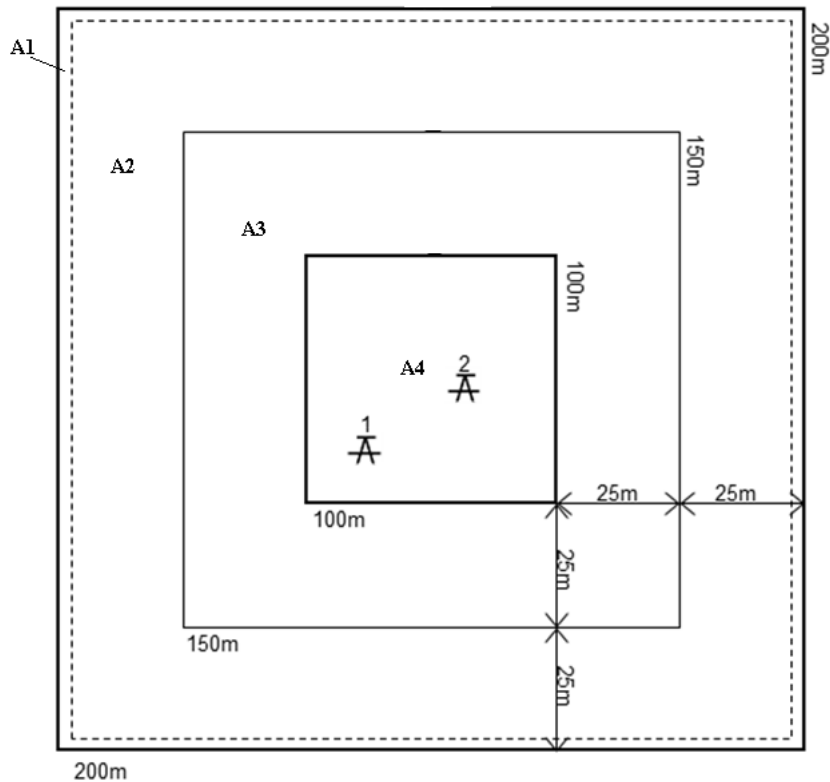


Figura 2- Localização da área experimental: A1- aceiro com 2 m de largura; A2- zona de amortecimento; A3- área de inflamabilidade; A4- área central de caracterização da biomassa; 1- Torre para equipamentos de coleta de gases e material particulado; 2- Torre para a Estação Meteorológica.

As emissões de CO e CO₂ foram estimadas a partir de fatores, que incluíam, a biomassa fresca total no hectare, consumo total de biomassa e balanço estequiométrico da reação de combustão, conforme descrito nas próximas Seções.

Consumo de biomassa: material grosso (DAP > 10 cm) e material fino (DAP < 10 cm)

Para determinar o consumo total de biomassa foi necessário a determinação do consumo para o material grosso (DAP > 10 cm) e para o material fino (DAP < 10 cm).

Na categoria “material grosso” estavam os troncos com diâmetro superiores à 10 cm. Para determinar o consumo nesta categoria (DAP > 10 cm) foi necessário a realização de um inventário florestal no hectare central. Durante o inventário, cada amostra teve suas principais características medidas (diâmetro à altura do peito (DAP), altura do tronco, e altura do dossel). Para estimar a biomassa fresca com DAP > 10 cm foi utilizada a equação alométrica definida por Santos (1996)⁽¹⁴⁾. O consumo foi estimado com base no procedimento descrito por Sandberg e

Ottmar (1983)⁽¹⁵⁾, que envolveu a determinação do volume de 64 troncos, antes e após a queima. Os troncos foram selecionados aleatoriamente.

Liteira (folhas, pequenos arbustos, galhos finos e lianas) e galhos com diâmetro inferior à 10 cm, dispostos no hectare central, compunham a classe denominada como material fino (DAP < 10 cm). Para determinar o consumo nesta classe, a área central de queima foi dividida em três transectos defasados 120°. Cada transecto foi composto por 4 subáreas de 2x2 m², totalizando 12 subáreas. Em cada uma das subáreas, todo o material fino foi pesado antes e após a queima para determinar a biomassa fina consumida no hectare central.

Uma descrição mais detalhada dos procedimentos utilizados para determinação do consumo no material grosso e fino pode ser encontrada no trabalho de Carvalho et al. (2016)⁽¹⁶⁾.

Estimativa das emissões e das taxas de emissão anuais de CO₂ e CO

As quantidades de CO₂ e CO emitidas para a atmosfera, durante o processo de combustão, foram estimadas supondo que: (a) estes gases representam entre 95 e 99% do carbono contido no combustível (média de 97%)⁽¹⁷⁾; (b) aproximadamente 90% da mistura CO₂/CO é composta por CO₂, em base volumétrica⁽¹⁸⁾.

O cálculo das taxas de emissões anuais de CO₂ e CO foi realizado considerando: (a) suas emissões; e (b) o desmatamento médio na região da Amazônia legal, que durante o período de 2000 a 2014, foi de 13.684 km²/ano⁽¹⁹⁾.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um total de 595 indivíduos, classificados como material grosso (DAP > 10 cm), foi encontrado no hectare central através do inventário florestal. Nesta classe, a biomassa fresca totalizou 608,3 t/ha. Para a classe material fino (DAP < 10 cm), a massa fresca foi de 93,2 t/ha. A biomassa fresca total, considerando ambas as classes (material grosso e material fino), disponível para queima no local do teste, foi de 701,5 t/ha. A massa de material fino representou 13,3% da massa total.

Na região de Alta Floresta/ MT, Neto et al. (2009)⁽⁶⁾ e Carvalho et al. (2001)⁽⁹⁾ estimaram a biomassa fresca total em 528 e 496 t/ha, respectivamente. Carvalho et al. (1998)⁽²⁰⁾ estimaram a biomassa fresca total em 685 t/ha, para a região de Manaus/AM.

O consumo de biomassa, na classe material grosso (DAP > 10 cm), foi de 16,0%. Para a classe material fino, o consumo foi de 94,6%.

Estimativa do consumo de biomassa total

Os resultados, obtidos experimentalmente, permitiram a estimativa do consumo da biomassa, somente para duas categorias: biomassa grossa (DAP > 10 cm) e biomassa fina (DAP < 10 cm e liteira).

Com o objetivo de analisar o consumo de forma mais abrangente, a biomassa foi dividida em quatro categorias: troncos 10 cm < DAP < 30 cm; troncos DAP > 30 cm; galhos D > 10 cm; e material fino.

Para estimar o consumo nas quatro categorias de biomassa era necessário a determinação de suas massas frescas antes da queima. Entretanto, dentre as quatro categorias definidas, apenas para a categoria material fino (DAP < 10 cm) foi possível a utilização da massa fresca determinada experimentalmente. Resultados experimentais, a cerca da massa fresca das demais categorias (troncos 10 cm < DAP < 30 cm; troncos DAP > 30 cm; galhos D > 10), não poderiam ser utilizados, pois suas massas foram determinadas por equação alométrica e apresentadas como um valor único, referente à biomassa fresca para a categoria DAP > 10 cm (material grosso).

Assim, para o cálculo da distribuição de biomassa nas quatro categorias, outra metodologia deveria ser utilizada.

Carvalho et al. (2001)⁽⁹⁾, para avaliar o consumo de biomassa em quatro categorias, classificou e pesou 37 indivíduos, antes e após a queima. A biomassa de material fino, em seu estudo, representou 16,5% da biomassa fresca total, resultado próximo aquele obtido em Candeias do Jamari (13,3%). A similaridade entre os resultados encontrados por Carvalho et al. (2001)⁽⁹⁾ e aqueles obtidos no presente estudo permitiu a determinação da biomassa fresca para cada categoria através de extrapolação dos valores obtidos por Carvalho et al. (2001)⁽⁹⁾.

A extrapolação dos resultados de massa fresca, apresentada na Tabela 3, foi realizada da seguinte forma: inicialmente fixou-se o percentual de massa fresca fina calculada para Candeias do Jamari (13,3%). Posteriormente, mediante proporção, o percentual de massa fresca foi calculado para as demais categorias.

Tabela 1- Biomassa fresca em quatro categorias: Alta Floresta⁽⁹⁾ e neste trabalho.

Categoria	Biomassa (%), Alta Floresta, (9)	Biomassa (%), Candeias do Jamari, Neste trabalho
Troncos, 10 cm < DAP < 30 cm	19,1	19,8
Troncos, DAP > 30 cm	40,9	42,5
Galhos, D > 10 cm	23,5	24,4
Material fino*	16,5	13,3

* D < 10 cm e liteira

A proporção foi calculada a partir do percentual de material fino, no experimento realizado em Alta Floresta⁽⁹⁾ ($100-16,5= 83,5\%$). No experimento conduzido em Candeias do Jamari, o percentual de biomassa das demais classes, a partir da classe material fino, foi de 86,7% ($100-13,3$). A porcentagem de biomassa fresca, para as outras categorias, foi calculada com base nestes valores. A categoria galhos D > 10 cm, por exemplo, contribuiu com 24,4% da biomassa total em Candeias do Jamari ($(23,5 / 83,5) \times 86,7$).

O consumo em massa, para cada uma das categorias, foi apresentado na Tabela 4.

Tabela 2- Consumo de biomassa para o experimento conduzido em Candeias do Jamari.

Categoria	Biomassa (%)	Consumo (%)	Consumo em massa (%)
Troncos, 10 cm < DAP < 30 cm	19,8	15,1	3,0
Troncos, DAP > 30 cm	42,5	16,5	7,0
Galhos, D > 10 cm	24,4	15,1	3,7
Material fino	13,3	94,6	12,6
Total	100,0		26,2

Na Tabela 2, os resultados de consumo para as categorias: Troncos 10 cm < DAP < 30 cm; Troncos de DAP > 30 cm; e material fino; foram calculados com base nos resultados experimentais, conforme descrito nas seções anteriores. O consumo para os galhos (D > 10 cm) foi assumido como sendo semelhante aquele da categoria Troncos 10 cm < DAP < 30 cm. Utilizando os resultados de consumo para cada uma das categorias de biomassa, o consumo total, calculado para o teste conduzido em Candeias do Jamari, foi 26,2%.

Emissões de CO e CO₂

Para o cálculo das emissões de CO e CO₂, os teores de carbono e umidade médios contidos na biomassa fresca, foram considerados como sendo 48 e 42%, respectivamente ⁽²¹⁾.

Considerando que a biomassa fresca total, determinada no local de teste, foi de 701,5 t/ha, calculou-se:

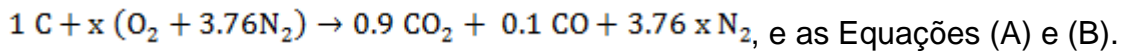
- A biomassa seca total: $701,5 \times (1 - 0,42) = 406,9$ t/ha;

- O teor de carbono total contido na biomassa seca: $406,9 \times 0,48 = 195$ t/ha.

Portanto, a quantidade de carbono na vegetação acima do solo, antes da queima, foi estimada em 195 t/ha.

A quantidade de carbono liberado para a atmosfera, durante o teste conduzido em Candeias do Jamari, foi calculado considerando o teor de carbono sobre a superfície (195 t/ha) e o consumo em massa total (26,2%). Assim, a quantidade de carbono liberado em Candeias do Jamari foi de 51,3 t/ha. Sabendo que em média 97,0% do carbono é emitido como CO e CO₂ ⁽¹⁷⁾, a emissão de carbono ($C_{emissão}$) foi 49,7 t/ha.

Considerando que a quantidade de CO₂ encontrada na mistura CO₂/CO é de 90,0%, as emissões (E) de CO e CO₂ no experimento foram estimadas utilizando a reação de combustão:



Emissão de CO₂:

$$E_{\text{CO}_2} = EF_{\text{CO}_2} \times C_{emissão} \quad (\text{A})$$

$$EF_{\text{CO}_2} = m_{\text{CO}_2} / m_{\text{C}} = (0,9 \text{ mol} \times 44 \text{ g/mol}) / (1 \text{ mol} \times 12 \text{ g/mol}) = 3,3 \text{ CO}_2 \text{ t/C t}$$

$$E_{\text{CO}_2} = (3,3 \text{ CO}_2 \text{ t/C t}) \times (49,7 \text{ C t/ha}) = 164 \text{ CO}_2 \text{ t/ha}$$

Emissão de CO:

$$E_{\text{CO}} = EF_{\text{CO}} \times C_{emissão} \quad (\text{B})$$

$$EF_{\text{CO}} = m_{\text{CO}} / m_{\text{C}} = (0,1 \text{ mol} \times 28 \text{ g/mol}) / (1 \text{ mol} \times 12 \text{ g/mol}) = 0,23 \text{ CO t/C t}$$

$$E_{\text{CO}} = (0,23 \text{ CO t/C t}) \times (49,7 \text{ C t/ha}) = 11,6 \text{ CO t/ha},$$

em que: E_{CO_2} e E_{CO} - são as emissões de CO₂ e CO, respectivamente (t/ha);

EF_{CO_2} e EF_{CO} - são os fatores de emissão de CO₂ e CO, respectivamente (t/ C t);

m_{CO_2} , m_{CO} e m_{C} - são as massas de CO₂, CO e carbono, respectivamente (t).

Assim, as emissões de CO e CO₂, para o experimento conduzido em Candeias do Jamari/RO, foram estimadas em 11,6 e 164 t/ha, respectivamente. Nos estudos de Neto et al. (2009)⁽⁶⁾ a E_{CO2} foi de 117,0 t/ha e a E_{CO} foi 8,1 t/ha.

Em relação às taxas anuais de emissão de carbono foram estimadas em 224,5 Mt/ano e 15,9 Mt/ano, para CO₂ e CO, respectivamente. No estado de Mato Grosso⁽⁹⁾ as taxas de emissão anuais foram de 147,0 e 10,3 Mt/ano, para CO₂ e CO, respectivamente.

CONCLUSÕES

A massa fresca total contida no experimento de Candeias do Jamari foi de 701,5 t/ha, superior aos valores encontrados na literatura; O teor de carbono contido na biomassa acima do solo antes da queima foi estimado em 195 t/ha; O consumo total de biomassa foi de 26,2%; As emissões de CO₂ e CO, no experimento de campo, foram estimadas em 164 t/ha e 11,6 t/ha, respectivamente; Os valores encontrados para as emissões em Candeias do Jamari foram mais elevados que aqueles encontrados na literatura.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto Temático número 08/04490-4 e Projeto de Doutorado número 13/21231-0), pelo financiamento deste estudo.

REFERÊNCIAS

1. ESTRELLAN, C. R.; IINO, F. Toxic emissions from open burning. **Chemosphere**, v. 80, n. 3, p. 193–207, 2010.
2. OTTMAR, R. D. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Modeling fuel consumption. **Forest Ecology and Management**, v. 317, p. 41–50, 2014.
3. FELDPAUSCH, T. R.; LLOYD, J.; LEWIS, S. L.; et al. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. **Biogeosciences**, v. 9, n. 8, p. 3381–3403, 2012.
4. GATTI, L. V; GLOOR, M.; MILLER, J. B.; et al. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, v. 506, n. 7486, p. 76–80, 2014.
5. VILLENEUVE, J.; PALACIOS, J. H.; SAVOIE, P.; GODBOUT, S. A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (<3MW). **Bioresource Technology**, v. 111, p. 1–11, 2012.

6. NETO, T. G. S.; CARVALHO, J. A.; VERAS, C. A. G.; et al. Biomass consumption and CO₂, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 2, p. 438–446, 2009.
7. DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004.
8. LOBERT, J.; SCHARFFE, D. H.; HAO, W. M.; CRUTZEN, P. J. Importance of biomass burning in the atmospheric budgets of nitrogen-containing gases. **Nature**, v. 346, n. 6284, p. 552–554, 1990.
9. CARVALHO, J. A.; COSTA, F. S.; GURGEL VERAS, C. A.; et al. Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in northern Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, 2001.
10. RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; FEARNside, P. M. Biomass burning in Brazil's Amazonian "Arc of Deforestation": burning efficiency and charcoal formation in a fire after mechanized clearing at Feliz Natal, Mato Grosso. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2535–2546, 2009.
11. ARIMA, E. Y.; BARRETO, P.; ARAÚJO, E.; SOARES-FILHO, B. Public policies can reduce tropical deforestation: Lessons and challenges from Brazil. **Land Use Policy**, v. 41, p. 465–473, 2014.
12. GONZALEZ, P.; KROLL, B.; VARGAS, C. R. Tropical rainforest biodiversity and aboveground carbon changes and uncertainties in the Selva Central, Peru. **Forest Ecology and Management**, v. 312, p. 78–91, 2014.
13. BROWN, I. F.; MARTINELLI, L. A.; THOMAS, W. W.; et al. Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: An example from Rondônia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 75, n. 1–3, p. 175–189, 1995.
14. SANTOS, J. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira**, 1996. Tese (Doutorado), Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.
15. SANDBERG, D. V.; OTTMAR, R. . Slash burning and fuel consumption in the Douglas-fir subregion. 7th Conference on Fire and Forest Meteorology. **Anais...** , 1983. Fort Collins, Colorado.
16. CARVALHO, J. A.; AMARAL, S. S.; COSTA, M. A. M.; et al. CO₂ and CO emission rates from three forest fire controlled experiments in Western Amazonia. **Atmospheric Environment**, v. 135, 2016.
17. WARD, D. E.; HARDY, C. C. Smoke emission from wildland fires. **Environment International**, v. 17, p. 117–134, 1991.
18. CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, p. 1669–1678, 1990.
19. INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). **Taxa de desmatamento anual**. Cachoeira Paulista, 2014.
20. CARVALHO, J. A.; HIGUCHI, N.; ARAÚJO, T. M.; SANTOS, J. C. Combustion completeness in a rainforest clearing experiment in Manaus, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D11, p. 13195, 1998.
21. CARVALHO JR., J. A.; SANTOS, J. .; SANTOS, J. .; LEITÃO, M. . A Tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region. **Atmospheric Environment**, v. 29, n. 17, p. 2301–2309, 1995.

COMBUSTION OF LIGNOCELLULOSIC MATERIAL IN FOREST FIRE: INDIRECT METHOD FOR DETERMINATION OF CO AND CO₂ EMISSIONS

ABSTRACT

Lignocellulosic materials wood burning can occur for the purpose of power generation in industries, as well as during fires or prescribed forest burning. Regardless of the form of occurrence, the combustion of lignocellulosic materials results in the emission of several pollutants compounds. In this work, CO and CO₂ emissions were determined during forest burning, conducted in Candeias do Jamari/RO. CO e CO₂ emissions were obtained from indirect methods and involved: (i) the quantification of total biomass per hectare; (ii) the determination of the biomass consumption; and (iii) the stoichiometric reaction of combustion balance. Total fresh biomass contained in the burn area was 701.5 t/ha. Lignocellulosic material total consumption was estimated at 26.2%. CO and CO₂ emission were 11.6 and 164 t/ha, respectively. The annual emission rate of CO₂ was estimated at 224.5 Mt/year.

Key-words: combustion, CO emission, CO₂ emission, prescribed burning, forest fire.