

Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização

Effect of wood moisture on greenhouse gases emission from carbonization process

Wagner Davel Canal¹, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho²,
Angélica de Cássia Oliveira Carneiro², Benedito Rocha Vital³,
Bárbara Luísa Corradi Pereira⁴ e Danilo Barros Donato⁵

Resumo

Esse estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa na carbonização. Utilizou-se madeira de *Eucalyptus* spp. com aproximadamente 7 anos de idade, proveniente de um teste clonal de uma empresa florestal, localizado em Divinésia, MG. Foram realizadas carbonizações em mufla de laboratório com sua madeira seccionada e sob teores de umidade, base seca, de 0%, 20% (± 5), 40% (± 5) e 60% (± 5). Com a coleta de gases não condensáveis em cada processo determinou-se o fator de emissão de CO₂, CO, CH₄ e H₂ (Kg gás / ton. mad.), além de serem determinados o rendimento gravimétrico dos produtos da carbonização. Instalou-se o experimento segundo um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (umidades) e três repetições (carbonizações). A emissão de CO₂, CO, CH₄ e H₂ aumentou com o aumento do teor de umidade da madeira e os rendimentos gravimétricos do carvão apresentaram diferentes comportamentos frente esses acréscimos. Assim, conclui-se que o fator de emissão de CO₂, CO, CH₄ e H₂ (Kg gás / ton. mad.) possui correlação significativa com o teor de umidade da madeira e os rendimentos gravimétricos apresentaram diferenças significativas de acordo com esses incrementos.

Palavras-chave: carvão vegetal, rendimento gravimétrico, fator de emissão, gases de efeito estufa.

Abstract

This study had as its main objective to evaluate the effect of wood moisture in the emission of greenhouse gases during the carbonization process. The wood from a *Eucalyptus* spp. clone analyzed was approximately seven years old and provided by a forest company from its clonal tests in Divinésia, Minas Gerais State. Carbonizations in muffle furnace were conducted with sectioned wood under moisture contents – in dry basis – corresponding to 0%, 20% (± 5), 40% (± 5) and 60% (± 5). The collection of the non-condensable gases in each process allowed determining the emission factor of CO₂, CO, CH₄ and H₂ (kg gas / wood ton.), as well as defining the gravimetric yield of the carbonization products. The experiment was conducted in a completely randomized design with four treatments (moisture) and three repetitions (carbonizations). The CO₂, CO, CH₄ and H₂ emissions grew with the moisture content increase, and charcoal gravimetric yields behave differently with moisture increment. Thus, it is possible to conclude that the CO₂, CO, CH₄ and H₂ emissions (kg gas / wood ton.) is significantly related to the moisture content of the wood, and that the gravimetric yields present reasonable differences according to the moisture gains in the wood molded samples.

Keywords: charcoal, gravimetric yield, emission factor, greenhouse gases.

¹Mestrando em Ciência Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Florestal. Avenida P.H Rolfs, s/n - Campus Universitário - 36570900 - Viçosa, MG. E-mail: wagner.d.canal@gmail.com.

²Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Florestal. Avenida P.H Rolfs, s/n - Campus Universitário - 36570900 - Viçosa, MG. E-mail: ana.marcia@ufv.br; cassiacarneiro1@gmail.com.

³Professor Titular do Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Florestal. Avenida P.H Rolfs, s/n - Campus Universitário - 36570900 - Viçosa, MG. E-mail: bvital@ufv.br.

⁴Professor Assistente do Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Florestal. Avenida P.H Rolfs, s/n - Campus Universitário - 36570900 - Viçosa, MG. E-mail: babcicorradi@gmail.com.

⁵Doutorando em Ciência Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Florestal. Avenida P.H Rolfs, s/n - Campus Universitário - 36570900 - Viçosa, MG. E-mail: danilobdonato@gmail.com.

INTRODUÇÃO

Frente à temperatura de carbonização e em condições controladas de oxigênio os constituintes químicos da madeira determinam diferenciada resistência térmica, a qual garante sua parcial degradação. Os rendimentos desse processo são próximos de 30 a 35% em massa de carvão vegetal e o restante da madeira é simplesmente lançada para o meio ambiente na forma gasosa, caracterizando o processo como potencialmente impactante ao meio ambiente (KLOSE et al., 2000; REZENDE, 2006; DUBOC et al., 2007; CGEE, 2008a; CGEE, 2008b; SOARES, 2011).

Ainda assim, essa biomassa vem ganhando grande interesse no processo de produção de energia, uma vez que ela se caracteriza como um recurso renovável e neutro em CO₂ (MÜLLER-HAGEDORN et al., 2003).

Objetivando minimizar esse aspecto, torna-se claro a necessidade de se difundir novos estudos acerca de uma produção de carvão vegetal ambientalmente mais limpa. Como exemplo, deve-se não somente relacionar diversos índices de qualidade da madeira como também componentes ambientais que a sujeita a diferentes comportamentos térmicos e determinam uma maior ou menor emissão de gases de efeito estufa durante a carbonização. Em vista disso, pode-se considerar que pesquisas que relacionem o teor de umidade da madeira com a emissão gasosa nesse processo são escassas.

Estudos já comprovaram que o conteúdo de água na madeira tem a capacidade de promover incrementos na produção de gases não condensáveis e materiais particulados, a diminuição da taxa de aquecimento, a inconstância da temperatura máxima média do processo, o aumento dos tempos de ignição e de carbonização, a diminuição do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, aumentos do tempo de carbonização e a emissão de gases poluentes para uma mesma taxa de produção de carvão vegetal (ANDRADE; CARVALHO, 1998; ARRUDA et al., 2011). No entanto, ainda não se observa na literatura análises relacionando a produção de gases de efeito estufa com o teor de umidade da madeira.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito dos diferentes teores de umidade nos rendimentos gravimétricos dos produtos da carbonização, nos percentuais de emissão de gases de efeito estufa por faixa de temperatura, e na emissão total de gases não condensáveis por teor de umidade de madeira enforada.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, situada no município de Viçosa, Minas Gerais.

Material biológico

Utilizou-se madeira de uma única árvore de *Eucalyptus* spp., com aproximadamente 7 anos de idade, proveniente de um teste clonal localizado na Fazenda Guaxupé, situada no município de Divinésia, MG (20,974° Sul e 43,088° Leste).

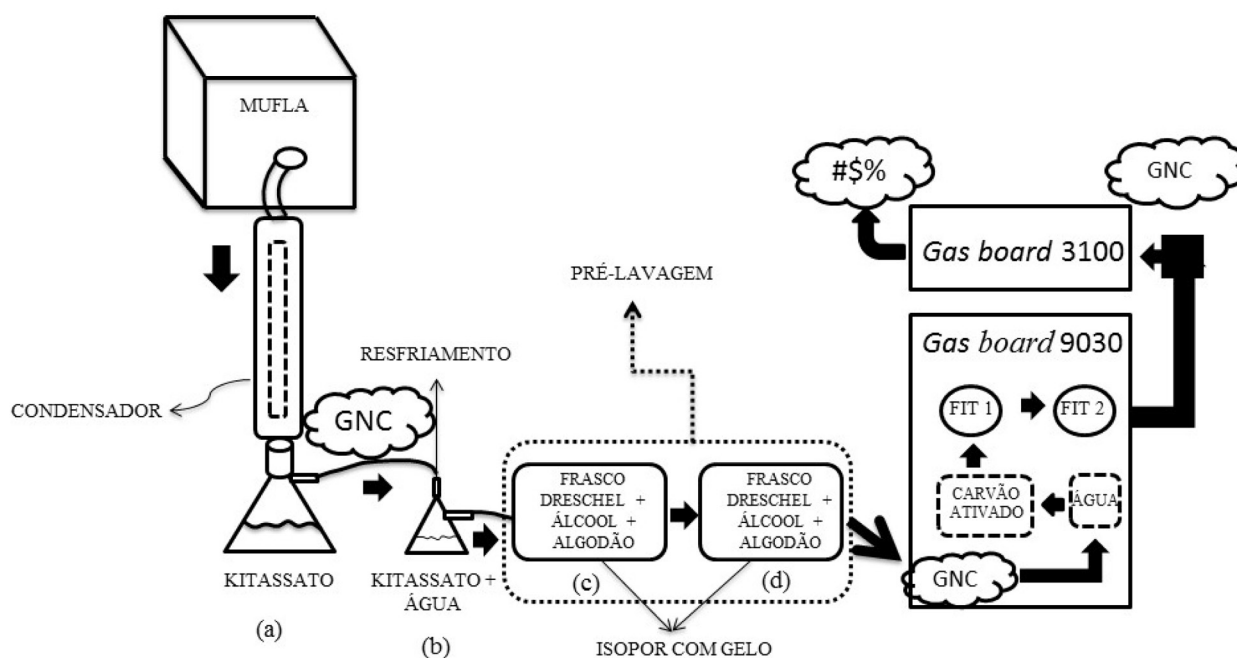
Preparo das amostras

A madeira foi subdividida em toras de 1,5 m de altura e posteriormente esquadrejada e seccionada em blocos com dimensões de 2cm x 2cm x 5 cm. A partir disso, o montante final de madeira foi dividido em três partes iguais e expostos ao ar ambiente para que sua água capilar, e posteriormente de adesão, pudessem ser retiradas naturalmente até se atingir as umidades de 60% (±5), 40% (±5) e 20% (±5). Como todos os corpos de prova apresentavam as mesmas dimensões, realizou-se a mensuração dos teores de umidade com a pesagem diária de amostras controle, as quais se encontravam identificadas e sob a mesma condição de exposição dos demais blocos de madeira. Assim, a cada período de tempo o teor de umidade do conjunto de corpos de prova de madeira decresceu para valores de 60% (±5), 40% (±5) e 20% (±5) UBS, sendo que para garantir o teor de umidade desejado os mesmos foram ensacados. Já para o teor de umidade de 0%, outra parte das amostras seccionadas foram expostas em estufa de circulação de ar forçada (103 ± 2°C) até massa constante, para garantir a sua total condição anidra.

Com isso, para cada carbonização utilizou-se em média 281 g, 289 g, 288 g e 308 g de madeira, para umidades de 0%, 20% ($\pm 5\%$), 40% ($\pm 5\%$) e 60% ($\pm 5\%$), respectivamente. As carbonizações foram feitas em forno tipo mufla, sob uma taxa média de aquecimento de $1,67^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, com incrementos de 50°C a cada 30 minutos. A temperatura inicial foi de 100°C e a temperatura final de 450°C , permanecendo estabilizada nesta última por um período de 90 minutos, totalizando, portanto, um tempo de carbonização de 5,0 horas.

Coleta de gases

Na saída da mufla foi conectado um sistema de recuperação dos gases condensáveis, utilizando um condensador tubular resfriado à água acoplado a um recipiente de coleta (kitassato a), conforme representado na Figura 1.



Fonte: Costa (2012), adaptado.

Figura 1. Caracterização do sistema de tratamento e análise dos gases não condensáveis.

Figure 1. Characterization of the processing system and analysis of non-condensable gases.

Os gases não condensáveis foram succionados por uma bomba com vazão de coleta ajustada para 1L/min, sendo conduzidos até o sistema de condicionamento de gases *Gasboard 9030 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. LTDA*. Antes da injeção no equipamento, os gases passaram por um processo de pré-lavagem, no qual foram encaminhados primeiramente a um kitassato para condensação do licor pirolenhoso mais denso (a), seguindo para posterior kitassato contendo água para resfriamento adicional dos gases (b) e mais outros dois frascos lavadores de gás do tipo *Dreschel* contendo álcool absoluto e algodão envolvidos com gelo e armazenados em isopor (c, d), conforme mostra a Figura 1. A lavagem foi necessária para evitar que possíveis gotículas de alcatrão que porventura não tivessem condensado no kitassato "a" viessem a fazê-lo na tubulação do *Gasboard*, saturando o aparelho. Após esse caminho de pré-lavagem, os gases não condensáveis seguiram para o interior do aparelho *Gasboard 9030* e conduzidos por outra lavagem em água, resfriamento a 4°C num desumidificador (*chiller*), e posteriormente por um cilindro contendo carvão ativado e algodão. Em seguida, procedeu-se à última limpeza dos gases por meio de filtros de precisão, denominados FIT1 e FIT2, os quais retêm impurezas maiores que $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$, respectivamente.

Essa sucção foi realizada em intervalos de temperatura de 50°C até a temperatura final de 450°C , sendo que foram feitas duas coletas para cada intervalo, onde a primeira foi entre o 12° e o 15° minutos e a segunda foi entre o 27° e o 30° minuto.

Concomitante a esse sistema de purificação externa e interna ao aparelho de sucção, os gases seguiram até o sistema online de análise de gás, denominado *Gasboard 3100 Wuhan CUBIC Opto-*

electronics Co. Este aparelho forneceu leituras da composição percentual base volume de CH₄, CO₂, CO, H₂, O₂ e hidrocarbonetos de cadeia pequena (C_nH_n), correspondendo a um total de 20 registros para cada carbonização.

A média dos dados de concentração dos principais gases de efeito estufa, como o metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), foram obtidos para as três repetições até a temperatura final de carbonização. Para isso, confeccionaram-se curvas percentuais de liberação de cada componente gasoso mediante sua evolução, caracterizando todo o processo em termos de emissão.

Além disso, com os dados de concentração de cada gás e o de massa dos gases não condensáveis foi possível mensurar a massa total (g) de cada componente do gás não condensável emitida até 450°C, utilizando o balanço de massa descrito na Tabela 1, conforme Taccini (2010), adaptado da metodologia de AMSIIIK.

Tabela 1. Balanço de massa dos gases não condensáveis.

Table 1. Mass balance of non-condensable gases.

Massa Específica dos Gases Não Condensáveis (ρ_{gas}, em kg gás / m³ gás)
$\rho_{\text{gas}} = [(44/0,224) * X_{\text{CO}_2}(1)] + [(28/0,224) * X_{\text{CO}}(1)] + [(2/0,224) * X_{\text{H}_2}(1)] + [(16/0,224) * X_{\text{CH}_4}]$
Massa Específica de Cada Gás Não Condensável (M_{γ}, em gramas)
$M_{\text{CO}_2} = [(44/0,224) * X_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}$
$M_{\text{CO}} = [28/0,224 * X_{\text{CO}} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}$
$M_{\text{H}_2} = [(2/0,224) * X_{\text{H}_2} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}$
$M_{\text{CH}_4} = [(16/0,224) * X_{\text{CH}_4} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}$
$X_{\text{CO}_2}, X_{\text{CO}}, X_{\text{H}_2}, X_{\text{CH}_4}$ (%) de cada gás;
$M_{\text{CO}_2}, M_{\text{CO}}, M_{\text{H}_2}, M_{\text{CH}_4}$ (massa de cada gás, em gramas);
M_{GNC} (massa dos gases não condensáveis).

Para verificar a influência da umidade na emissão de cada gás não condensável, utilizou-se para a base de cálculo a massa úmida de madeira relativa à sua respectiva umidade, subtraindo-se a massa de carvão vegetal e de licor pirolenhoso. Como resultado dessa diferença, para os quatro gases estudados, obteve-se a massa de cada gás não condensável em separado (M_{GNC}).

Posteriormente, os valores obtidos de M_{CO_2} , M_{CO} , M_{H_2} e M_{CH_4} foram transformados em fator de emissão (Kg gás / ton. madeira) com base na massa de madeira seca utilizada em cada carbonização, extrapolada para 1.000 (mil) quilos, sendo descrito na Equação 1.

Equação 1: Fator de emissão de cada gás não condensável

$$f = M_{\gamma} * \frac{1.000}{M_{\text{mads. } i}}$$

em que:

M_{γ} = massa de cada gás γ , em gramas;

$M_{\text{mads. } i}$ = massa de madeira seca correspondente a cada tratamento i , em gramas.

Rendimentos do carvão vegetal

Determinou-se o rendimento gravimétrico do carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis, sendo este último obtido por diferença, em base seca.

Análise estatística

Os dados do delineamento inteiramente casualizado com quatro tratamentos (umidades) e três repetições (carbonizações) foi submetido à análise de variância (ANOVA) a 5% de significância, para identificar possível influência da umidade nos rendimentos gravimétricos (RG). Quando observadas diferenças significativas, aplicou-se o teste Tukey em nível de 95% de probabilidade.

Para determinar as relações existentes entre o teor de umidade da madeira e fator de emissão de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrogênio (H₂) – kg gás / ton. mad., realizou-se análises de regressões, considerando seus resíduos e o seu coeficiente de determinação (R²). Para todas essas análises utilizou-se os softwares STATISTICA 8.0 e CurveExpert.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades da madeira

A densidade básica da madeira foi igual a $0,48\text{g/cm}^3$, valor inferior ao citado por Oliveira et al. (2010), que encontraram valores próximos a $0,56\text{g/cm}^3$ e de ampla utilização para a produção de carvão vegetal. Encontrou-se também um poder calorífico superior médio igual a 4.485kcal/kg , inserindo-se nos valores encontrados por Brand e Muñiz (2010) para produção de bioenergia e inserido nas faixas encontradas na literatura para clones de eucalipto.

A madeira continha 70,47% de holoceluloses, 26,47% de lignina e 3,06% de extrativos, enquanto que a sua composição elementar foi de 48,17% de C, 44,06% de O, 6,28% de H, 1,49% de N e 0,002% de S, observados nesta pesquisa.

Rendimentos gravimétricos

Os valores médios das propriedades do carvão vegetal estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Rendimento médio em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis em função do teor de umidade da madeira.

Table 2. Yield in charcoal, condensable gases and non-condensable gases related to moisture content.

UMIDADE (%)	RGCV (%)	RGGC (%)	RGGNC (%)
0	32,43 a	49,10 a	18,47 a
20	26,05 b	57,20 b	16,74 ab
40	21,00 c	63,58 c	15,42 ab
60	18,99 d	68,03 d	12,97 b

Médias, na coluna, com mesma letra não diferem entre si a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey. Sendo: RGCV: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RGGC: Rendimento gravimétrico em gases condensáveis; RGGNC: Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis.

Para as umidades de 0 %, 20 %, 40 % e 60% a massa de madeira seca foi igual a 281g, 230g, 178g e 116g, respectivamente. Desse modo, a umidade na madeira influenciou no RCV, variando de 32,43% a 0% UBS até 18,99% a 60% UBS.

O RGGC aumentou proporcionalmente ao aumento da umidade da madeira, observando-se valores de 49,10% a 0% UBS e 68,03% a 60% UBS – cerca de 20% maior. Esse comportamento já era esperado, visto que a água presente na madeira não somente promove a intensificação da produção dos gases de efeito estufa, como também proporciona a diluição do licor pirolenhoso que é posteriormente incorporada à fase condensável dos produtos da carbonização (MISSIO et al., 2014).

O RGGNC também foi inversamente proporcional à umidade da madeira, cujos valores variaram de 18,47% a 0% UBS até 12,97% a 60% UBS, conforme observado na Tabela 2 e igualmente encontrado por Missio et al. (2014).

Efeito da umidade nas emissões percentuais dos gases não condensáveis

Na Figura 2 é apresentada a curva percentual de emissão de dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO) em função da temperatura de carbonização em diferentes umidades.

Entre as temperaturas de 100°C e 200°C os constituintes químicos da madeira que possuem baixa resistência térmica começam a se degradar, percebendo-se picos emissivos muito baixos, com valores da ordem de 1,3% e 0,2%, para os gases CO_2 e CO, respectivamente, para um teor de 0% de água. Esse comportamento é devido, principalmente, à degradação térmica das hemiceluloses (YANG et al., 2007). Posteriormente, foi observado o maior pico desses gases com a emissão de 32,7% e 13,1% de CO_2 e CO a 300°C e 350°C , respectivamente. Por fim, observou-se nesse estudo que esse comportamento emissivo tende a picos de mínimos até a temperatura de 450°C .

Na Figura 3 é apresentada a curva percentual de emissão de metano (CH_4) e hidrogênio (H_2) em função da temperatura de carbonização em diferentes teores de umidade.

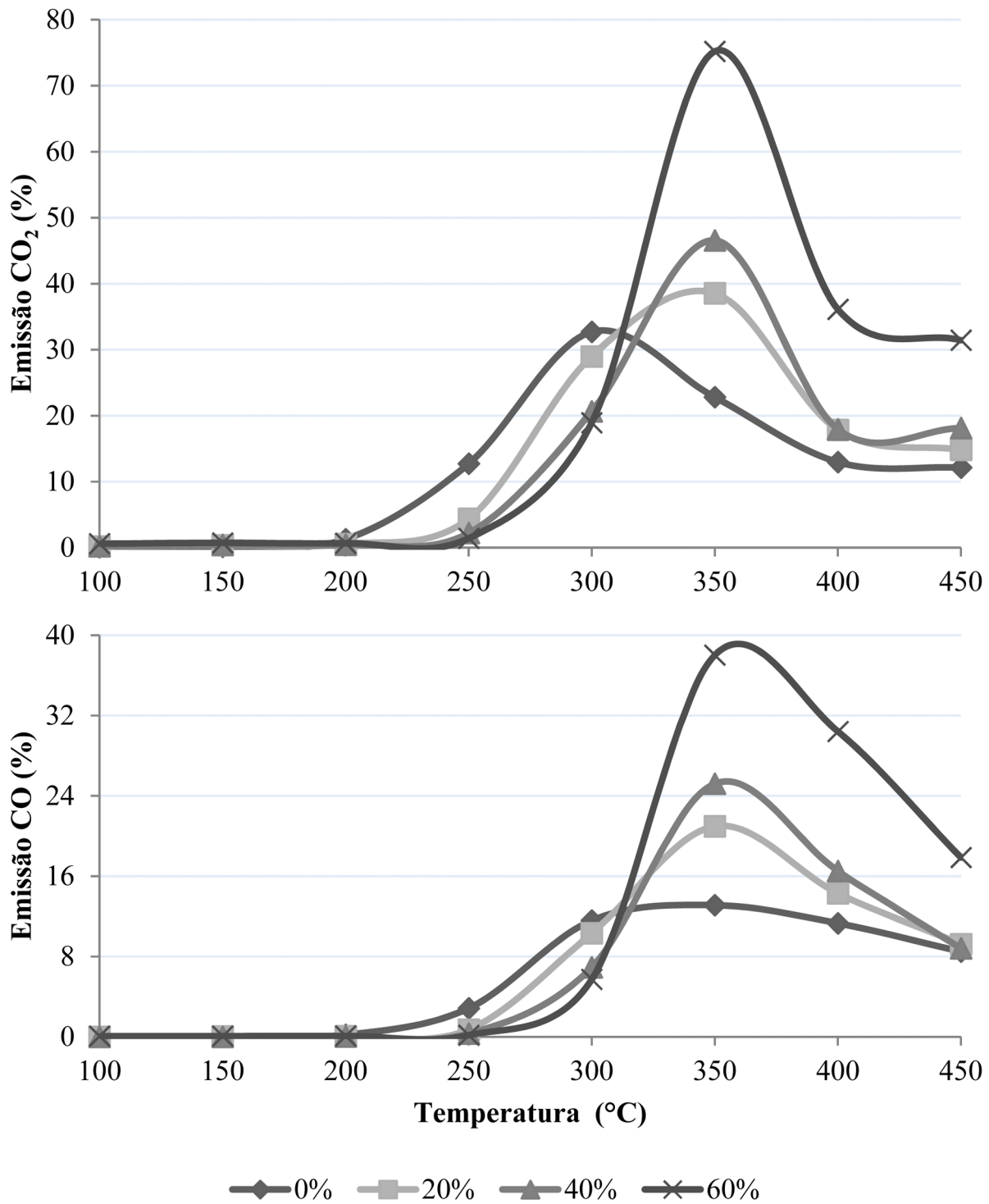


Figura 2. Percentuais médios de emissão dos gases CO₂ e CO para teores de umidade de 0%, 20%, 40% e 60%, em base seca.

Figure 2. Percentage means of CO₂ and CO emission related to moisture content (0%, 20%, 40% and 60%, dry basis).

Também para a biomassa completamente seca, observam-se picos de emissão de 0,07% e 0,0% para os gases CH₄ e H₂ nas temperaturas de 100°C e 200°C, respectivamente. Tal comportamento é devido, principalmente, a degradação da lignina em menores proporções e frações residuais de celulose (YANG et al., 2007). Na temperatura de 250°C, observa-se o início do lançamento de H₂, com valor de 0,04% em massa, com pico máximo encontrado na temperatura de 300°C, com 0,1%. Já na temperatura de 400°C foi visto o pico máximo de formação de CH₄, com 2,8% de lançamento.

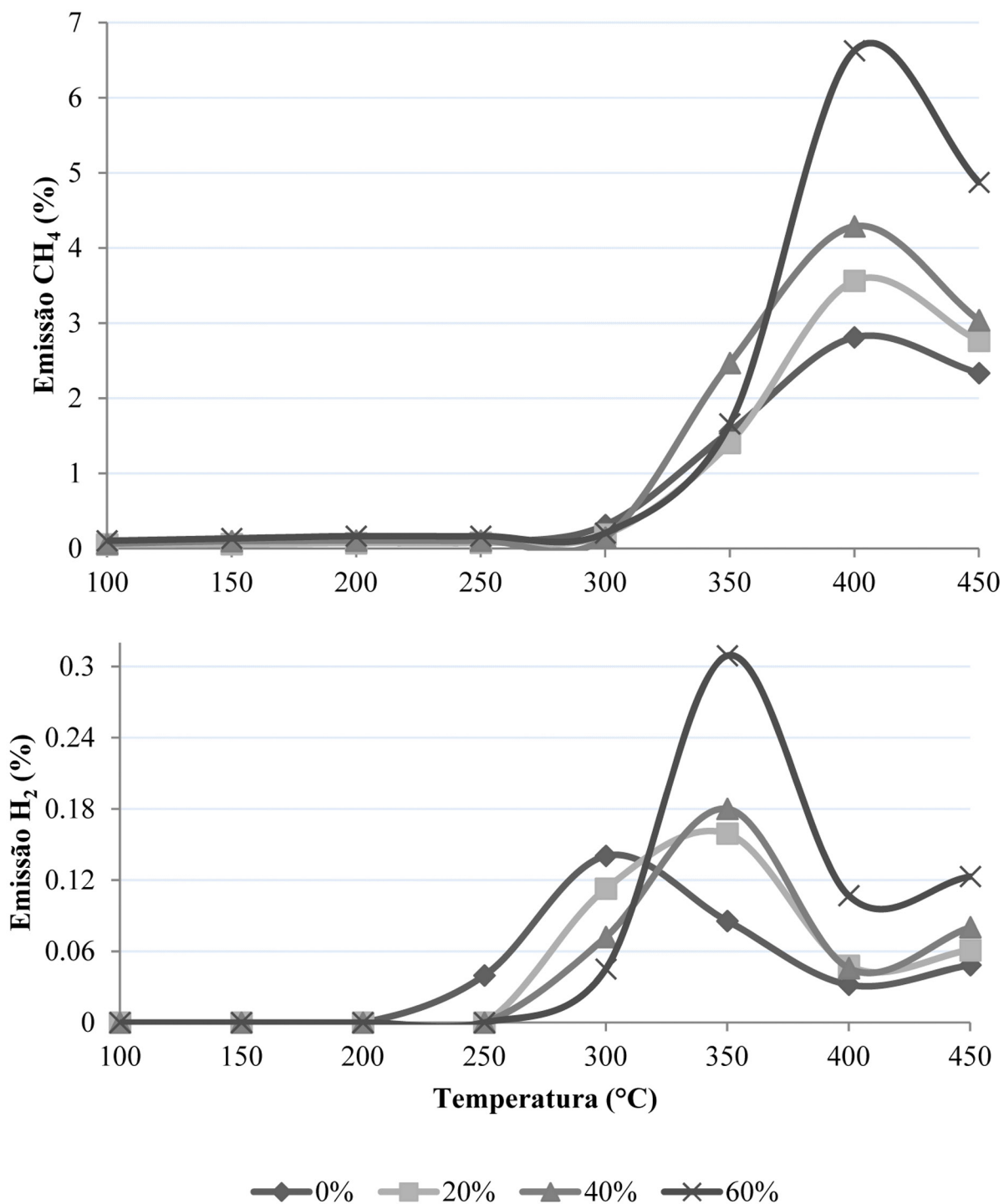


Figura 3. Percentuais médios de emissão dos gases CH₄ e H₂ para teores de umidade de 0%, 20%, 40% e 60%, em base seca.

Figure 3. Percentage means of CH₄ and H₂ emission related to moisture content (0%, 20%, 40% and 60%, dry basis).

Em temperaturas superiores a esse processo constata-se o crescimento progressivo das emissões de gases hidrogenados como o metano e o hidrogênio, observando picos máximos até aproximadamente 900°C. Ou seja, incrementos em temperatura no processo de carbonização promove a quebra dos componentes estruturais da madeira (celulose, hemiceluloses e lignina), enquanto que água e gases são produzidos em seu decorrer (YANG et al., 2007; MISSIO et al., 2014).

Assim, quanto maior a temperatura do processo, maior será a quebra de grupos metoxila (-O-CH₃) e metileno (-CH₂), além da promoção da ruptura dos anéis aromáticos da lignina (FU et al., 2009).

Visualmente, o início da formação de alcatrão foi bem caracterizado pelo aspecto amarelado da fumaça, fato devido, em grande parte, à complexação dos produtos hidrogenados originados no processo (OLIVEIRA et al., 1982).

Por fim, o comportamento das curvas em cada gráfico apresentado pode inferir sobre o efeito do teor de umidade da madeira no andamento do processo de carbonização. Eles mostram que o aumento do teor de água livre presente na madeira influi para que haja um significativo atraso no processo de degradação térmica da madeira e emissão gasosa, além de intensificar a produção desses gases. Ou seja, o processo de carbonização sob elevados teores de umidade determina um comprometimento significativo do ambiente circundante, uma vez que a alta emissão de gases de efeito estufa garante aspectos insalubres sob os pontos de vista ambiental e operacional, podendo afetar os fenômenos relacionados ao aquecimento global.

Efeito da umidade na emissão total de gases não condensáveis

Na Figura 4 é apresentado os valores médios da emissão de cada gás não condensável em função do teor de umidade da madeira.

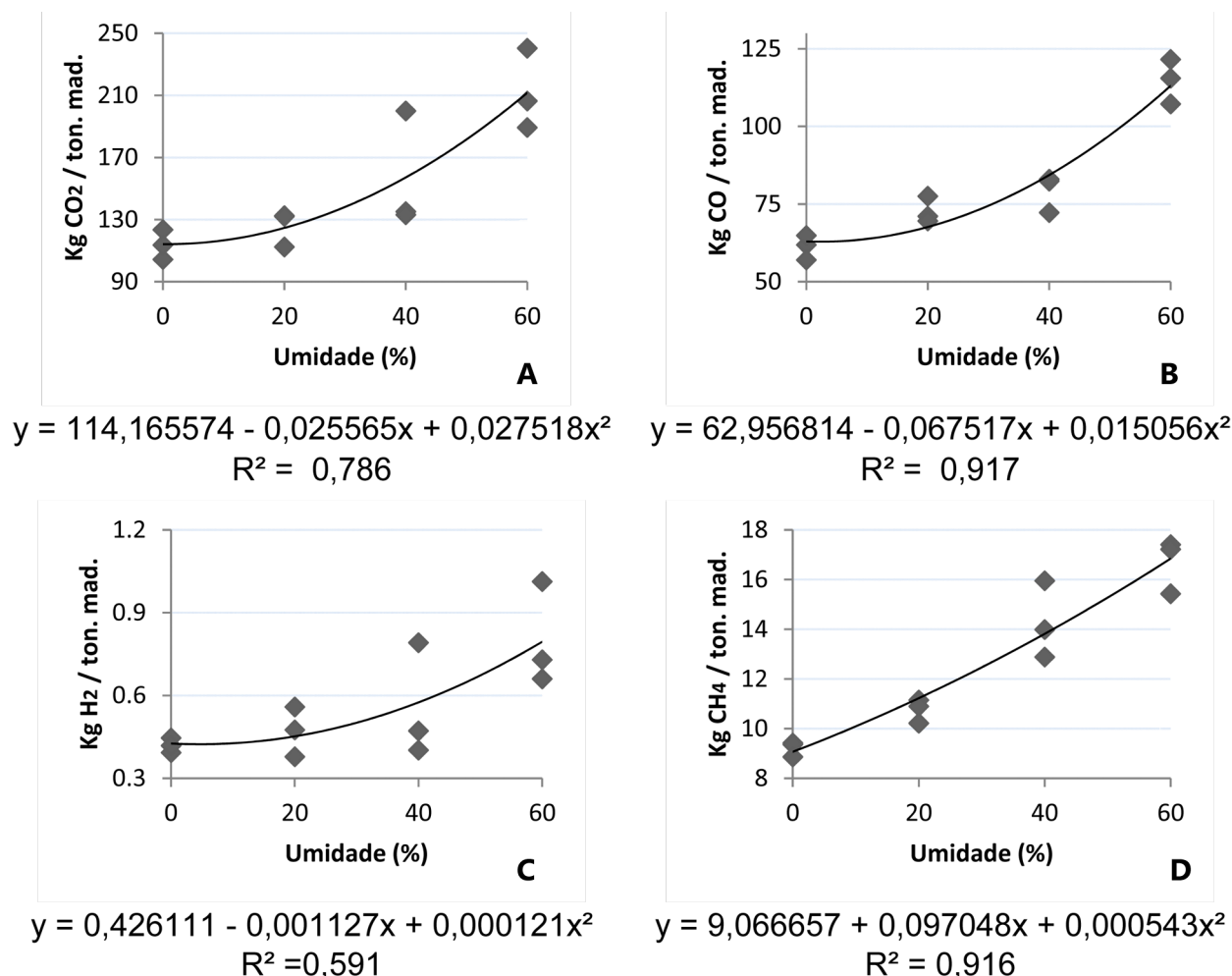


Figura 4. Valores observados e estimados de gases não condensáveis em função da umidade, sendo: CO₂ (A), CO (B), H₂ (C) e CH₄ (D)

Figure 4. Emissive behavior of non-condensable gases related to moisture content, with: CO₂ (A), CO (B), H₂ (C) and CH₄ (D).

Observa-se que um aumento no teor de umidade da madeira até níveis de 60%, em base seca, ocasiona incrementos na emissão dos gases monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e metano na fração gasosa não condensável.

As emissões dos gases CH₄, CO e H₂ no processo de carbonização da madeira promovem impacto negativo ao meio ambiente, uma vez que eles possuem potenciais de aquecimento global (GWP) respectivos a 25, 1,9 e 5,8 vezes maiores que o dióxido de carbono, considerado como gás de efeito estufa referencial – CO_{2e}. Em virtude disso, deseja-se uma maximização na produção do gás CO₂, já que ele pode ser reabsorvido pelas florestas, não interferindo na intensificação do efeito estufa (FORSTER; RAMASWAMY, 2007). Dessa forma, o total de carbono equivalente a CO₂ oriundo desse processo o qual se relaciona aos gases CH₄, CO e H₂ para uma massa de 1.000Kg de madeira carbo-

nizada, é de 465,78 kg CO_{2e}, 547,45 kg CO_{2e}, 661,77 kg CO_{2e} e 858,65 kg CO_{2e} para 0%, 20%, 40% e 60% de umidade, substituídos respectivamente nas equações representadas acima.

Esse fenômeno de incremento das emissões gasosas se deve à saturação do ambiente por água na primeira fase de carbonização – secagem –, dado que a molécula de H₂O exerce papel de reagente secundário, fazendo com que haja um aumento na quantidade dos gases CH₄, CO, H₂ e CO₂, além de se reduzir o rendimento em carvão vegetal (SUAREZ et al., 2007).

Ao simular uma real condição de campo, onde o valor de umidade da madeira varia entre 35% e 40% (UBS), a substituição desses valores nas equações expostas revelará emissões médias de 152,08 Kg de CO₂, 81,69 Kg de CO, 0,56 Kg de H₂ e 13,47 Kg de CH₄ por tonelada de madeira. E ao se reduzir a umidade da madeira para valores próximos de 25% e 30% por meio do processo de secagem, tem-se uma queda média dessas emissões para 114,17 Kg de CO₂, 72,58 Kg de CO, 0,49 Kg de H₂ e 9,07 Kg de CH₄ por tonelada de madeira.

Desse modo, considera-se que os potenciais de aquecimento global de cada gás originado no processo de carbonização podem ser menos intensos se forem empregados programas de secagem eficientes à madeira em tora até o seu ponto de saturação de fibras. Essa ação garantirá atributos adicionais a esse processo, visto que se buscará aumentos em rendimento gravimétrico em carvão vegetal, redução das emissões dos gases de efeito estufa e aumento da eficiência energética do processo, tornando a prática de produção de carvão vegetal ainda mais eficiente e menos poluidora que o uso de combustíveis fósseis (PENNISE et al., 2001; CGEE, 2008a).

CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível concluir que:

Aumentos no teor de umidade proporcionam uma diminuição nos rendimentos em carvão vegetal e em gases não condensáveis e aumento nos rendimentos em gases condensáveis;

O fator de emissão de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio e metano (Kg gás / ton. madeira) possui correlação significativa com o teor de umidade da madeira enfiada;

A presença de água garante atrasos ao processo de degradação da madeira e conseqüentemente de emissão de gases, além de garantir aumentos em produção desses compostos;

Teores de umidade acima de 30%, base seca não são recomendáveis para o processo de carbonização sob a ótica de emissão de gases de efeito estufa e também do aspecto técnico, pois se tem um aumento expressivo de metano, além de reduzir o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento – CNPq e à Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior – SECTES pelo apoio financeiro; e à Embrapa Florestas pelo apoio dado para realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. M.; CARVALHO, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 5, n. 1, p. 24-42, 1998.

ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 619-28, dez. 2010.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Conversão da biomassa em carvão vegetal*. Brasília, 2008a. 17 p. Disponível em: <www.cgee.org.br/atividades/redirect/4842>. Acesso em: 15 set. 2013.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Uso de carvão vegetal em mini altos-fornos**. Brasília, 2008b. 15 p. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_18_17_3_5_21931.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2014.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. S.; PALUDO, A. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 37 p. (Documentos, 197).

FORSTER, P. V.; RAMASWAMY, P. (Coord.) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, v. 1, p. 129-234.

FU, P.; HU, S.; XIANG, J.; SUN, L.; YANG, T.; ZHANG, A.; ZHANG, J. Mechanism study of rice straw pyrolysis by fourier transform infrared technique. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 3, n. 17, p. 522-529, 2009.

KLOSE, W.; DAMM, S.; WIEST, W. Pyrolysis and activation of different woods Thermal analysis (TG/EGA) and formal kinetics. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CATALYTIC AND THERMOCHEMICAL CONVERSIONS OF NATURAL ORGANIC POLYMERS, 4, 2000. Krasnoyarsk. **Proceedings...** Krasnoyarsk, 2000.

MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A.; LIMA, E. A. Thermal Analysis of Charcoal from Fast-Growing Eucalypt Wood: Influence of Raw Material Moisture Content. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, Philadelphia, v. 34, n. 3, p. 191-201, 2014.

MULLER-HAGEDORN, M.; BOCKHORN, H.; KREBS, L.; MULLER, U. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 68-69, p. 231-249, 2003.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-9, set. 2010.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade**. Belo Horizonte, 1982. p. 62-102.

PENNISE, D. M.; SIMITH, K. R.; KITHINJI, J. P.; REZENDE, M. E.; RAAD, T. J.; ZHANG, J.; FAN, C. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenia and Brazil. **Journal of geophysical research**, Washington, v. 106, n. D20, p. 24143-24155, out. 2001.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental**. Belo Horizonte, 2006.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. 2011. 108 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

SUAREZ, P. A. Z.; MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; WOLF, C. R. Transformação de triglicerídeos em combustíveis materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica. **Química Nova**, Canoas, v. 30, n. 3, p. 667-676, 2007.

TACCINI, M. M. **Estudo das metodologias da convenção-quadro das nações unidas sobre mudanças climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal**. 2010. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola superior de agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, **Fuel**, Amsterdam, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

Recebido em 06/10/2016

Aceito para publicação em 18/04/2016