

Artigo

Caracterização Química de Resíduos de *Eucalyptus* sp. de Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia**Teixeira, C. M.;* Martins, M. P.; Yamamoto, H.; Chrisostomo, W; Yamaji, F. M.***Rev. Virtual Quim.*, 2016, X (X), no prelo. Data de publicação na Web: 20 de setembro de 2016<http://rvq.sbq.org.br>**Chemical Characterization of *Eucalyptus* sp. Residues from Short-Rotation Forests for Bioenergy Production**

Abstract: The use of biomass resources to generate energy has been growing as renewable alternative, foremost because of their promising properties. Nowadays, one of the newest alternative resources under study is the biomass from short-rotation forests. However, such process lacks development to be used in commercial scale in Brazil, despite its positive perspectives. The aim of the present study is to chemically characterize *Eucalyptus* sp. residues, in order to find their applicability potential as sustainable fuel. The material was collected in short-rotation forests in Taiobeiras, Minas Gerais State. Two treatments were tested, namely: residues collected in the harvester (T1) and 40-day-dried soil residues (T2). Firstly, the volatile matter and the ash content were analyzed in triplicate to determine the fixed carbon content. The results were 1.35%, 79.35% and 19.3%, in T1; and 1.30%, 80.60% and 19.2%, in T2, respectively. The extractive levels were 15.88%, in T1; and 12.37%, in T2. The lignin values reached 17.12% and 20%, in T1 and T2, respectively. The holocellulose and α -cellulose levels were recorded and the hemicellulose level was found using the difference between the holocellulose and α -cellulose values. The holocellulose reached 65.94%, in T1; and 61.34%, in T2; whereas the α -cellulose presented values such as 40.64%, in T1; and 36.22%, in T2. Therefore, the hemicellulose content was 25.30% and 25.12%, in T1 and T2, respectively. Lastly, the calorific power levels were 18132.5 J/g and 18175.0 J/g, in T1 and T2, results that may be related to the chemical composition of short rotation timber.


Keywords: Bioenergia; Lignin; extractives.

Resumo

O uso da biomassa para a geração de energia tem crescido como uma fonte renovável alternativa, especialmente devido à suas propriedades promissoras. Hoje em dia, um dos mais novos recursos alternativos em estudo é a biomassa de florestas de curta rotação. No entanto, este processo carece de desenvolvimento para ser usado em escala comercial no Brasil, apesar de suas perspectivas positivas. Este trabalho teve como objetivo caracterizar quimicamente resíduos de *Eucalyptus* sp. de curta rotação para determinar seu potencial como combustível renovável. Em Taiobeiras, Estado de Minas Gerais, foram coletados os resíduos de coleta mecanizada – colheitadeira - (Tratamento T1) e os resíduos depositos no solo (Tratamento T2) para secagem durante 40 dias. Realizou-se a análise imediata das amostras em triplicata para determinar teor de cinzas, voláteis e o teor de carbono fixo, resultando, respectivamente, 1,35%, 79,35% e 19,3% para T1; 1,30%, 80,60% e 19,2% para T2. Os valores de extrativos encontrados para T1 e T2 foram 15,88% e 12,37%, respectivamente. Para lignina, os valores encontrados foram de 17,12% para T1 e 20% para T2. Determinaram-se os teores de holocelulose e α -celulose por diferença para obter o valor de hemicelulose. A holocelulose foi de 65,94% para T1 e 61,34% para T2, enquanto a α -celulose foi de 40,64% e 36,22%, respectivamente. Por diferença, a hemicelulose encontrada foi de 25,30% para T1 e 25,12% para T2. Por fim, o poder calorífico encontrado para T1 foi 18132,5 J/g e 18175,0 J/g para T2, resultados que podem estar relacionados com a composição química da madeira de curta rotação.

Palavras-chave: Bioenergia; Lignina; Extrativos.

* Universidade Federal de São Carlos, Centro de Tecnologia e Sustentabilidade, Departamento de Ciências Ambientais, campus de Sorocaba, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

 camilamtxa@gmail.com

DOI:

Caracterização Química de Resíduos de *Eucalyptus* sp. de Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia

Camila M. Teixeira,^{a,*} Mariana P. Martins,^a Hiroyuki Yamamoto,^b Walbert Chrisostomo,^c Fábio M. Yamaji^a

^a Universidade Federal de São Carlos, Centro de Tecnologia e Sustentabilidade, Departamento de Ciências Ambientais, campus de Sorocaba, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

^b Nagoya University, Biomaterials Department, Furo-cho, Chikusaku, Nagoya, 464-8601, Japan.

^c Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, campus São Carlos, CEP 13563-120, São Carlos-SP, Brasil.

* camilamtxa@gmail.com

Recebido em 9 de março de 2016. Aceito para publicação em 12 de setembro de 2016

1. Introdução
2. Materiais e métodos
 - 2.1. Matérias-primas
 - 2.2. Métodos
3. Resultados e Discussão
4. Conclusão

1. Introdução

A biomassa vegetal é uma fonte alternativa para obtenção de carbono amplamente utilizada na indústria de produtos de madeira, celulose, papel e energia.¹ Em específico, a biomassa florestal é normalmente empregada na produção de bioenergia e biocombustíveis.

Novos métodos de produção de energia vêm sendo estudados devido ao crescimento da demanda energética. Neste sentido, o uso da biomassa de florestas de rápido crescimento, chamadas de curta rotação ou florestas adensadas é uma alternativa

promissora.²

O espaçamento utilizado nos plantios florestais influencia diretamente a quantidade e qualidade da madeira. A competição por nutrientes em espaçamentos mais adensados é maior, o que influencia diretamente no desenvolvimento das árvores e, conseqüentemente, em suas propriedades químicas, físicas e mecânicas, como teor de lignina, teor de celulose, poder calorífico e resistência mecânica. Tais fatores são de extrema importância para o setor de energia, pois estão relacionados ao potencial energético das florestas.²

O conceito de florestas de curta rotação ou florestas energéticas surgiu durante a

década de 80 para definir as plantações florestais com grande número de árvores por hectare e, conseqüentemente, de curta rotação, que tinham como finalidade a produção do maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo.^{3,4}

No Brasil, essa nova conformação silvicultural está sendo particularizada ao plantio de *Eucalyptus* sp., pois para a produção de madeira para fins energéticos recomenda-se espaçamentos mais adensados. Assim, espécies com maior plasticidade ambiental e altas taxas de produtividade são mais utilizadas, como é o caso das espécies do gênero *Eucalyptus*.^{2,5}

A produtividade do plantio é uma informação que deve ser avaliada tendo como base a estimativa de massa de madeira produzida num determinado espaço (área), possibilitando analisar indivíduos com melhor desenvolvimento (material genético de interesse para produção clonal), além de possibilitar, a partir de todas estas características de volume florestal, a quantidade de carbono fixado (quanto maior o volume, maior a quantidade de carbono). Essas informações são essenciais para a tomada de decisão de aumento da área reflorestada e também da possibilidade de conseguir créditos de carbono com a floresta.⁶

Entre os diferentes fatores que condicionam a produção florestal, o espaçamento entre as árvores e a fertilização do solo são de extrema importância no estabelecimento das mudas no campo, condução da floresta (desenvolvimento ao longo do ciclo produtivo) e custos de produção, uma vez que podem influenciar a taxa de crescimento das árvores, a idade de corte bem como práticas de implantação, manejo e colheita e a qualidade da madeira.⁷

A escolha de determinada madeira para utilização energética deve basear-se, principalmente, no conhecimento do seu poder calorífico, teor de lignina e carbono fixo, refletindo diretamente em seu potencial para produção de biomassa. Outras características importantes a serem

estudadas incluem a caracterização da biomassa em termos de composição e parâmetros energéticos.^{7,8}

Por isso, as pesquisas acerca de florestas adensadas são consideradas campo interessante para buscar novas formas de exploração por possibilitar o aumento da produtividade e o planejamento de técnicas sustentáveis e eficientes para a produção de energia em menor período de tempo e com potencial de queima maior do que as florestas utilizadas hoje para esse fim. As florestas comuns apresentam espaçamento 3 m entre linhas por 2 m entre árvores, 2 m entre linhas por 2 m entre árvores e 3 m entre linhas por 1,5 m entre árvores com tempo de corte variando de 5 até 7 anos.⁸

Com o objetivo de avaliar o potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp., neste trabalho realizou-se a caracterização química desta madeira a fim de verificar a influência de suas propriedades químicas no poder calorífico e, conseqüentemente, no potencial energético deste gênero florestal.

2. Materiais e métodos

O estudo foi realizado no Laboratório de Polímeros e Materiais Lignocelulósicos da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, *campus* Sorocaba/SP. A análise de poder calorífico superior (PCS) das matérias-primas foi executada na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Unesp, *campus* Itapeva/SP. A análise termogravimétrica e de infravermelho (FTIR) foram feitas na Universidade de São Paulo – USP, *campus* São Carlos/SP.

2.1. Matérias-primas

O material estudado constitui resíduos de *Eucalyptus* sp. coletados em floresta de curta rotação em Taiobeiras, Estado de Minas Gerais, sendo divididos em dois tratamentos: coletas realizadas pela colheitadeira (T1) e

coletas realizadas de resíduos depositos no solo para secagem durante 40 dias (T2).

2.2. Métodos

2.2.1. Análise química imediata

Para a análise química imediata, primeiramente, foi feita a determinação do teor de umidade do material em uma balança determinadora A&D Company- modelo MX – 50. A análise química imediata dos resíduos (determinação do teor de cinzas, teor de voláteis e do teor de carbono fixo) foi realizada conforme norma ABNT NBR 8112/86, sendo o percentual de carbono fixo calculado pela diferença do percentual de teor de voláteis e teor de cinzas.⁹

2.2.2. Poder Calorífico

O poder calorífico superior foi obtido conforme norma ABNT NBR 8633/84, em uma bomba calorimétrica C5000 IKA® WERKE.¹⁰

2.2.3. Teor de extrativos

Os teores de extrativos totais foram determinados pela norma TAPPI T264 om-97 (Preparation of wood for chemical analysis).¹¹

2.2.4. Teor de lignina Klason insolúvel

O teor de lignina Klason insolúvel foi determinado de acordo com o método TAPPI T222 om-98. Aproximadamente 1,0 g de amostra sem extrativos, seca a partir de 60 mesh, foi transferida para um erlenmeyer com capacidade de 250 mL e submetido à hidrólise ácida com 15 mL de solução de H₂SO₄ 72% durante 2 horas em agitação

magnética constante. Em seguida, transferiu-se a solução contida no erlenmeyer para um balão de refluxo de 1000 mL, utilizando 560 mL de água destilada para a lavagem do erlenmeyer, diluindo a solução ácida para 3%, e permanecendo em refluxo por 4 horas.¹²

Ao fim do refluxo e resfriamento da solução, filtrou-se a lignina insolúvel em um funil de Büchner, sendo reservada uma fração do filtrado coletado no kitassato para a análise de lignina solúvel. A lignina, retida no funil, foi seca em estufa a 105 °C por um período de 4 horas, sendo em seguida resfriada em dessecador com sílica gel e pesada em balança analítica.

2.2.5. Teor de holocelulose (H)

Em um erlenmeyer de 500 mL, adicionou-se cerca de 3,0 g de amostra (seca e sem extrativos) e 120 mL de água destilada. À solução foram acrescentados 2,5 g de clorito de sódio (NaClO₂) e 1 mL de ácido acético glacial. O erlenmeyer contendo os reagentes foi tampado com outro erlenmeyer de 25 mL e mantido em banho aquecido a 70 °C por uma hora sob agitação constante. Após esse tempo, adicionou-se 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético, mantendo-se a temperatura por 1 hora. Passada mais 1 hora, adicionou-se novamente 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético e prosseguiu-se com o aquecimento em banho-maria por mais três horas.

O conteúdo do balão foi transferido para um funil de Büchner, mantendo-se a agitação. Fez-se a lavagem do erlenmeyer contendo resíduo com água destilada até atingir pH neutro, de modo que não ocorresse perdas de holocelulose. Lavou-se o material retido no funil com cerca de 20 mL de acetona e, posteriormente, com água destilada. O material retido no filtro foi seco em estufa a 105 °C até massa constante. Após a secagem, resfriou-se a amostra em dessecador.

2.2.6. Teor de α -celulose

Colocou-se 1,0 g da holocelulose, previamente seca, em almofariz e adicionou-se 15 mL de uma solução de NaOH 17,5% m/v. Aguardou-se dois minutos de contato entre a solução e a celulose, começou-se a macerar o material por oito minutos com o auxílio de um pistilo. Terminado esse tempo, adicionou-se 40 mL de água destilada ao almofariz, e transferiu-se o conteúdo, quantitativamente, para o funil de Büchner. O papel de filtro contendo a α -celulose retida foi levado para uma estufa a 105 °C até massa constante. Após a secagem, resfriou-se a amostra em dessecador para posterior pesagem.

2.2.7. Teor de hemicelulose (h)

Calculou-se o teor corrigido de hemicelulose para cada resíduo a partir da diferença entre os teores corrigidos de α -celulose e holocelulose.

2.2.8 Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Nas análises por FTIR empregaram-se as amostras secas de holocelulose extraída, as quais foram misturadas e maceradas com sal KBr seco, mantendo a proporção de 1:100. Foram confeccionadas pastilhas com a mistura KBr/amostra no espectrofotômetro FTIR Nicolet, modelo IR 200. Os espectros foram obtidos no modo de transmitância, com resolução de 4 cm⁻¹, varredura de 4000 a 400 cm⁻¹ e 16 varreduras por minuto.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise química imediata umidade e poder calorífico

A Tabela 1 mostra os resultados encontrados na análise química imediata umidade e poder calorífico dos tratamentos de resíduos de colheitadeira (T1) e resíduos depositos no solo para secagem (T2).

Tabela 1. Análise química imediata dos tratamentos T1 e T2*

Material	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	Poder Calorífico (J/g)
(T1)	7,65	79,35	1,35	19,3	18132,5
(T2)	12,70	80,60	1,30	19,2	18175,0

* Valores médios obtidos de triplicatas realizadas.

Ao comparar os dados obtidos de *Eucalyptus* sp. de curta rotação com as espécies utilizadas atualmente com corte em torno de 7 anos, pode-se observar uma diferença significativa na análise química imediata do material, principalmente nos teores de cinza e carbono fixo, essenciais para a viabilidade comercial.¹³

Os valores de umidade de T1 ficaram dentro do esperado, abaixo de 10%, já que os

resíduos colhidos mecanicamente são diretamente armazenados em locais fechados, não recebendo influência do ambiente. Já os valores de umidade de T2 foram maiores que o esperado, sendo justificado por um manejo inadequado do material no momento da secagem, além deste material ser deixado no campo, não havendo armazenamento adequado, o que ocasionou o acúmulo de água da chuva na

parte interior do resíduo, explicando também a presença de fungos no material. Sem o manejo adequado, o material não é exposto à secagem natural, havendo a perda de água somente na superfície da deposição.¹

Os valores encontrados para florestas com 7,5 anos de idade para cinzas foi, em média, 0,4% na madeira do *Eucalyptus* sp, principalmente devido à sua maior densidade e maior teor de carbono fixo, o que evidencia menor teor de impurezas na madeira.¹³ Por outro lado, os teores encontrados nos tratamentos T1 e T2 foram aproximadamente 3 vezes maiores, evidenciando a presença de impurezas devido à deposição deste material sobre o solo, além da presença de outros resíduos mais heterogêneos, como cascas e folhas.

O carbono fixo é o maior contribuinte de fonte energética quando a biomassa é aplicada como combustível, pois aumenta a produção de energia durante a combustão e o rendimento energético do combustível nos fornos.¹⁴ Os teores de carbono fixo encontram-se dentro do intervalo padrão de

teor de carbono fixo para madeiras, em geral entre 14% e 25%.¹⁵ Esta variação pode ser decorrente da heterogeneidade entre espécies, região/tecido da planta analisada e influências externas, tais como solo, clima e método de cultivo.

Os materiais analisados apresentaram teores de carbono fixo semelhantes, próximo de 19%, contudo a contribuição energética para o poder calorífico proveniente do carbono fixo depende de sua composição química, como as quantidades de lignina e α -celulose presentes, que varia entre as fontes vegetais e de acordo com a idade e o tecido do material lignocelulósico submetido à combustão.¹⁶

3.2. Análise química

A Tabela 2 apresenta os valores em porcentagem encontrados na análise química dos tratamentos dos resíduos de colheiteira (T1) e resíduos depositos no solo para secagem (T2).

Tabela 2. Análise química dos tratamentos T1 e T2

Material	Extrativos (%)	Lignina Insolúvel (%)	Holocelulose (%)	Hemicelulose (%)	α -celulose (%)
(T1)	15,88	17,12	65,94	25,30	40,64
(T2)	12,37	20,00	61,34	25,12	36,22

Os extrativos presentes no material lignocelulósico colaboram com o poder calorífico do biocombustível sólido, uma vez que possuem conteúdo energético em suas moléculas constituintes liberado durante a combustão.¹⁷ A análise mostrou que as matérias-primas contêm teores de extrativos totais entre 12-16%.

O teor de lignina varia de acordo com a espécie vegetal; em madeiras de folhosas pode variar de 15% a 24%.¹⁶ O percentual de lignina presente no material está diretamente relacionado ao seu poder calorífico, visto que a lignina é o grande

contribuinte do potencial energético apresentado pelo biocombustível sólido durante combustão, além de proporcionar uma queima mais lenta do combustível, devido a sua resistência térmica característica.

Durante o processo de extração da holocelulose, pode-se observar a presença de lignina associada, o que interferiu no teor de lignina real da madeira. Embora os teores de lignina insolúvel tenham diferido significativamente, o poder calorífico entre os tratamentos foi parecido, pois recebeu a

influência da lignina associada que não pode ser estimada no processo Klason.¹⁷

Em madeiras de *Eucalyptus grandis* com seis anos de idade, encontrou-se correlação positiva entre o teor de lignina e a densidade básica, e correlação negativa da densidade com o teor de holocelulose.¹⁸ Segundo os autores, tal fato significa que madeiras mais densas, dentro de uma mesma espécie, possuem um maior teor de lignina e menor teor de holocelulose. Ademais, embora ainda seja difícil determinar a quantidade de lignina total presente na madeira, estudos mostram que existe uma correlação positiva entre a idade do *Eucalyptus* sp. e o valor de carbono fixo encontrado. Embora os teores de lignina insolúvel tenham sido menores que valores padrões encontrados na literatura, em torno de 25%, o carbono fixo foi alto, chegando a atingir quase 20%.¹⁹

De acordo com estudos das características físico-químicas da madeira de *Eucalyptus saligna*, o teor de lignina apresentou correlação com o teor de holocelulose, constatando que quanto menor o teor de lignina maior será o teor de holocelulose da madeira.¹⁹

O percentual de α -celulose encontrado para a madeira de *Eucalyptus* sp. pode representar uma vantagem na aplicação desses materiais como biocombustível sólido, pois a α -celulose contribui com o conteúdo de carbono fixo do material e apresenta maior estabilidade térmica, assim como a lignina.²⁰

3.3. Análise das amostras de holocelulose por espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Empregou-se a técnica FTIR para analisar as amostras de holocelulose extraídas e certificar-se da possível presença de lignina remanescente do processo de extração, a partir da identificação dos grupos funcionais característicos da macromolécula de lignina.

Nas ligninas, as absorções mais frequentes, como os estiramentos O–H, C–H e C=O aparecem na região acima de 1600 cm^{-1} e as bandas vibracionais do anel aromático, próximo de 1510 cm^{-1} . As principais bandas utilizadas para identificação da presença de lignina localizam-se próximo a 1600 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} e 1460 cm^{-1} .²¹

Nos espectros apresentados para as amostras de holocelulose extraídas de *Eucalyptus* sp. (Figura 1) observaram-se bandas localizadas em 1646 cm^{-1} e em 1465 cm^{-1} . A presença de tais bandas em todas as amostras de holocelulose evidencia a presença de lignina remanescente do processo de extração. Uma vez havendo lignina associada nas amostras, os teores de holocelulose calculados podem refletir uma porcentagem superior de massa, superestimando o que realmente o material contém.

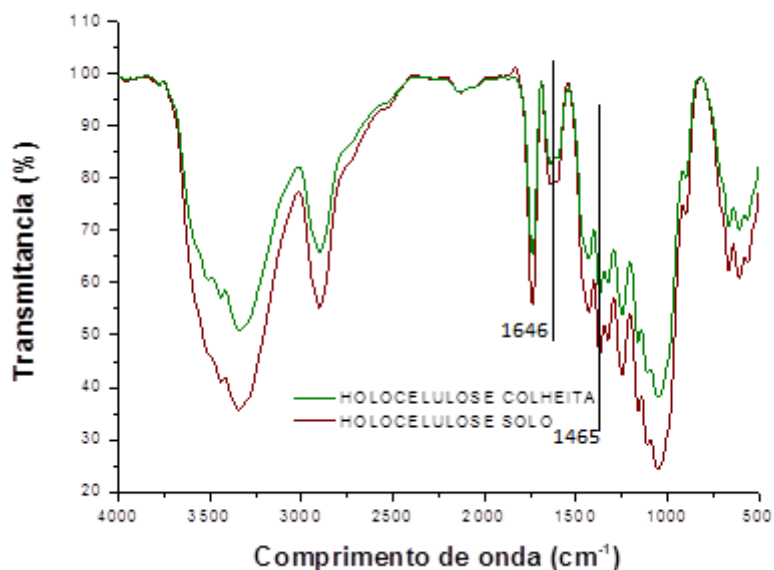


Figura 1. Gráfico comparativo da transmitância em relação ao comprimento de onda de holocelulose em T1 e T2

4. Conclusão

A partir dos resultados obtidos neste estudo, observou-se a grande influência que os componentes químicos majoritários exercem sobre o nível de poder calorífico superior e quantidades dos materiais lignocelulósicos, sendo o conteúdo de lignina, α -celulose e percentual de carbono, aliados a um reduzido teor de cinzas, os fatores principais da promoção de um melhor desempenho da madeira proveniente de florestas de curta rotação na geração de energia, proporcionando uma queima prolongada do material, que pode ser utilizado na forma de biocombustível sólido, com fornecimento energético sustentado ao longo do processo de conversão de energia.

O espectro na região do infravermelho (FTIR) mostrou a presença de lignina remanescente no processo de extração de holocelulose, justificando os valores subestimados de lignina que foram obtidos pelo processo de Klason, influenciando diretamente nos resultados observados de poder calorífico, que apresentaram um valor

próximo entre os tratamentos, embora os teores de lignina insolúvel encontrados tenham diferido significativamente.

Vale destacar que as propriedades químicas da madeira influenciam na qualidade do material para bioenergia, logo este trabalho evidenciou o potencial energético existente nas madeiras de *Eucalyptus* sp. de florestas de curta rotação.

Referências Bibliográficas

¹ Nakashima, G.T.; Provedel, M. M.; Da Silva, D. A.; Chrisostomo, W.; Yamaji, F. M. Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* **2014**, *22*. [Link]

² Eloy, E. Quantificação e Caracterização da biomassa florestal em plantios de curta rotação. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Santa Maria – Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, Santa Maria, 2013. [Link]

- ³ Pinheiro, L. L. Análise da sustentabilidade da produção de carvão vegetal na Paraíba. *Dissertação de Mestrado* - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. [\[Link\]](#)
- ⁴ White, E. M. *Woody biomass for bioenergy and biofuels in the United States—a briefing paper*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Portland, 2010.
- ⁵ Couto, L.; Müller, M. D. Em Florestas Energéticas no Brasil; Cortez, L. A. B.; Lora, E. E. S.; Gómez, E. O.; org.; Biomassa para Energia. 1ed.Campinas: Editora da Unicamp, 2008, cap. 1
- ⁶ Trugilho, P. F.; Arantes, M. D. C.; de Pádua, F. A.; Almado, R. P.; Baliza, A. E. R. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. *Cerne*, **2010**, *16*, 33. [\[Link\]](#)
- ⁷ Balloni, E. A.; Simões, J. W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais **1980**, *1*, 1. [\[Link\]](#)
- ⁸ Oliveira Neto, S. N.; Reis, G. G.; Reis, M. G. F.; Neves, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, em resposta à adubação e ao espaçamento. *Revista Árvore* **2003**, *27*, 15. [\[CrossRef\]](#)
- ⁹ Associação Brasileira De Normas Técnicas NBR 8112/86. Carvão vegetal - Análise Imediata. Rio de Janeiro, RJ, 1986. [\[Link\]](#)
- ¹⁰ Associação Brasileira De Normas Técnicas NBR 8633/84. Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, RJ, 1984. [\[Link\]](#)
- ¹¹ TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T264 om-97 – Tappi Test Methods, 1997. [\[Link\]](#)
- ¹² TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry) Standard Method T222 om-98 – Tappi Test Methods, 1998. [\[Link\]](#)
- ¹³ Pereira, B. L. C.; Oliveira, A. C.; Carvalho, A. M. M. L.; Carneiro, A. C. O.; Vital, B. R.; Santos, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. *Scientia Forestalis* **2013**, *41*, 217. [\[Link\]](#)
- ¹⁴ Tabarés, J. L. M.; Ortiz, E.; Granada, E.; Viar, F. P. Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes). *Fuel* **2009**, *79*, 1229. [\[CrossRef\]](#)
- ¹⁵ Vale, A. T.; Brasil, M. A. M.; Leão, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. *Ciência Florestal* **2002**, *12*, 71. [\[Link\]](#)
- ¹⁶ Santos, J. R. S. Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012. [\[Link\]](#)
- ¹⁷ Quirino, W. F.; Vale, A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; Azevedo, A. C. S. Poder calorífico de madeira e resíduos lignocelulósicos. *Biomassa e Energia* **2004**, *1*, 173. [\[Link\]](#)
- ¹⁸ Trugilho, P. F.; Lima, J. T.; Mendes, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Cerne* **1996**, *2*, 97. [\[Link\]](#)
- ¹⁹ Brito, J. O.; Barrichelo, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. *IPEF* **1997**, *9*. [\[Link\]](#)
- ²⁰ Sebío-Puñal, T.; Naya, S.; López-Beceiro, J.; Tarrío-Saavedra, J.; Artiaga, R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **2012**, *109*, 1163. [\[CrossRef\]](#)
- ²¹ Lin, S. Y.; Dence, C. W.; *Methods in lignin chemistry*. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- ²² Fengel, D.; Wegener, G.; *Wood: Chemistry, ultrastructure and reactions*. Walter de Gruyter: New York, 1989.