

---

# Controle ambiental do processo de carbonização de resíduos madeireiros por meio do sistema forno-fornalha

| **Diêgo Gomes Júnior**  
IDAF

| **Glauciana da Mata Ataíde**  
UFSJ

| **Marina Donária Chaves Arantes**  
UFSJ

| **Renato da Silva Vieira**  
UFSJ

| **Alisson Rodrigues Nunes**  
IDAF

| **Renato Vinícius Oliveira Castro**  
UFSJ

| **Ana Flávia Neves Mendes Castro**  
UFSJ

| **Rômulo Leal Polastreli**  
IDAF

| **Fernando Colen**  
UFSJ

# RESUMO

O carvão vegetal é utilizado em atividades econômicas, como por exemplo uso doméstico, tratamento de águas, indústria de alimentos, setor siderúrgico. Sua produção requer responsabilidade social, viabilidade econômica e preservação ambiental. Este capítulo abordou a produção de carvão vegetal a partir de resíduos madeireiros; a legislação referente a Política Nacional de Resíduos Sólidos e as Instruções Normativas do IDAF/ES para carbonização da madeira; o processo de carbonização, destacando o rendimento gravimétrico e as emissões de gases de efeito estufa (GEE); e a experiência da Empresa Bragança Beneficiamento de Madeiras Ltda (BBM) em Alegre/ES para o aproveitamento de resíduos em sistema forno-fornalha. Os resíduos utilizados pela BBM foram oriundos dos ajustes das madeiras antes do tratamento químico das mesmas. Realizou-se carbonizações para verificar a eficiência da fornalha, ativada ou não, quanto às emissões de GEE. Observou-se aumentos de CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub> com a fornalha desativada, e CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> com a fornalha ativada, evidenciando a redução de GEE, com possibilidade de aproveitamento dos vapores para secagem da madeira, visando aumento do rendimento gravimétrico da carbonização, além da redução das emissões atmosféricas. Realizou-se estudo de viabilidade financeira para carbonização dos resíduos e o lucro médio foi R\$ 488,00/fornada. Ademais, realizou-se análise de sensibilidade para a mão de obra, rendimento gravimétrico e preço do carvão vegetal com uma abordagem de análise de risco, para distribuições de probabilidade associadas aos indicadores de desempenho do projeto pelo método de Monte Carlo, concluindo-se que o projeto apresenta uma probabilidade de 98,1% do empreendimento ser economicamente viável.

**Palavras-chave:** Pirólise, Sequestro de Carbono, Carbono Fixo, Viabilidade Econômica.

## ■ INTRODUÇÃO

De acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora/NBR 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnica/ABNT (2004), resíduo é todo material descartado nas cadeias de produção e consumo que, por limitações tecnológicas ou de mercado, não possui valor de uso ou econômico na forma em que se encontra, podendo causar impactos negativos ao ambiente, quando manejados de maneira imprópria.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012), define como resíduo todo “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos: perigosos e não perigosos. Os resíduos perigosos podem causar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; e ocasionar riscos ao ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada. O segundo grupo são os não perigosos, que são todos aqueles que não fazem parte dos resíduos perigosos, e, portanto, não trazem riscos à saúde pública (ABNT, 2004).

Um dos instrumentos mais importantes desta política é o Plano Nacional de Resíduos Sólidos/PNRS, o qual identifica os problemas dos diversos tipos de resíduos gerados, suas alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, indicando planos de metas, programas e ações para mudanças positivas sobre o quadro atual (BRASIL, 2012).

Neste sentido, o PNRS elaborou um diagnóstico dos resíduos sólidos orgânicos com origem nas atividades agrossilvopastoris e agroindustriais primárias. Além da quantificação destes resíduos, realizou-se uma estimativa das possibilidades de produção de energia por meio do reaproveitamento da biomassa. Os dados são expostos por áreas: agricultura, pecuária, silvicultura e agroindústrias primárias e foram calculados com base na produção do ano de 2009. Estimou-se um total de 85.574.465 m<sup>3</sup>/ano de resíduos florestais em duas etapas da cadeia produtiva da madeira: colheita e processamento mecânico. Dessa forma, o setor da silvicultura possui um potencial de geração de energia de 1604 MW/ano. Ressalta-se que não foi contabilizado o potencial gerado, por exemplo, nas indústrias de celulose, com a utilização do licor negro, que é empregado na co-geração de energia das indústrias de celulose.

Os resíduos madeireiros ganharam um destaque especial no PNRS, tanto pelo volume gerado na indústria de beneficiamento, no pós-consumo de produtos de base florestal e

moveleiro, quanto pelo potencial de periculosidade que podem apresentar no caso de madeiras tratadas com produtos tóxicos (como preservantes e outros) no seu processamento. Apesar dos números já serem expressivos, a tendência é a geração destes resíduos aumentarem nos próximos anos, tornando indispensável o manejo, tratamento e disposição adequados dos resíduos do setor florestal.

No Estado do Espírito Santo, os principais resíduos madeireiros são originados das serrarias e usinas de tratamento de madeira, caracterizados como costaneiras, cavacos, aparas, cepilhos, pó de serragem e rejeitos. De acordo com o Centro de Desenvolvimento do Agronegócio (CEDAGRO), estes resíduos são provenientes do desdobro primário e secundário da madeira, onde o volume de resíduo produzido no processamento da madeira é aproximadamente de 39% de pó de serragem, 36% de cavaco, 22% de aparas, 2% de rejeitos e 1% de cepilho (CEDAGRO, 2011).

Observa-se que a geração de resíduos no processamento de madeiras, no estado do Espírito Santo, apresenta grande relevância, uma vez que representa uma grande quantidade de biomassa que é tratada como resíduo sólido. Além disso, esse material tem potencial para a geração de energia, bem como de outros produtos.

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar uma alternativa de aproveitamento de resíduos madeireiros, por meio da carbonização, utilizando um sistema forno-fornalha, que permite ainda a queima dos gases emitidos por esse processo. Desse modo, consegue atender também as especificações demandadas pelo IDAF, responsável pela fiscalização de atividades potencialmente poluidoras no estado do Espírito Santo.

## **Carbonização da Madeira e dos Resíduos Madeireiros**

Uma das principais utilizações da madeira e de seus resíduos é a produção de carvão vegetal. Segundo Pinheiro *et al.* (2008), a produção de carvão vegetal e sua composição dependem, além da espécie de madeira, da carga do forno, da temperatura final de carbonização e de outras condições operacionais utilizadas. Segundo os mesmos autores, o conhecimento dos fundamentos da carbonização permite aumentar a produtividade, bem como produzir um carvão vegetal com as características necessárias para uma aplicação específica. Destaca-se que as propriedades mais importantes do carvão vegetal, para a operação do alto-forno e uso industrial geral, são a resistência à compressão e a composição química.

De acordo com Trugilho *et al.* (2005), a qualidade e a quantidade do carvão vegetal sofrerão significativa modificação em relação à madeira de origem, pois esse produto está intimamente relacionado com as características químicas, anatômicas e físicas da madeira. Essa variabilidade ocasiona desperdício do material, podendo, inclusive, dificultar a operação dos fornos siderúrgicos.

O processo de carbonização ocorre por meio da degradação térmica da madeira na ausência ou presença controlada de ar, gerando duas frações: uma sólida que é o carvão vegetal e uma gasosa. A fração gasosa é subdividida em gases condensáveis e gases não condensáveis. De acordo com Brito e Barrichelo (1981), os gases condensáveis são representados pela água, ácido acético, álcool metílico, acetona e alcatrões. Já os gases não-condensáveis são compostos basicamente por gás carbônico, monóxido de carbono, metano, hidrogênio, vapores de ácido pirolenhoso entre outros. O volume e a composição dos gases dependem de características da madeira e do processo de carbonização.

A fração condensável dos gases provenientes do processo da carbonização pode ser recuperada e utilizada, por exemplo, para pavimentação de estradas, imunização da madeira na propriedade rural, ou até mesmo queimada para geração de energia juntamente com a fração não condensável dos gases (BRITO e BARRICHELO, 1981). No caso de queimar os gases da carbonização o calor gerado pode ser utilizado na secagem de uma nova carga de madeira aumentando o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Tal fato ocorre, pois, a parte da carga enfiada, que no processo convencional, é queimada para gerar energia, secar a madeira e manter o processo de carbonização, deixa de ser queimada e se transforma também em carvão. Sendo assim, a madeira mais seca, contribuirá para um maior rendimento gravimétrico. Além disso, a queima dos gases da carbonização evita a emissão de uma grande quantidade de gases de efeito estufa (GEE's) na atmosfera, resolvendo um dos grandes problemas que o setor enfrenta.

De maneira geral, o setor de produção de carvão vegetal é visto como poluidor devido à emissão dos GEE's, bem como rudimentar, uma vez que ainda são utilizados fornos tradicionais, com pouca melhoria tecnológica. Segundo Santos (2017), a produção nacional de carvão vegetal continua, em sua grande maioria, sendo feita de maneira artesanal em fornos de alvenaria de pequena capacidade de produção e baixa tecnologia, sem recuperação dos gases da carbonização. A produção de carvão vegetal com estes tipos de fornos representa mais de 70% do sistema de produção de carvão vegetal no Brasil (RAAD; MELO; OLIVEIRA, 2014).

Somado a isso, a falta de informação a respeito de como melhorar o processo, e proceder com a queima dos gases, fazem com que o setor ainda tenha que enfrentar grande preconceito. Entretanto, é importante ressaltar que a carbonização da madeira apresenta vantagens quando comparada ao uso do carvão mineral. A carbonização é garantia de não emissão de óxidos de enxofre, que são causadores da chuva ácida e, com a reposição das florestas plantadas para fins energéticos, por meio do sequestro de carbono, obtém-se um equilíbrio entre as emissões e a utilização do CO<sub>2</sub>, que é um dos principais responsáveis pelo efeito estufa.

Podemos destacar que algumas melhorias já foram alcançadas com a utilização de fornos de carvão adaptados, e modificados, bem como existem pesquisas em andamento para melhorar o rendimento gravimétrico do processo.

Cardoso *et al.* (2010) avaliaram um sistema de forno-fornalha para carbonização da madeira com combustão dos gases, visando a redução da emissão de poluentes sem perdas de rendimento e qualidade do carvão produzido. Concluíram que a combustão dos gases da carbonização pela fornalha é eficiente, promovendo menor emissão de gases poluentes e não acarreta perda de rendimento em carvão. Porém, algumas propriedades químicas do carvão podem sofrer variações, uma vez que a combustão dos gases aumenta a velocidade de carbonização.

Oliveira *et al.* (2013) construíram três fornos circulares de alvenaria acoplados a uma fornalha, para queima dos gases gerados durante a carbonização. O controle da carbonização no sistema fornos-fornalha foi realizado por meio da mensuração da temperatura interna com sensor infravermelho. Observaram que o controle da carbonização realizado com base nas faixas de carbonização proporcionou rendimento médio de 33% de carvão, 8% de “tiços” e 3% de finos. A fornalha foi eficiente na redução de emissão de fumaça para o ambiente, funcionando durante um terço do tempo de carbonização. Desta forma o sistema fornos-fornalha foi eficiente para a produção de carvão vegetal, com baixa emissão de fumaça durante a carbonização da madeira.

Verifica-se que os estudos em relação à produção do carvão vegetal estão voltados não somente para a qualidade do produto, mas também demonstram preocupação com o ambiente e com todos os impactos do processo. Desta forma, as pesquisas e aprimoramentos de novos sistemas ou melhorias nos já existentes, são de suma importância para agregar valor ao produto e reduzir as emissões causadoras do efeito estufa. Além disso, possibilitam melhores condições de trabalho para os carvoeiros, que não ficam mais expostos diretamente aos gases da carbonização.

### **Instrução Normativa do Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo (IDAF) para Carbonização da Madeira**

O meio ambiente é a base de vida no nosso planeta, sendo formado por um conjunto de aspectos de natureza biológica, física e química que regem a existência de toda forma de vida. Reconhecendo tal importância, a 1ª Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente, realizada em Estocolmo, na Suécia em 1972, aprovou a Declaração Universal do Meio Ambiente, marco que deu “início” às mais diversas legislações sobre o regime de uso e proteção do meio ambiente (CAVALCANTI, 2018).

No Brasil, apesar dos atos normativos pioneiros quanto aos recursos naturais (Código de Águas e Código Florestal) datarem da década de 30, toma-se como um marco acerca da proteção ambiental, a criação da Lei Federal N° 6.938, de 31 de agosto de 1981, que estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente e constituiu o Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama). A partir de então, várias outras legislações e normas foram estabelecidas e constantemente atualizadas, descentralizando as ações de proteção ao meio ambiente, em que além da União, Estados e Municípios normatizam e realizam o controle e o licenciamento ambiental de atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras.

Nesse sentido, a implantação e desenvolvimento de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras devem passar por um procedimento administrativo do estado destinado a licenciá-las. Tal procedimento é regido por normativas que estabelecem as diretrizes técnicas para cada atividade, atuando como uma ferramenta para conciliar o desenvolvimento econômico com o uso dos recursos naturais. Essas normativas são elaboradas pelos órgãos ambientais (federal, estadual e municipal) considerando as particularidades técnicas da atividade objeto, tomando por base os conhecimentos existentes e disponíveis acerca destas atividades. Assim, nas atualizações dessas normativas, os órgãos ambientais consideram novas informações técnicas que tenham comprovação de aplicabilidade para cada atividade.

No âmbito do estado do Espírito Santo, o Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal/IDAF é o órgão ambiental responsável pela fiscalização e licenciamento ambiental das atividades agropecuárias, dentre elas a atividade de produção de carvão vegetal em fornos não industriais. Atualmente tal atividade é regida pela Instrução Normativa IDAF N° 020, de 23 de outubro de 2014, em que estão estabelecidas as diretrizes técnicas para o licenciamento ambiental da atividade citada. Entre outros critérios técnicos, tal normativa foca na localização da atividade de produção de carvão vegetal para instalação e operação, definindo faixas de restrição (distâncias de rodovias e residências) em que a atividade poderá ser desenvolvida, porém sem uma devida fundamentação científica, estando mais ligada a critérios empíricos. Corrobora nesse sentido o próprio texto da normativa citada, que estabelece a possibilidade de instalação e desenvolvimento da atividade de produção de carvão vegetal sem a observância das faixas de restrição, desde que haja um eficiente sistema de controle e tratamento de emissões atmosféricas, fundamentado por um parecer técnico.

Assim, é notório que o desenvolvimento técnico de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, como a produção de carvão vegetal, passa pela necessidade de aperfeiçoamento de instalações e de processos produtivos, aliando preservação e produção. O conhecimento empírico foi e sempre será importante em qualquer tipo de atividade, porém é extremamente necessário que este seja somado ao conhecimento científico, propiciando informações

consistentes para o desenvolvimento das atividades, bem como para atualizações de normas e diretrizes técnicas a estas relacionadas.

## ■ DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

### Experiência de Utilização do Sistema Forno-Fornalha na Empresa Bragança Beneficiamento de Madeiras Ltda, em Alegre, ES

A empresa Bragança Beneficiamento de Madeiras Ltda (BBM) está localizada na Fazenda São Francisco, no município de Alegre, Estado do Espírito Santo, situada a 20°44'03"S de latitude e 41°29'19"W de longitude, no Km 02 da rodovia Toufik Faissa. A atividade desta empresa é o tratamento, em autoclave, de madeiras de diferentes dimensões e espécies, tais como *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus urophylla*, e *Eucalyptus grandis*.

Antes do processo de tratamento, as peças de madeira passam por ajustes em seu comprimento para atender às demandas dos compradores, gerando resíduos madeireiros (FIGURA 1). As toras com alta tortuosidade e/ou diâmetro inferior ao comercializado pela empresa, este diâmetro mínimo de utilização é em função da demanda do comprador, também são refugadas e classificadas como resíduos.

**Figura 1.** Resíduos gerados pelo ajuste da madeira de *Eucalyptus* spp. antes do tratamento químico.



Fonte: Marina Donária Chaves Arantes.

Conforme observamos na Figura 1, a quantidade de resíduos gerados por essa atividade é elevada, sendo considerada um problema para o empreendimento. É necessário que seja fornecida uma destinação adequada para esse material, que não pode ser descartado de qualquer forma. Uma alternativa para a destinação dos resíduos encontrada pela empresa BBM foi a produção de carvão vegetal. Com essa atividade, além de solucionar um problema, existe a possibilidade de comercialização do carvão aumentando a renda da empresa.

Dessa forma, por meio do Edital FAPES nº 06/2014/Universal Individual foi construído junto à empresa BBM, em parceria com o Departamento de Ciências Florestais e da Madeira/

DCFM/CCAUE/UFES, um sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal, visando utilizar o resíduo gerado pelo tratamento de madeira, bem como promover a queima dos gases da carbonização.

O sistema consta de um forno, modelo MF1-UFV, e uma fornalha para a queima dos gases gerados (FIGURA 2). As plantas do forno e da fornalha foram cedidas pela Universidade Federal de Viçosa.

**Figura 2.** Construção do sistema forno-fornalha.



Fonte: Marina Donária Chaves Arantes.

Simultaneamente, para continuar as pesquisas vinculadas à área de Energia da Biomassa, o IDAF aprovou o projeto intitulado “Controle Ambiental do Processo de Carbonização de Resíduos Madeiros” junto ao Edital FAPES/SEAG N° 06/2015/PPE AGROPECUÁRIA, com o objetivo de avaliar o sistema forno-fornalha, para combustão dos gases da carbonização, visando a redução de emissão de poluentes, tornando o processo de carbonização mais eficiente do ponto de vista tecnológico e ambiental.

Para o desenvolvimento das pesquisas foram estabelecidas parcerias de suma importância: a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo/FAPES; a Empresa Bragança Beneficiamento de Madeiras Ltda; a Universidade Federal do Espírito Santo, por meio do Centro de Ciências Agrárias e Engenharia, do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais; e o Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo/IDAF.

### **Análise ambiental da emissão de gases de efeito estufa no sistema forno-fornalha**

No sistema forno-fornalha, construído na BBM, foram realizadas carbonizações experimentais, tanto com a fornalha ativa, realizando a queima dos gases, como também sem a queima dos gases. Desse modo foi possível comparar as emissões de gases durante o processo de carbonização dos resíduos madeiros (FIGURA 3). Visualmente, já

é possível verificar uma diferença grande entre as carbonizações realizadas com e sem a queima dos gases.

**Figura 3.** Processo de carbonização com a fornalha de queima de gases ativada, diurno (A) e noturno (C), e desativada, diurno (B) e noturno (D).

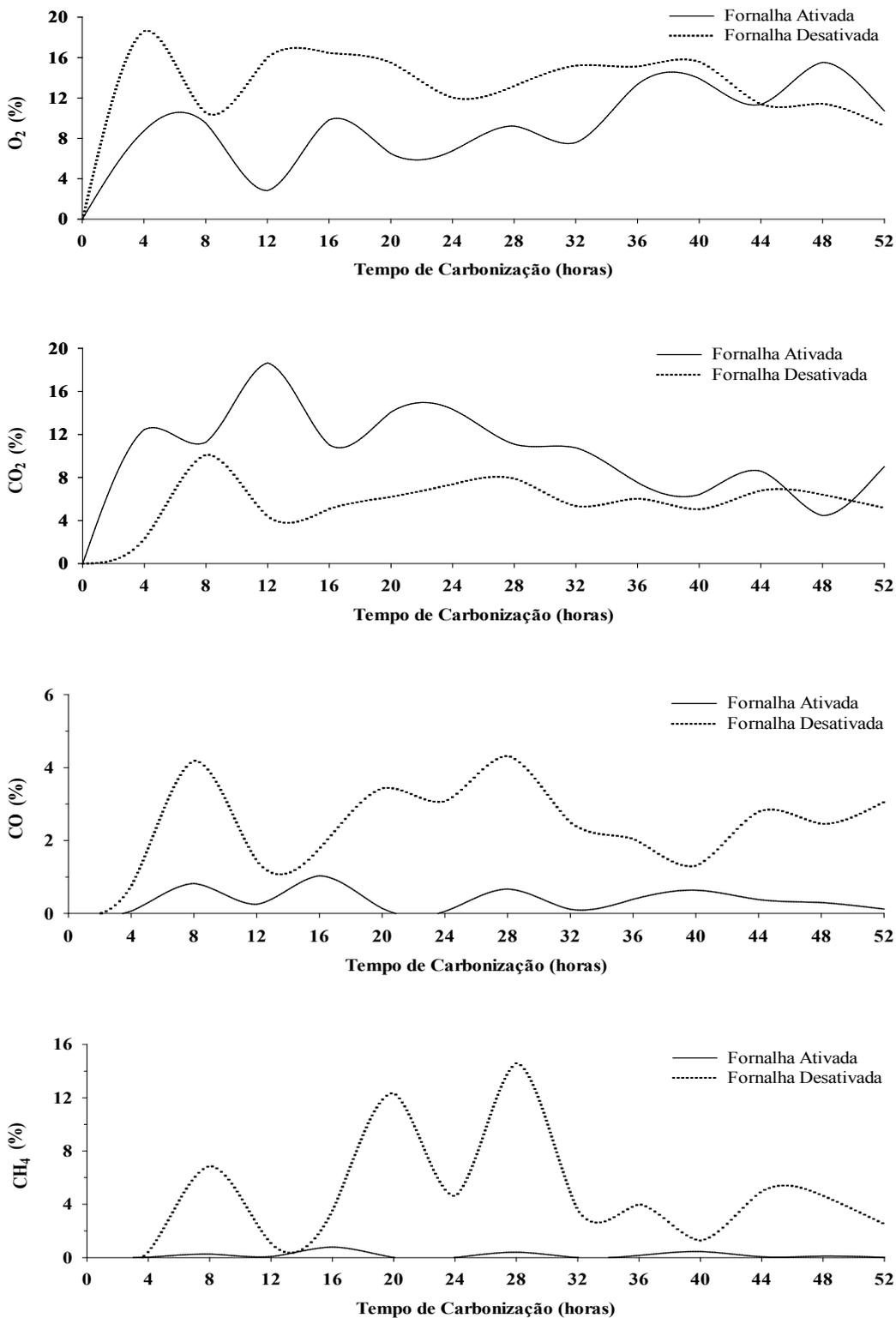


Fonte: Diêgo Gomes Júnior.

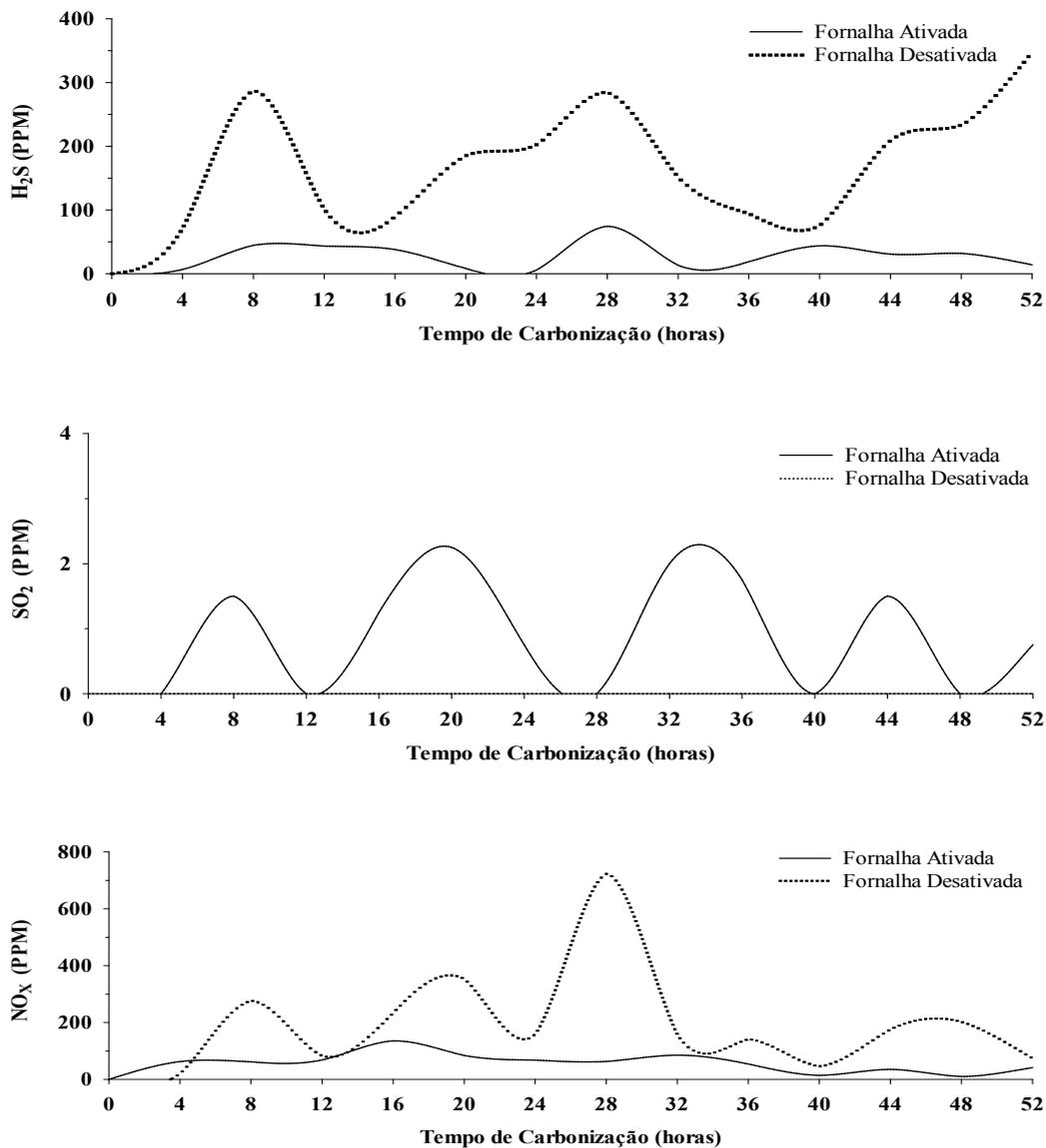
A quantificação da emissão de gases durante as carbonizações foi realizada com um aparelho analisador de emissões industriais, que coleta amostras de gases com uma sonda, ligada a uma bomba de sucção de diafragma, e realiza a análise por meio de sensores eletroquímicos e infravermelhos. A coleta dos gases foi realizada na saída da fornalha, em todas as carbonizações experimentais.

Foram realizadas seis carbonizações, sendo três com a fornalha desligada e três com a fornalha ligada. Observou-se uma variação nos valores dos teores médios dos gases emitidos ao longo das aferições (FIGURAS 4 e 5). Observa-se que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) tiveram maiores teores detectados no processo de carbonização com a fornalha ativada, enquanto os demais gases, ou seja, o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e o oxigênio ( $\text{O}_2$ ) tiveram maiores teores observados com a fornalha desativada.

**Figura 4.** Teores médios de oxigênio (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e metano (CH<sub>4</sub>) durante o processo de carbonização de resíduos madeireiros em sistema forno-fornalha.



**Figura 5.** Teores médios de gás sulfídrico ( $H_2S$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) durante o processo de carbonização de resíduos madeireiros em sistema forno-fornalha.



As fases iniciais do processo de carbonização são endotérmicas, principalmente devido à liberação do vapor d'água, que diminui o poder calorífico dos gases. Nessas etapas, a fornalha não consegue realizar a queima dos gases sem a complementação da queima de biomassa. Já nas fases intermediária e final, o processo passa a ser exotérmico, o vapor d'água já foi eliminado, e os gases produzidos possuem elevado poder calorífico, perpetuando a chama acesa no interior da fornalha. Conforme pode ser verificado na Figura 3, nas primeiras fases do processo de carbonização ocorre maior emissão de uma fumaça de coloração branca leitosa, que pode comprometer a visibilidade nas proximidades da unidade de produção. Assim, com a utilização do sistema forno-fornalha, é possível a degradação

térmica desta fumaça, mitigando seu efeito no ambiente, bem como reduzindo a presença de tal fumaça no processo produtivo.

A redução das emissões dos gases, observada no presente estudo, contribui para mitigação dos gases de efeito estufa, bem como propicia melhoria nas condições de trabalho na unidade de produção (PEREIRA *et al.*, 2017). Além disso, as propriedades do carvão produzido, com a fornalha estava ativa, mantiveram valores dentro do esperado, e do que é comumente comercializado, o que também foi verificado por Cardoso *et al.* (2010). Dessa forma, observa-se que a utilização da fornalha na queima de gases propicia ganho ambiental sem perda de eficiência produtiva.

Além do exposto, caso seja possível a instalação de mais fornos para carbonização, têm-se a possibilidade de utilizar os vapores quentes oriundos da degradação térmica dos gases da carbonização para secar uma nova carga de madeira, aumentando assim o rendimento gravimétrico do processo de carbonização.

### **Viabilidade financeira da carbonização de resíduos madeireiros no sistema forno-fornalha**

Até o momento da instalação do sistema forno-fornalha, os resíduos gerados pela empresa BBM eram doados ou comercializados como lenha. Desta forma a instalação do sistema forno-fornalha foi uma forma de agregar valor às atividades realizadas pela empresa, por meio da comercialização do carvão vegetal.

Desde o início da utilização deste sistema forno-fornalha já foram produzidas, aproximadamente, 11 toneladas de carvão vegetal, sendo os mesmos comercializados a R\$1,79 o quilo (valor informado pelo proprietário do empreendimento no momento desta pesquisa). A avaliação financeira do projeto foi baseada nos custos médios e receitas médias por fornada, informados pelo proprietário da empresa. Os valores de referência estão na Tabela 1.

Com base nesses valores, observa-se que houve um lucro médio de R\$488,00 por fornada. De maneira geral, para que seja considerado viável, o lucro deve ser maior que a opção alternativa. Nesse caso, a opção alternativa é a venda do resíduo. Considerando o preço médio praticado de R\$10,00 por m<sup>3</sup> de resíduo, o produtor teria um rendimento de R\$61,00, ao equivalente de madeira em uma fornada. Sendo assim, a produção de carvão se mostrou viável do ponto de vista econômico.

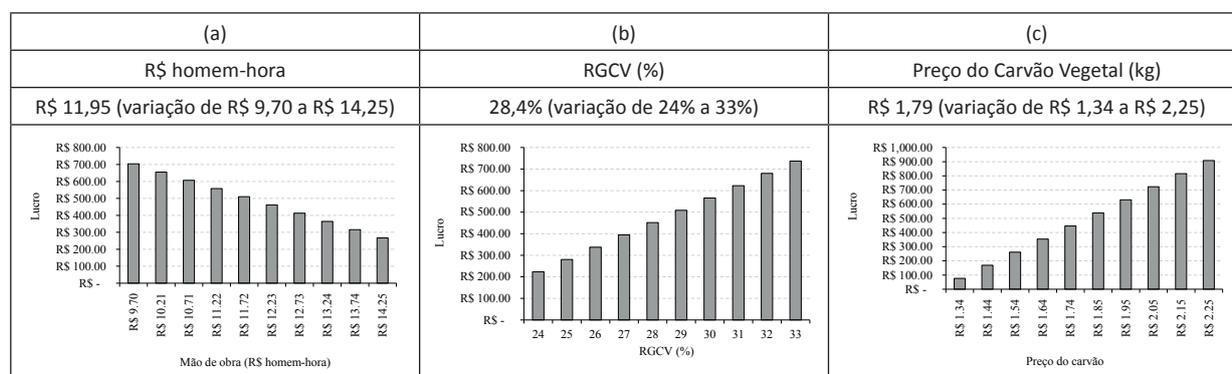
**Tabela 1.** Valores médios de referência obtidos pelas experiências na área.

Parâmetros	Referência
Mão de obra para um forno (homem-hora)	96*
Dias para a carbonização (queima + resfriamento)	3 + 4
Volume de madeira (m <sup>3</sup> por forno)	6,1
Massa seca de madeira por forno (kg)	3189,57**
Valor da mão de obra (R\$ homem-hora)	R\$ 11,95
RGCV (%)***	28,4%
Preço do Carvão Vegetal (kg)	R\$ 1,79

\*Sendo 8 horas para carregamento, 72 horas para o controle no processo de carbonização, 8 horas para controle do processo de resfriamento e 8 horas para o descarregamento e manutenções no forno; \*\* Densidade básica da madeira de 523 kg/m<sup>3</sup>; \*\*\* RGCV – Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal.

Estando ciente da existência da volatilidade do retorno do investimento, foram realizadas análises de sensibilidade, as quais fornecem o impacto direto no lucro, simulando diferentes intervalos possíveis, para nas variáveis de maior importância da análise, uma a uma, mantendo as demais constantes (COPELAND; ANTIKAROV, 2002). Realizou-se uma análise para as variáveis Valor da mão de obra (R\$ homem-hora), RGCV (%) e Preço do Carvão Vegetal (kg) (Figura 6).

**Figura 6.** Análise de sensibilidade em relação ao lucro por fornada, de acordo com a variação do preço da mão de obra (a), Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal (b) e Preço do Carvão Vegetal (c).



Observa-se que as três variáveis analisadas impactam significativamente o lucro por fornada. Em cada uma das análises, apenas a variável em destaque foi alterada, mantendo todas as demais constantes com o valor médio na Tabela 1. Sabe-se que o preço da mão de obra sofre oscilações ao longo do tempo, assim como é afetada diretamente pela qualificação ou experiência profissional. Na Figura 6a, considerando o valor de R\$9,70 reais a hora de trabalho, o lucro da fornada pode chegar a R\$700,00, enquanto o valor de R\$14,25, resulta no lucro de cerca de R\$270,00.

Cabe-se destacar que nesta análise, todas as demais variáveis permaneceram constantes. Entretanto, é possível que uma mão de obra mais qualificada e de maior custo, dê

retornos significativos de rendimento operacional e, portanto, pode impactar na otimização de outras variáveis, como o aumento do RGCV, por exemplo.

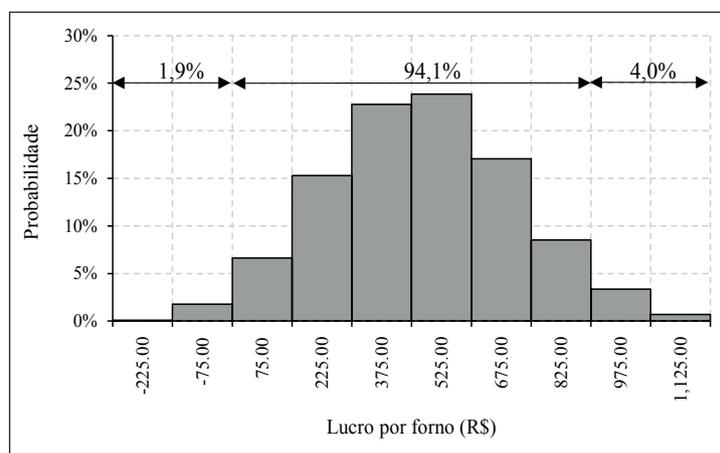
Neste raciocínio, mantendo todas as demais variáveis constantes, com os valores médios na Tabela 1, simulou-se diferentes valores de RGCV, comuns de serem obtidos em fornos deste tipo. O RGCV também impacta significativamente o lucro por fornada, podendo variar de R\$220,00 a R\$740,00 reais, para rendimentos entre 24% e 33%, respectivamente. Sabe-se da importância de um correto controle no processo de carbonização, visando o aumento do rendimento e, conseqüentemente, do lucro.

A terceira variável simulada foi o preço do carvão vegetal (R\$/kg), variando de R\$1,34 a R\$2,25. O impacto direto no lucro é observado, podendo gerar lucros por fornada entre R\$85,00 e R\$910,00.

Considerando que no mercado real, muitas variáveis de custos e receitas sofrem volatilização constante e nem sempre são dependentes umas das outras, foi adotada a análise de risco, em que se utilizam distribuições de probabilidade associadas aos indicadores de desempenho do projeto. Neste estudo, utilizou-se o método de Monte Carlo para simular valores para as variáveis aleatórias de receita e custos e, em decorrência dos valores aleatórios gerados, obter valores para a variável lucro. Foram definidas 10.000 iterações e consideradas como variáveis de entrada (*inputs*) as três variáveis analisadas anteriormente: Valor da mão de obra (R\$ homem-hora), RGCV (%) e Preço do Carvão Vegetal (kg). O indicador financeiro, lucro, foi tomado como variável de saída (*output*) (Figura 7).

Existe uma probabilidade de 98,1% do empreendimento ser economicamente viável (lucro positivo), dadas as oscilações das variáveis observadas. A maior probabilidade de retorno econômico na simulação foi de R\$474,10 por fornada. Dadas as condições avaliadas, existe a chance 1,9% do resultado ser negativo (prejuízo), em casos extremos de alto custo de mão de obra, baixo rendimento gravimétrico e baixo preço do carvão vegetal.

**Figura 7.** Probabilidade de lucro por fornada em uma propriedade do Espírito Santo que utiliza resíduos de madeira para a produção de carvão vegetal utilizando sistema forno-fornalha.



Destaca-se que, além da viabilidade financeira da produção de carvão vegetal, a busca em tornar a produção do insumo mais sustentável, incentivar o aproveitamento de coprodutos, com consequente baixa emissão de poluentes, unindo esforços para a redução da emissão de gases de efeito estufa, além das melhores condições de trabalho e qualidade para a saúde humana devem ser considerados, mas não foram contabilizados neste trabalho.

Neste caso específico não foi considerado o valor da construção do sistema forno-fornalha, pois a construção do mesmo utilizou os recursos financeiros vinculados ao Edital FAPES nº 06/2014/Universal Individual. Também não foram considerados custos com mão de obra para comercialização do carvão, pois foi utilizada a equipe da empresa BBM, que já atua na comercialização da madeira tratada com produtos químicos da empresa.

## ■ CONSIDERAÇÕES FINAIS

Biomassa é uma terminologia abrangente para designar materiais oriundos da produção agrossilvopastoril, animal e co-processamento destes pelo setor agroindustrial. Com foco na produção florestal, observa-se o potencial para o aproveitamento dos resíduos desta atividade econômica tão relevante para a humanidade, com destaque para a economia nacional.

Os resíduos nada mais são que matérias primas secundárias ao processo principal. Assim, ao fazer a utilização racional dos mesmos, observamos que estes apresentam componentes ricos em nutrientes, potencial para produção de energia na forma de calor, além da contribuição para a preservação do meio ambiente.

Propostas como a referida neste trabalho contribuem para o tripé da sustentabilidade, apontando caminhos de produção economicamente viáveis, socialmente justos e ambientalmente corretos.

## ■ AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UFES, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento de projetos aprovados no EDITAL FAPES Nº 006/2014 - UNIVERSAL - PROJETO INDIVIDUAL DE PESQUISA e EDITAL FAPES/SEAG Nº 06/2015 - PPE AGROPECUÁRIA, coordenados pelo primeiro e segundo autores do capítulo, ao Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo (IDAF) à Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), e à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

## ■ REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro-RJ, 2004.
2. BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 103 p, 2012.
3. BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. IPEF, v. 2, n. 5, p. 1-25, 1981.
4. CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R.; CARNEIRO, A. de C. o.; JACOVINE, L. A. G. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, v. 16, Suplemento, p. 115 - 124, 2010.
5. CAVALCANTI, R. P. Desenvolvimento sustentável: uma análise a partir da perspectiva dos BRICS. Revista de la Secretaría del Tribunal Permanente de Revisión, Assunção, v. 6, n. 11, p. 109-133, 2018.
6. CEDAGRO - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DO AGRONEGÓCIO. **Dimensionamento do mercado capixaba de produtos florestais madeiráveis**. Espírito Santo, 2011.
7. COPELAND, T. E.; ANTIKAROV, V., Opções Reais: Um Novo Paradigma para Reinventar a Avaliação de Investimentos, Rio de Janeiro, Campus, 2002.
8. OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CVARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.
9. PEREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. de C. O. Pyrolysis gases burners: sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592-600, 2017.
10. PINHEIRO, P. C. C. da; VIANA, E.; REZENDE, M. E. A. de; SAMPAIO, R. S. A produção de carvão vegetal. 2. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: [s.n.], 2008. 103 p.
11. RAAD, T. J.; MELO, V. F.; OLIVERIA, A. C. Fornos metálicos para produção de carvão vegetal. In: **III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL**. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: 22 Out. 2014.
12. SANTOS, S. F. O. M. Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. 144p. 2017.
13. TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M da; MORI, F. A.; LIMA, J. T. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Revista Cerne**, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.