RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 31/08/2017.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Sorocaba

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em
Ciências Ambientais

RENATA SILVA VIOTTO

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE CULTIVO DO COGUMELO SHIITAKE – *Lentinula edodes* – PARA FINS BIOENERGÉTICOS

Sorocaba
2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Sorocaba

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em
Ciências Ambientais

RENATA SILVA VIOTTO

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE CULTIVO DO COGUMELO SHIITAKE – *Lentinula edodes* – PARA FINS BIOENERGÉTICOS

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – *Campus* de Sorocaba, na Área de Concentração: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Cardoso de Morais
Coorientador: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji

Sorocaba
2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Unesp
Instituto de Ciência e Tecnologia – Câmpus de Sorocaba

Viotto, Renata Silva.
Caracterização e avaliação do resíduo de cultivo do cogumelo shiitake – *Lentinula edodes* – para fins bionergéticos / Renata Silva Viotto, 2016.
125 f.: il.

Orientador: Leandro Cardoso de Morais.
Coorientador: Fábio Minoru Yamaji.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba), 2016.

1. Shiitake. 2. Biomassa. 3. Biocombustíveis. 4. Biocarvão. 5. Resíduos agrícolas. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba). II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Caracterização e avaliação do resíduo de cultivo do cogumelo shiitake - Lentinula edodes – para fins bioenergéticos.

AUTORA: RENATA SILVA VIOTTO
ORIENTADOR: LEANDRO CARDOSO DE MORAIS
COORIENTADOR: FABIO MINORU YAMAJI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LEANDRO CARDOSO DE MORAIS
Coordenação de Curso de Engenharia Ambiental - ICTS/ UNESP / UNESP-Sorocaba

Prof. Dr. ANDRÉ HENRIQUE ROSA
Coordenação de Curso de Engenharia Ambiental - ICTS/ UNESP / UNESP-Sorocaba

Prof. Dr. WALTER RUGGERI WALDMAN
Campus de Sorocaba / UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Sorocaba, 31 de agosto de 2016

Aos meus pais e irmão, bens mais preciosos que possuo,
pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo e Sueli, e meu irmão Lucas, exemplos em minha vida, por todo o amor, apoio e confiança que permitiram que eu chegasse até aqui. Apesar das dificuldades encontradas ao longo do caminho, vocês não me deixaram desistir e me ensinaram a ser cada vez mais grata à vida. Essa conquista é nossa. Amo vocês!

A toda a minha família, sempre tão presente em minha vida, pelo incentivo e torcida, em especial aos meus avós, Cida e Paulo, pelos ensinamentos tão valiosos que levarei comigo para a vida toda.

Ao Yves, meu amor, amigo e companheiro que me surpreende a cada dia que passa. Obrigada por tudo. Com você ao meu lado me sinto completa e infinitamente feliz. E que assim continue, para sempre. Amo você.

Às minhas amigas que amo tanto, praticamente irmãs, Mariana, Gisele, Juliene e Vanessa, pelos quase vinte anos de amizade, pelos infinitos momentos compartilhados, pelas risadas, conselhos e parceria. O apoio de vocês foi fundamental para deixar essa etapa da minha vida mais leve.

Ao meu orientador e Prof. Dr. Leandro Morais, pela oportunidade, ensinamentos e momentos compartilhados nesses quase três anos de convivência. Obrigada pela confiança e por acreditar em meu potencial.

Ao meu coorientador e Prof. Dr. Fábio Yamaji, pelos esclarecimentos e auxílio oferecidos ao longo desse período, assim como a todos os alunos e professores do Laboratório de Biomassa e Bioenergia da UFSCar - *Campus* Sorocaba que me ajudaram durante as análises, em especial ao Luís Santos (Tatuí) e Gabriela Nakashima.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, em especial aos Prof. Dr. André Rosa e Prof. Dr. Manuel Guandique pelas contribuições durante o exame de qualificação.

A todos os funcionários do Instituto de Ciência e Tecnologia da Unesp - *Campus* Sorocaba, em especial para as queridas Suzan Martins e Letícia Boschini, por me ajudarem com a pesquisa nos momentos em que mais precisei.

A todos as amizades construídas na Unesp durante esse período, pelo apoio, carinho e companheirismo, em especial a Ariane, Alex, Rafael, Jéssica, Murilo, Claudia e Vivian.

À minha grande amiga e irmã Carol, pela linda amizade que temos desde os tempos de faculdade, pelo carinho de sempre, pelo companheirismo e por todos os momentos que

compartilhamos até hoje. Seu apoio e sua amizade durante o mestrado foram muito importantes para eu chegar até aqui.

À minha amiga e companheira de laboratório, Amanda, que teve um papel essencial e muito significativo durante esse último ano do mestrado. Obrigada pela paciência comigo, pelos ensinamentos e, principalmente, pelas tantas risadas que demos juntas nesses últimos tempos. Você me ajudou muito e sempre serei muito grata por isso.

À Prof[a]. Dr[a]. Marina Capelari, do Instituto de Botânica de São Paulo, pelos ensinamentos e sugestões que me auxiliaram na escolha do meu objeto de estudo.

Ao Prof. Alexander Christianini, meu professor e orientador durante a graduação na UFSCar, pelo apoio de sempre e pela ajuda dada com a minha dissertação.

E, finalmente, à Empresa Yuri Cogumelos, em especial ao Ywao Akamatsu, pelo fornecimento dos resíduos de cultivo do shiitake e por sempre ter me recebido tão bem desde o início.

Viotto, R. S. **Caracterização e avaliação do resíduo de cultivo do cogumelo shiitake – *Lentinula edodes* – para fins bioenergéticos.** 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia *campus* Sorocaba, UNESP – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2016.

RESUMO

Os atuais padrões mundiais de consumo energético estão baseados na utilização de combustíveis fósseis, os quais, além de serem não renováveis, geram diversos problemas ambientais. Nos últimos anos houve um aumento na busca por fontes energéticas alternativas e mais sustentáveis, como as biomassas provenientes de resíduos agroindustriais, as quais podem apresentar grande potencial energético por área e baixos impactos ambientais. Com o intuito de minimizar os problemas ambientais relacionados à geração e descarte de resíduos provenientes das atividades de cultivo de cogumelos, esse estudo teve como objetivo avaliar o potencial bioenergético do resíduo de cultivo de shiitake (RCS) seco e por meio de sua conversão termoquímica pelo processo de pirólise em três temperaturas diferentes (350°C, 450°C e 550°C). Mediante às análises, o biocarvão de 350°C (BC350) foi considerado com o maior potencial energético devido à menor quantidade de cinzas e maiores quantidades de materiais voláteis, carbono fixo, poder calorífico, rendimento gravimétrico e fator de rendimento gravimétrico. As análises químicas e físicas revelaram que o RCS seco apresenta uma natureza bastante complexa, característica comumente encontrada em materiais de origem lignocelulósica. As análises termogravimétricas foram realizadas em três rampas de aquecimento, 10°C/min, 15°C/min e 20°C/min, em atmosfera oxidante e inerte. Foram identificadas etapas de conversão referentes à perda de água e degradação de hemicelulose, celulose e lignina. O estudo cinético foi realizado com o método não isotérmico e não isoconversional de Kissinger. As energias de ativação obtidas foram de 110,3 kJ/mol e 136 kJ/mol para o RCS seco e BC350, respectivamente, e encontraram-se dentro do intervalo obtido para outras biomassas. O RCS apresentou características que permitiram concluir que esse resíduo possui um grande valor para ser utilizado como um potencial recurso para a geração de bioenergia. Potencial que pode ser melhorado através do processo de pirólise a 350°C.

Palavras-chave: resíduo de cultivo de shiitake; biomassa, bioenergia, biocarvão.

Viotto, R. S. **Caracterization and evaluation of spent shiitake substrate – *Lentinula edodes* – for bioenergetic purposes.** 2016. 125 p. Dissertation (Master's degree Environmental Sciences) – Institute of Science and Technology *campus* Sorocaba, UNESP – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2016.

ABSTRACT

Current global patterns of energy consumption are based on the use of fossil fuels, which are not only non-renewable resources, but also generate vast environmental problems. Recent years have witnessed an increasing search for alternative, more sustainable, energy sources, such as biomasses originated from agroindustrial residues, a material that may present great energetic potential per area and minor environmental impacts. Aiming at minimizing environmental impacts related with the generation and discard of mushroom cultivation residues, the present study intended to evaluate the bioenergetic potential of the spent shiitake substrate (SSS), both in its dry form and after its thermochemical conversion by a pyrolysis process in 3 different temperatures (350°C, 450°C e 550°C). Further analyses founded the consideration that the 350°C biochar (BC350) was that with the greatest energetic potential, due to its reduced ash amounts and higher volatile amounts, fixed carbon, heat value, gravimetric yield and gravimetric yield factor. Chemical and physical analyses revealed that the dry SSS possesses a highly complex nature, characteristics commonly found in lignocellulosic materials. Thermogravimetric analyses were performed in 3 heating rates, 10°C/min, 15°C/min and 20°C/min in oxidizing and inert atmospheres. Conversion steps related with water loss and degradation of hemicellulose, cellulose and lignin have been identified. The kinetic study was carried out by non-isothermal and non-isoconversional Kissinger method. The activation energies obtained were of 110.3 kJ mol^{-1} and 136 kJ mol^{-1} for the SSS and BC350, respectively and are within the range found for other biomasses. The SSS presented features that allow the conclusion that such residue possesses great potential for bioenergy generation applications, potential which may be improved by means of a pyrolysis at 350°C.

Keywords: spent shiitake substrate; biomass, bioenergy, biochar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da demanda de energia primária no Brasil entre os anos de 1990 e 2012 25
Figura 2 - Geração de energia no Brasil através de diferentes recursos no ano de 2011 e em 2035, em um possível novo cenário político 26
Figura 3 - Composição da parede celular de biomassas vegetais com destaque para os componentes lignocelulósicos 27
Figura 4 - Representação esquemática da molécula de celulose 28
Figura 5 - Representação esquemática da molécula de hemicelulose 28
Figura 6 -Representação esquemática da molécula de lignina do gênero *Eucalyptus* 30
Figura 7 - Basidioma de *Lentinula edodes*, mais conhecido como cogumelo shiitake 32
Figura 8 - Bloco de resíduo de cultivo do shiitake (RCS) 34
Figura 9 - Componentes principais do substrato de cultivo do shiitake (SCS) 35
Figura 10 - Etapas do processo de inoculação do shiitake no substrato de cultivo em sacos de polietileno 36
Figura 11 - Resíduo de cultivo do shiitake seco em pó e biocarvões obtidos à partir dele 38
Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do substrato (SCS) e resíduo de cultivo do shiitake (RCS) secos 77
Figura 13 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de biocarvões proveniente do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake 79
Figura 14 – Espectroscopia de infravermelho (FTIR) do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) com os principais picos identificados 82
Figura 15 – Comparação entre os espectros de FTIR do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) 85
Figura 16 – Comparação entre os difratogramas da análise de DRX do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) 87
Figura 17 – Difratogramas da análise de DRX do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) com os principais componentes identificados 90
Figura 18 – Etapas de conversão do resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (seco e biocarvão) em três razões de aquecimento e atmosfera inerte 94
Figura 19 – Etapas de conversão do resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (seco e biocarvão) em três razões de aquecimento e atmosfera oxidante 97

Figura 20 – Perfis, linhas de regressão e coeficientes de relação das temperaturas de ignição e queima do resíduo de cultivo do shiitake (RCS) (seco e biocarvão) em atmosfera oxidante.. 103
Figura 21 – Curvas DTG e DTA do resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (seco e biocarvão) em três rampas de aquecimento e atmosfera oxidante 106
Figura 22 – Método de Kissinger aplicado ao processo térmico do resíduo de cultivo do shiitake (RCS) (seco e biocarvão) através dos picos das curvas DTA e DTG em atmosfera oxidante 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rendimento gravimétrico (RG) e fator de rendimento gravimétrico (FRG) dos biocarvões provenientes do susbtrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake 55

Tabela 2 - Teor de umidade (TU), voláteis (TV), cinzas (TC) e carbono fixo (TCF) do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) 58

Tabela 3 - Teor de extrativos solúveis em cicloexano/etanol ($Ext._{C/E}$), etanol ($Ext._{E}$) e água quente ($Ext._{H2O)}$ do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos) 65

Tabela 4 – Teor de lignina insolúvel (LI) e solúvel (LS) do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos) 67

Tabela 5 – Teor de holocelulose (TH), alfacelulose (TA) e hemicelulose (THe) do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos) 68

Tabela 6 – Teores de celulose, hemicelulose e lignina obtidos para diferentes tipos de resíduos de cultivo de cogumelos 69

Tabela 7 – Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) 71

Tabela 8 – Teor de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) 74

Tabela 9 – Porcentagens de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) obtidos para diferentes tipos de resíduos de cultivo de cogumelos 76

Tabela 10 – Elementos químicos identificados através da espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake secos 78

Tabela 11 – Elementos químicos identificados através da espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) de biocarvões provenientes do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake 80

Tabela 12 – Atribuição das principais bandas dos espectros de FTIR do substrato (SCS) e resíduo (RCS) de cultivo do shiitake (secos e biocarvões) na região entre 4000 a 400 cm^{-1} ... 84

Tabela 13 – Temperatura e tempo de ignição (T_i e t_i) e queima (T_b e t_b) do resíduo de cultivo do shiitake (RCS) (seco e biocarvão) em três razões de aquecimento e em atmosfera oxidante 101

Tabela 14 – Temperatura (T) e intensidade (I) do pico da curva DTG* do resíduo de cultivo do shiitake (RCS) (seco e biocarvão) em três rampas de aquecimento e em atmosfera oxidante 102

Tabela 15 – Energia de ativação aparente (E_a) e fator pré-exponencial (A) do resíduo de cultivo do shiitake (RCS) (seco e biocarvão) obtidos através dos picos das curvas DTA e DTG pelo método de Kissinger em atmosfera oxidante 108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – fator pré-exponencial

α – grau de conversão

β – razão de aquecimento

BC350 – biocarvão produzido a 350°C

BC450 – biocarvão produzido a 450°C

BC550 – biocarvão produzido a 550°C

CF – carbono fixo

DRX – difração de raios-X

DTA – análise térmica diferencial

DTG – termogravimetria derivada

E_a – energia de ativação aparente

EDS – espectroscopia de raios-X por difusão de energia

FRG – fator de rendimento gravimétrico

FTIR – espectroscopia de infravermelho com Transformada de Fourier

k – constante da taxa de reação

MV – materiais voláteis

MEV – microscopia eletrônica de varredura

m_f – massa final

m_i – massa inicial

m_α – massa atual

n – ordem de reação

PCS – Poder Calorífico Superior

PCI – Poder Calorífico Inferior

R^2 – coeficiente de relação

R – constante universal dos gases

RCC – resíduo de cultivo de cogumelo

RCS – resíduo de cultivo do shiitake

RG – rendimento gravimétrico

SCS – substrato de cultivo do shiitake

TGA – análise termogravimétrica

T_i – temperatura de ignição

T_b – temperatura de queima

T_p – temperatudo do pico

T_m – temperatura do pico máximo

t_i – tempo da ignição

t_b – tempo da queima

t_p – tempo da temperatura de pico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17

2. OBJETIVOS 18

2.1. OBJETIVO GERAL 18

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO: BREVE HISTÓRICO DA QUESTÃO AMBIENTAL NO MUNDO 19

3.2. BIOMASSA 22

3.3. BIOMASSA NO CONTEXTO BRASILEIRO 24

3.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA 26

3.5. RESÍDUO DE CULTIVO DE COGUMELO 30

3.6. SHIITAKE – *LENTINULA EDODES* 32

4. METODOLOGIA 34

4.1. SUBSTRATO E RESÍDUO DE CULTIVO DO SHIITAKE 34

4.2. PREPARO DAS AMOSTRAS DE SUBSTRATO E RESÍDUO DE CULTIVO DO SHIITAKE 36

4.3. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO E FATOR DE RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO 37

4.4. ANÁLISE IMEDIATA 39

4.4.1. Teor de Umidade 39

4.4.2. Teor de Voláteis 39

4.4.3. Teor de Cinzas 40

4.4.4. Teor de Carbono Fixo 41

4.5. TEOR DE EXTRATIVOS TOTAIS 41

4.6. TEORES LIGNOCELULÓSICOS 43

4.6.1. Teor de Lignina Total 43

4.6.2. Teor de Lignina Insolúvel 43

4.6.3. Teor de Lignina Solúvel 44

4.6.4. Teor de Holocelulose 45

4.6.5. Teor de Alfacelulose e Hemicelulose 47

4.7. PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR 48

4.8. ANÁLISE ELEMENTAR (CHN) 49

4.9. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA 49

4.10. Espectroscopia de Raios-X por Difusão de Energia 49
4.11. Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier 50
4.12. Difração de Raios-X 50
4.13. Análise Térmica 50
4.14. Temperaturas de Ignição e Queima 51
4.15. Estudo Cinético 51
4.15.1. Método de Kissinger, Energia de Ativação Aparente e Fator Pré-exponencial *53*

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 55

5.1. Rendimento Gravimétrico e Fator de Rendimento Gravimétrico 55
5.2. Análise Imediata 57
5.2.1. Teor de Umidade 57
5.2.2. Teor de Voláteis 59
5.2.3. Teor de Cinzas 60
5.2.1. Teor de Carbono Fixo 62
5.3. Teor de Extrativos Totais 64
5.4. Teores Lignocelulósicos 66
5.4.1. Teor de Lignina Insolúvel e Solúvel, Holocelulose, Alfacelulose e Hemicelulose *66*
5.5. Poder Calorífico Superior e Inferior 70
5.6. Análise Elementar 73
5.7. Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia 76
5.8. Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier 81
5.9. Difração de Raios-X 86
5.10. Análise Térmica 92
5.11. Temperaturas de Queima e Ignição 100
5.12. Estudo Cinético 104
5.12.1. Energia de Ativação Aparente e Fator Pré-Exponencial 104

6. CONCLUSÃO 111

REFERÊNCIAS 113

1. INTRODUÇÃO

Os atuais padrões de produção e consumo de energia estão baseados na utilização de combustíveis fósseis, os quais são responsáveis por gerar diversos problemas ambientais, como a poluição local e formação de gases do efeito estufa, além de colocar em risco o suprimento desse recurso não renovável. O aumento da demanda por esse recurso, devido ao crescimento populacional, e os problemas relacionados ao seu uso, chamam a atenção para a necessidade de se repensar os atuais padrões de produção e consumo de energia e buscar novas fontes alternativas, renováveis e ecologicamente corretas.

Diante desse cenário, as biomassas desempenham um papel essencial por representarem uma importante fonte potencial de bioenergia. As biomassas apresentam grandes possibilidades para pesquisa e utilização, principalmente aquelas resultantes do aproveitamento de resíduos agroindustriais. Juntamente com aporte tecnológico, as biomassas provenientes desses resíduos podem apresentar grande potencial bioenergético por área e baixos impactos ambientais.

A produção de cogumelos é um ramo da indústria alimentar que tem crescido significativamente nas últimas décadas em todo o mundo, inclusive no Brasil. Juntamente com esse crescimento, os produtores também estão enfrentando um importante problema: os resíduos orgânicos gerados a partir desse cultivo. Dentro desse contexto, a gestão de uma quantidade crescente de resíduos está se tornando um grande obstáculo enfrentado pelos produtores devido às complicações relacionadas com a sua eliminação inadequada no meio ambiente.

Reutilizar esses resíduos para geração de bioenergia apresenta-se como uma solução significativa e viável. Os benefícios do reaproveitamento desses resíduos para fins de geração de energia são muitos, e dentre eles, pode-se citar: a geração de energia de forma sustentável a partir de biomassa renovável; fazê-la por um meio que não compete com a produção de alimentos utilizados para este fim; e a diminuição da pressão sobre o meio ambiente gerada por este resíduo.

Dentro desse contexto, o presente trabalho visa caracterizar e avaliar o potencial do resíduo de cultivo do cogumelo shiitake para a produção de bioenergia, reconhecendo a relevância do tema energético e tentar apresentar uma opção tecnicamente e ambientalmente viável, ao discutir uma nova possibilidade, mais sustentável, para a reutilização dessa biomassa.

6. CONCLUSÃO

Por meio de análises físicas, químicas e térmicas, o presente trabalho objetivou a investigação do potencial bioenergético do resíduo de cultivo do shiitake (RCS) seco e mediante a sua conversão termoquímica pelo processo de pirólise. Conjuntamente, o substrato de cultivo de shiitake (SCS) foi caracterizado e comparado com o RCS a fim de se avaliar as modificações ocorridas devido à ação do fungo durante o seu desenvolvimento.

A elevada umidade presente no SCS e RCS *in natura*, devido aos procedimentos utilizados durante a produção e cultivo do fungo, mostrou-se um obstáculo importante em relação ao potencial bioenergético, já que o excesso de água pode reduzir o poder calorífico dessas amostras.

O rendimento gravimétrico foi maior para os BC350 provenientes do SCS e RCS devido ao processo de pirólise, já que o aumento da temperatura acarreta no aumento de materiais volatilizados. O maior fator de rendimento gravimétrico para esses biocarvões indicaram que a temperatura de pirólise adequada foi a de 350°C. Por meio de outras análises, foi possível confirmar a maior potencialidade bioenergética dos BC350, já que eles apresentaram as menores quantidades de cinzas e maiores quantidades de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico em relação aos outros biocarvões. Ao mesmo tempo, apresentaram maiores teores de carbono e menores teores de hidrogênio.

Por ser um fungo de podridão branca, o resultado da sua ação sobre os componentes lignocelulósicos pôde ser observado através da quantificação de holocelulose e lignina presentes do SCS e RCS secos. O processo de decomposição desses componentes pelo fungo resultou em teores de holocelulose e lignina menores para o RCS seco, assim como em um aumento no teor de extrativos.

As imagens de MEV revelaram amostras secas de SCS e RCS bem diferentes uma da outra, com características relacionadas à ação do fungo. O aumento de porosidade dos biocarvões ocorreu devido ao aumento de temperatura durante a pirólise, assim como revelou estruturas cristalinas ricas em oxigênio e silício. A análise de DRX revelou a presença de diferentes compostos e confirmou a presença de óxido de silício em todas as amostras, validando os resultados encontrados em MEV. Devido ao processo de pirólise, o grau de cristalinidade dos biocarvões foi mais elevado em relação às amostras secas. Por meio do FTIR, uma grande variedade de grupos funcionais foi identificada, refletindo a complexidade da composição química de biomassas lignocelulósicas.

A análise termogravimétrica realizada com o RCS em atmosferas oxidativa e inerte apresentou na curva DTG indicando diferentes etapas de conversão, as quais estão relacionadas com a perda de água e com a degradação/decomposição da hemicelulose, celulose e lignina. No caso do BC350, devido à sua decomposição parcial durante o processo de pirólise, a curva DTG apresentou somente um único pico em atmosfera oxidativa.

O aumento da razão de aquecimento ocasionou num aumento no teor de cinzas, assim como num deslocamento das temperaturas de ignição, queima e pico (da curva DTG) em direção à temperaturas maiores, devido ao delay do processo de conversão térmica. As temperaturas de ignição e queima foram mais elevadas para o BC350 em relação ao RCS, refletindo a influência dos teores de materiais voláteis, cinzas e PCS nesses parâmetros.

Através do método não isotérmico de Kissinger foram determinadas as energias de ativação para RCS (110,3 kJ/mol) e BC350 (136 kJ/mol) a partir dos picos de curvas DTA. Os valores obtidos a partir de curvas DTG foram mais elevados. As energias de ativação obtidas indicaram diferenças nas reatividades das amostras analisadas e, portanto, nas características químicas de cada uma delas. Os coeficientes de determinação obtidos indicaram uma forte correlação entre os dados e a apropriação do método não isotérmico e não isoconversional de Kissinger para determinação da energia de ativação aparente. Os fatores pré-exponenciais encontrados foram da ordem de 10^8, para as curvas DTA e da ordem 10^9, para curvas DTG indicando a complexidade presente no substrato e nas reações de conversão.

A partir dos resultados obtidos por meio das análises físicas, químicas e térmicas, foi possível avaliar o potencial bioenergético do RCS, alcançando, assim o objetivo traçado inicialmente. Além das vantagens de ser de origem lignocelulósica, discutidas ao longo desse trabalho, o RCS apresentou características que permitiram concluir que esse resíduo possui um grande valor para ser utilizado como um potencial recurso para a geração de bioenergia. Potencial que pode ser melhorado através do processo de pirólise a 350°C. Esse estudo permitiu concluir que o RCS não precisa ser mais visto como um simples resíduo a ser desperdiçado, mas sim, como um potencial recurso renovável para a geração de bioenergia, diminuindo assim, a pressão causada ao meio ambiente pela utilização de combustíveis não renováveis.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 24, p. 9778–9784, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3175-11: Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102-84: Standard test method for ash in wood.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ATANASSOV, A.; GENIEVA, S.; VLAEV, L. Study on the thermooxidative degradation kinetics of tetrafluoroethylene-ethylene copolymer filled with rice husks ash. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 49, n. 6, p. 541–554, 2010.

AULER, D.; BAZZO, W. A. Reflexões para a implementação do movimento CTS no contexto educacional brasileiro. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 7, n. 1, p. 1–13, 2001.

BALAN, V.; SOUSA, L. C.; CHUNDAVAT S. P. S.; VISMEH R.; JONES A. D.; DALE B. E. Mushroom spent straw: A potential substrate for an ethanol-based biorefinery. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 35, n. 5, p. 293–301, 2008.

BARBIERI, J. C. **Gestão Ambiental Empresarial: Conceitos, Modelos e Instrumentos.** 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2007.

BARBOSA, B. M.; COLODETTE, J. L.; CABRAL, C. P. T. Efeito da fertilização na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 29–39, 2014.

BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory.** Elsevier: Kindlington, 2010.

BITTENCOURT, C. N. V. **Cultivo axênico de shiitake (Lentinula edodes) em resíduos do processamento da Palmeira-Real-da-Austrália (Archontophoenix alexandrae)**. 110 p. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenal, Blumenal, SC. 2007.

BONONI, V. L. R.; CAPELARI, M.; MAZIERO R.; TRUFEM S. F. B. **Cultivo de cogumelos comestíveis**. São Paulo: Icone, p. 95-104: Cultivo de *Lentinula edodes* (*shiitake*), Coleção Brasil Agrícola, 1995

BONONI, V. L. R. **Zigomicetos, Basidiomicetos e Deuteromicetos: noções básicas de taxonomia e aplicações biotecnológicas.** São Paulo: Instituto de Botânica, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 1998.

BRIDGWATER, A V; MEIER, D.; RADLEIN, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. **Organic Geochemistry**, v. 30, p. 1479–1493, 1999.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal : I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (Ipef)**, v. 14, n. 14, p. 9–20, 1977.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: Análise química imediata da madeira e da casca. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF)**, v. 16, p. 63–70, 1978.

CALEGARI, L.; FOELKEL, C. E. B.; HASELEIN, C. R.; ANDRADE, J. L. S.; SILVEIRA, P.; SANTINI, E. J. Característicasde algumas biomassas usadas na geração de energia no Sul do Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 1, p. 37–46, 2005.

CARVALHO, C. S. M.; SALES-CAMPOS, C.; AGUIAR, L. V. B.; MINHONI, M. T. A.; ANDRADE, M. C. N. Composição mineral de substratos à base de resíduos de bananeira durante o cultivo de *Pleurotus ostreatus*. **Agricultural Microbiology**, v. 81, n. 3, p. 272–281, 2014.

CASTELLÓ, M. L.; DWECK, J.; ARANDA, D. A G. Kinetic study of thermal processing of glycerol by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 105, n. 3, p. 737–746, 2011.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CEYLAN, S.; TOPÇU, Y. Pyrolysis kinetics of hazelnut husk using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, v. 156, p. 182–188, 2014.

CHRISOSTOMO, W. Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido. 80 p. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, SP. 2011.

CONESA, J. A.; URUEÑA, A.; DÍEZ, D. Corn stover thermal decomposition in pyrolytic and oxidant atmosphere. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 106, p. 132–137, 2014.

CORDEIRO, L. G.; EL-AOUAR, Â. A.; DE ARAÚJO, C. V. B. Energetic characterization of malt bagasse by calorimetry and thermal analysis. **Journal of Thermal Analysis and**

Calorimetry, v. 112, n. 2, p. 713–717, 2013.

CORDES, H. F. Preexponential factors for solid-state thermal decomposition. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 72, n. 6, p. 2185–2189, 1968.

CUIPING, L.; CHUANGZHI, W.; YANYONGJIE; HAITAO, H. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 2, p. 119–130, 2004.

DAMARTZIS, T.; VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S.; ZABANIOTOU, A. Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA). **Bioresource Technology**, v. 102, n. 10, p. 6230–6238, 2011.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004.

DI BLASI, C. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 2, p. 121–140, 2009.

DIAS, R. **Gestão Ambiental: Responsabilidade Social e Sustentabilidade.** 1. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

DWECK, J.; ADERNE, R. S.; SHANEFIELD, D. J. Aluminum nitride oxidation by simultaneous TG and DTA. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 64, n. 3, p. 1163–1169, 2001.

FINNEY, K. N.; FYU, C.; SHARIFI, V. N.; SWITHENBANK, J. The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: Comparison of thermal treatment technologies. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 1, p. 310–315, 2009.

FURLANI, R. P. Z.; GODOY, H. T. Valor nutricional de cogumelos comestíveis. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 154–157, 2007.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data. **Fuel**, v. 117, p. 1130–1138, 2014.

GAŠPAROVIČ, L.; KOREŇOVÁ, Z.; JELEMENSKÝ, Ľ. Kinetic study of wood chips decomposition by TGA. **Chemical Papers**, v. 64, n. 2, p. 174–181, 2010.

GEORGIEVA, V.; ZVEZDOVA, D.; VLAEV, L. Non-isothermal kinetics of thermal degradation of chitosan. **Chemistry Central Journal**, v. 6, p. 81, 2012.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007.

GOMES, D.; AKAMATSU, I.; SOUZA, E.; FIGUEIREDO, G. J. B. Censo paulista de produção de cogumelos comestíveis e medicinais. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 13, n. 1, 2016.

GOMES, G. M.; VILELA, A. C. F.; ZEN, L. D.; OSÓRIO, E. Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 85–95, 2013.

GUILMO, S. M. P.; AUER, C. G.; BARRICHELO, L. E. G. Efeito de fungos termófilos sobre madeira de *Eucalyptus saligna*. III. A população fúngica. **Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo**, v. 37, p. 89–95, 1998.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Sustentabilidade Ambiental no Brasil: sustentabilidade, economia e bem-estar humano**. Brasília: Ipea, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2013**. 708 p., OECD/IEA, 2013.

ION, I. V.; POPESCU, F.; ROLEA, G. G. A biomass pyrolysis model for CFD application. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 111, n. 3, p. 1811–1815, 2013.

IQBAL, H. M. N.; KYAZZE, G.; KESHAVARZ, T. Advances in the valorization of lignocellulosic materials by biotechnology: An overview. **BioResources**, v. 8, n. 2, p. 3157–3176, 2013.

ISROI; MILLATI, R.; SYAMSIAH, S.; NIKLASSON, C.; CAHYANTO, M. N.; LUNDQUIST, K.; TAHERZADEH, M. J. Biological pretreatment of lignocelluloses with white-rot fungi and its applications: A review. **BioResources**, v. 6, n. 4, p. 5224–5259, 2011.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 1989.

JENKINS, B.; BAXTER, L. L.; MILES JR, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1-3, p. 17–46, 1998.

JIANG, G.; NOWAKOWSKI, D. J.; BRIDGWATER, A. V. A systematic study of the kinetics of lignin pyrolysis. **Thermochimica Acta**, v. 498, n. 1-2, p. 61–66, 2010.

JIANG, H.; CHENG, Z.; ZHAO, T.; LIU, M.; ZHANG, M.; LI, J.; HU, M.; ZHANG, L.; LI, J. Pyrolysis kinetics of spent lark mushroom substrate and characterization of bio-oil obtained from the substrate. **Energy Conversion and Management**, v. 88, p. 259–266, 2014.

JORDAN, S. N.; MULLEN, G. J.; MURPHY, M. C. Composition variability of spent mushroom compost in Ireland. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 2, p. 411–418, 2008.

KELLER, F.; HAMILTON, J.; NGUYEN, Q. Microbial pretreatment of biomass. **Applied biochemistry and Biotechnology**, v. 105-108, n. 3, p. 27–41, 2003.

KIM, Y. S.; KIM, Y. S.; KIM, S. H. Investigation of thermodynamic parameters in the thermal decomposition of plastic waste-waste lube oil compounds. **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 13, p. 5313–5317, 2010.

KISSINGER, H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. **Analytical Chemistry**, v. 29, n. 11, p. 1702–1706, 1957.

KOGA, N. A review of the mutual dependence of Arrhenius parameters evaluated by the thermoanalytical study of solid-state reactions: The kinetic compensation effect. **Thermochimica Acta**, v. 244, n. C, p. 1–20, 1994.

KOK, M. V.; ÖZGÜR, E. Thermal analysis and kinetics of biomass samples. **Fuel Processing Technology**, v. 106, p. 739–743, 2013.

KUMAR, M.; GUPTA, R. C.; SHARMA, T. Effects of carbonisation conditions on the yield and chemical composition of *Acacia* and *Eucalyptus* wood chars. **Biomass and Bioenergy**, v. 3, n. 6, p. 411–417, 1992.

KUMAR, P.; BARRET, D. M.; DELWICHE, M. J.; STROEVE, P. Methods for Pretreatment of lignocellulosic biomass for eficient hydrolysis and biofuel production. **Industrial and Engineering Chemistry (Analytical Edition)**, v. 48, p. 3713–3729, 2009.

KWAK, W. S.; JUNG, S. H.; KIM, Y. I. Broiler litter supplementation improves storage and feed-nutritional value of sawdust-based spent mushroom substrate. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 2947–2955, 2008.

LEE, JW.; GWAK, KS.; PARK, JY.; PARK, MJ.; CHOI, DH.; KWON, M.; CHOI, IG. Biological petreatment of softwood *Pinus densiflora* by three white rot fungi. **The Journal of Microbiology**, v. 45, n. 6, p. 485-491, 2007.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 7, p. 381–387, 2007.

LI, X. G.; LV, Y.; MA, B. G.; JIAN, S. W.; TAN, H. B. Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 20, p. 9783–9787, 2011.

LI, X.; PANG, Y.; ZHANG, R. Compositional changes of cottonseed hull substrate during *P. ostreatus* growth and the effects on the feeding value of the spent substrate. **Bioresource Technology**, v. 80, n. 2, p. 157–161, 2001.

LIÑÁN-MONTES, A.; PARRA-ARCINIEGA, S. M.; GARZA-GONZÁLEZ, M. T.; GARCÍA-REYES, R. B.; SOTO-REGALADO, E.; CERINO-CÓRDOVA, F. J. Characterization and thermal analysis of agave bagasse and malt spent grain. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, n. 1, p. 751–758, 2014.

LIU, Z.; QUEK, A.; HOEKMAN, S. K.; SRINIVASAN, M. P.; BALASUBRAMANIAN, R. Thermogravimetric investigation of hydrochar-lignite co-combustion. **Bioresource Technology**, v. 123, p. 646–652, 2012.

LIU, Z.; LI, W.; ZHANG, Y.; WANG, J.; ORNDORFF, W.; PAN, WP. Influence of biomass on coal combustion based on thermogravimetry and Fourier transform infrared spectroscopy. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 122, n. 3, p. 1289–1298, 2015.

LU, J. J.; CHEN, W. H. Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis. **Applied Energy**, v. 160, p. 49–57, 2015.

LYNAM, J. G.; REZA, M. T.; YAN, W.; VÁSQUEZ, V. R.; CORONELLA, C. J. Hydrothermal carbonization of various lignocellulosic biomass. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 5, p. 173–181, 2015.

MA, Y.; WANG, Q.; SUN, X.; WANG, X.; SU, W.; SONG, N. A Study on recycling of spent mushroom substrate to prepare chars and activated carbon. **BioResources**, v. 9, n. 3, p. 3939–3954, 2014.

MA, Y.; WANG, Q.; SUN, X.; WANG, X. A novel magnetic biochar from spent shiitake substrate: characterization and analysis of pyrolysis process. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 339–346, 2015a.

MA, Y.; WANG, Q.; WANG, X.; SUN, X.; WANG, X. A comprehensive study on activated carbon prepared from spent shiitake substrate via pyrolysis with $ZnCl_2$. **Journal of Porous Materials**, v. 22, n. 1, p. 157–169, 2015b.

MACHADO, L. M. C. P. A percepção do meio ambiente como suporte para a educação ambiental. Departamento de Geografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, *Campus* Rio Claro. In: POMPÊO, M. L. M. (Ed.). **Perpectivas na Liminologia do Brasil.** São Luís: Gráfica e Editora União, 1999. p. 198.

MAIA, A. A. D.; DE MORAIS, L. C. Kinetic parameters of red pepper waste as biomass to

solid biofuel. **Bioresource Technology**, v. 204, p. 157–163, 2016.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de Lignina e Holocelulose em amostras de Bagaço e Palha de Cana-de- Açúcar**. 158 p. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Ciências Físico-Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

MARTINS, A. F.; DINIZ, J.; STAHL, J. A.; CARDOSO, A. L. Caracterização dos produtos líquidos e do carvão da pirólise de serragem de eucalipto. **Quimica Nova**, v. 30, n. 4, p. 873–878, 2007.

MCCAHEY, S.; MCMULLAN, J. T.; WILLIAMS, B. C. Consideration of spent mushroom compost as a source of energy. **Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing**, v. 11, n. 1-2, p. 43–53, 2003.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.

MEDEIROS NETO, P. N. DE; OLIVEIRA, E. DE; PAES, J. B. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas espécies da caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 484–493, 2014.

MENG, X.; BENITO, P.; JONG, W.; BASILE, F.; VERKOOIJEN, A. H. M.; FORNASARI, G.; VACCARI, A. Steam-O_2 blown circulating fluidized-bed (CFB) biomass gasification: Characterization of different residual chars and comparison of their gasification behavior to thermogravimetric (TG)-derived pyrolysis chars. **Energy and Fuels**, v. 26, n. 1, p. 722–739, 2012.

MIURA, A. K.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANJOS, S. D.; LUIZ, A. J. B. Avaliação de áreas potenciais ao cultivo de biomassa para produção de energia e uma contribuição de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 607–620, 2011.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy and Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.

MORAIS, J. P. S.; ROSA, M. DE F.; MARCONCINI, J. M. Procedimentos para análise lignocelulósica. **Documentos 236: Embrapa Algodão**, p. 54, 2010.

MORAIS, M. H.; RAMOS, A. C.; MATOS, N.; OLIVEIRA, E. J. S. Production of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) on lignocellulosic residues. **Food Science & Technology International**, v. 6, n. 2, p. 123–128, 2000.

MUNIR, S.; DAOOD, S. S.; NIMMO, W.; CUNLIFFE, A. M.; GIBBS, B. M. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 3, p. 1413–1418, 2009.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A.; TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 37, n. 5, p. 611–630, 2011.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. **Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos**. In: Produção e utilização de carvão vegetal. Compilado por Waldir Resende Penedo. Belo Horizonte, MG: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, 1982. p. 393.

OLIVEIRA, J. T. D. S.; SOUZA, L. C.; LUCIA, R. M. D.; SOUZA JUNIOR, W. P. Influências dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 819–826, 2005.

PATIL, S. S.; AHMED, S. A.; TELANG, S. M.; BAIG, M. M. V. The nutritional value of *Pleurotus ostreatus* (Jacq.:Fr) Kumm cultivated on different lignocellulosic agrowastes. **Innovative Romanian Food Biotechnology**, v. 7, p. 66–76, 2010.

PECCATIELLO, A. F. O. Políticas públicas ambientais no Brasil : da administração dos recursos naturais (1930) à criação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (2000). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 24, p. 71–82, 2011.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. **Documentos, 38: Embrapa Florestas**, p. 113, 2000.

PHAN, C. W.; SABARATNAM, V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 96, n. 4, p. 863–873, 2012.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa & Bioenergia**, v. 2, n. 2, p. 113–123, 2005.

PROTÁSIO, T. D. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113–122, 2011a.

PROTÁSIO, T. D. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp aos 42

meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, p. 137–149, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 273–283, 2011b.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 317–326, 2012.

QIAO, J. J.; ZHANG, YF.; SUN, LF.; LIU, WW.; ZHU, HJ.; ZHANG, Z. Production of spent mushroom substrate hydrolysates useful for cultivation of *Lactococcus lactis* by dilute sulfuric acid, cellulase and xylanase treatment. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 8046–8051, 2011.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277–290, 2012.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; ICHIHARA, J. A. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida - Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

ROSSI, I. H.; MONTEIRO, A. C.; MACHADO, J. O. Desenvolvimento micelial de *Lentinula edodes* como efeito da profundidade e suplementação do substrato. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 887–891, 2001.

RÓZ, A. L.; RICARDO, J. F. C.; NAKASHIMA, G. T.; SANTOS, L. R. O.; YAMAJI, F. M. Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 810–814, 2015.

SALES-CAMPOS, C.; EIRA, A. F.; MINHONI, M. T. A.; ANDRADE, M. C. N. Mineral composition of raw material, substrate and fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus* in culture. **Interciencia**, v. 34, p. 432–436, 2009.

SALIBA, E. D. O. S.; RODRIGUEZ, N. M.; MORAIS, S. A. L.; PILÓ-VELOSO, D. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, v. 31, n. 5, p. 917–928, 2001.

SANTOS, C. M.; DWECK, J.; VIOTTO, R. S.; ROSA, A. H.; MORAIS, L. C. Application of orange peel waste in the production of solid biofuels and biosorbents. **Bioresource Technology**, v. 196, p. 469–479, 2015.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Quimica nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221–230, 2011.

SCHÜTZ, F. C. A.; ANAMI, M. H.; TRAVESSINI, R. Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos lignocelulósicos da agroindustria. **Inovação e Tecnologia**, v. 01, n. 1, p. 3–8, 2010.

SEBIO-PUÑAL, T.; NAYA, S.; LOPÉZ-BECERIO, J.; TARRÍO-SAAVEDRA, J.; ARTIAGA, R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 109, n. 3, p. 1163–1167, 2012.

SENELWA, K.; SIMS, R. E. H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, n. 2, p. 127–140, 1999.

SHI, X. S.; YUAN, XZ.; WANG, YP.; ZENG, SJ.; QIU, YL.; GUO, RB.; WANG, LS. Modeling of the methane production and pH value during the anaerobic co-digestion of dairy manure and spent mushroom substrate. **Chemical Engineering Journal**, v. 244, n. 1, p. 258–263, 2014.

SHUPING, Z.; YULONG, W.; MINGDE, Y.; CHUN, L.; JUNMAO, T. Pyrolysis characteristics and kinetics of the marine microalgae *Dunaliella tertiolecta* using thermogravimetric analyzer. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 1, p. 359–365, 2010.

SILVA, L. F.; PAES, J. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; FURTADO, E. L.; ALVES, F. R. Deterioração da madeira de *Eucalyptus* spp. por fungos xilófagos. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 393–400, 2014.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; GOMIDE, J. L.; REIS. F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinaçao do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 1009–1016, 2006.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X. Spectrometric identification of organic compounds. 6 ed. New York: John Wiley, 1998. 482 p.

SINGH, A. D.; VIKINESWARY, S.; ABDULLAH, N.;SEKARAN, M. Enzymes from spent mushroom substrate of *Pleurotus sajor-caju* for the decolourisation and detoxification of

textile dyes. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 27, n. 3, p. 535–545, 2011.

SLOPIECKA, K.; BARTOCCI, P.; FANTOZZI, F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. **Applied Energy**, v. 97, p. 491–497, 2012.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543–549, 2014.

SRINIVASAN, P.; SARMAH, A. K.; SMERNIK, R.; DAS, O.; FARID. M.; GAO, W. A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: Production, characterization and potential applications. **Science of the Total Environment**, v. 512-513, p. 495–505, 2015.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus vimanalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 16, p. 55–59, 1988.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TALEBNIA, F.; KARAKASHEV, D.; ANGELIDAKI, I. Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 13, p. 4744–4753, 2010.

TANIGUCHI, M.; SUZUKI, H.; WATANABE, D.; SAKAI, K.; HOSHINO, K.; TANAKA, T. Evaluation of pretreatment with *Pleurotus ostreatus* for enzymatic hydrolysis of rice straw. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 100, n. 6, p. 637–643, 2005.

TAPPI. **T 204 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp**, 4 p., 1997.

TAPPI. **T 207 cm-99: Water solubility of wood and pulp.**, 3 p., 1999.

TAPPI. **T 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp**, 5 p., 2002.

TELMO, C.; LOUSADA, J.; MOREIRA, N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 11, p. 3808–3815, 2010.

TIAN, X.; FANG, Z.; GUO, F. Impact and prospective of fungal pre-treatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 6, p. 335–350, 2012.

TURMANOVA, S. C.; GENIEVA, S. D.; DIMITROVA, A. S.; VLAEV, L. T. Non-isothermal degradation kinetics of filled with rise husk ash polypropene composites. **Express Polymer Letters**, v. 2, n. 2, p. 133–146, 2008.

VALDEZ, O. D.; FLORES, E. O. G.; GARCÍA, J. A. M.; CHAVIRA, J. S.; RUBIO, R. R.; ORTIZ, J. J. G. P. Use of *Pleurotus pulmonarius* to change the nutritional quality of wheat straw. **Interciencia**, v. 3, n. 6, p. 435–438, 2008.

VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S. Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. **Thermochimica Acta**, v. 526, n. 1-2, p. 192–199, 2011.

VAMVUKA, D.; TSAMOURGELI, V.; GALETAKIS, M. Study on catalytic combustion of biomass mixtures with poor coals. **Combustion Science and Technology**, v. 186, n. February 2015, p. 37–41, 2014.

VAROL, M.; ATIMTAY, A. T.; BAY, B.; OLGUN, H. Investigation of co-combustion characteristics of low quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis. **Thermochimica Acta**, v. 510, n. 1-2, p. 195–201, 2010.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010.

VIEIRA, G. E. G.; PEDROZA, M. M.; SOUSA, J. F.; PEDROZA, C. M. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 12, p. 01–06, 2011.

VILLANUEVA, M.; PROUPÍN, J.; RODRÍGUEZ-AÑÓN, J. A.; FRAGA-GRUEIRO, L.; SALGADO, J.; BARROS, N. Energetic characterization of forest biomass by calorimetry and thermal analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 104, n. 1, p. 61–67, 2011.

WILLIAMS, B. C.; MCMULLAN, J. T.; MCCAHEY, S. An initial assessment of spent mushroom compost as a potential energy feedstock. **Bioresource Technology**, v. 79, n. 3, p. 227–230, 2001.

WU, S.; LAN, Y.; WU, Z.; PENG, Y.; CHEN, S.; HUANG, Z.; XU, L.; GELBIC, I.; GUAN, X.; ZHANG, L.; ZOU, S. Pretreatment of spent mushroom substrate for enhancing the conversion of fermentable sugar. **Bioresource Technology**, v. 148, p. 596–600, 2013.

XIAO-JING, H.; HAI-DONG, G.; TING-TING, Z.; YU, J.; JUAN-JUAN, Q. Biosorption mechanism of Cu^{2+} by innovative immobilized spent substrate of fragrant mushroom biomass. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 509–513, 2014.

XU, Y.; CHEN, B. Investigation of thermodynamic parameters in the pyrolysis conversion of biomass and manure to biochars using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 485–493, 2013.

YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 5, p. 651–671, 2004.

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

YIN, C.Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, v. 90, n. 3, p. 1128–1132, 2011.

YIN, R.; LIU, R.; MEI, Y.; FEI, W.; SUN, X. Characterization of bio-oil and bio-char obtained from sweet sorghum bagasse fast pyrolysis with fractional condensers. **Fuel**, v. 112, p. 96–104, 2013.

YORULMAZ, S. Y.; ATIMTAY, A. Investigation of combustion kinetics of five waste wood samples with thermogravimetric analysis. **Environmental Earth Sciences**, v. 90, n. 7-8, p. 511–520, 2009.

ZENG, J.; SINGH, D.; CHEN, S. Biological pretreatment of wheat straw by *Phanerochaete chrysosporium* supplemented with inorganic salts. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 3206-3214, 2011.

ZHANG, X.; NGUYEN, D.; PAICE, M. G.; TSANG, A.; RENAUD, S. Degradation of wood extractives in thermo-mechanical pulp by soybean lipoxygenase. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 40, n. 4, p. 866–873, 2007.

ZHENG, A.; JIANG, L.; ZHAO, Z.; HUANG, Z.; ZHAO, K.; WEI, G.; WANG, X.; HE, F.; LI, H. Impact of torrefaction on the chemical structure and catalytic fast pyrolysis behavior of hemicellulose, lignin, and cellulose. **Energy and Fuels**, v. 29, n. 12, p. 8027–8034, 2015.

ZHENG, W.; GUO, M.; CHOW, T.; BENNETT, D. N.; RAJAGOPALAN, N. Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1-3, p. 121–126, 2010.