UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

LUIS FILIPE CABRAL CEZARIO

INTEGRANDO A DISPONIBILIDADE HÍDRICA E A TORREFAÇÃO PARA A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA DO PINHÃO MANSO (*Jatropha curcas* L.)

ESPÍRITO SANTO JERÔNIMO MONTEIRO 2019

LUIS FILIPE CABRAL CEZARIO

INTEGRANDO A DISPONIBILIDADE HÍDRICA E A TORREFAÇÃO PARA A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA DO PINHÃO MANSO (*Jatropha curcas* L.)

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

ESPÍRITO SANTO JERÔNIMO MONTEIRO 2019

LUIS FILIPE CABRAL CEZARIO

INTEGRANDO A DISPONIBILIDADE HÍDRICA E A TORREFAÇÃO PARA A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA DO PINHÃO MANSO (Jatropha curcas L.)

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovado em 22 de NOVEMBEO de 2019

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador

Prof. Dr. Michel Picanço Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
Conselheiro

Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto Universidade Federal do Espírito Santo Avaliador

Eng. Florestal Álison Moreira da Silva Universidade Federal do Espírito Santo Avaliador

In memoriam de Zélia Tizoco Cabral.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me possibilitar alcançar todas as minhas metas e objetivos, me proporcionando sabedoria em minhas escolhas.

Aos meus pais Márcio e Zely e aos meus tios Jovane e Marly que considero como meus segundos pais, por todo amor, carinho e apoio que me proporcionaram ao longo de toda a jornada da graduação.

A toda à minha família que sempre me apoia, me aconselha e torce sempre pelo meu sucesso.

A todos os meus amigos da graduação, principalmente aos meus amigos da turma de 2015/1, que me proporcionaram momentos de alegria, felicidade, risadas, festas, viagens e companheirismo. Os momentos vividos nesta etapa serão inesquecíveis em minha vida.

À minha companheira de graduação e namorada Cássia Santos, por todos os momentos que passamos juntos ao longo desses cincos anos tanto na vida pessoal quanto na vida acadêmica.

Ao meu orientador professor Ananias Francisco Dias Júnior, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado e fazer parte de um grupo de pesquisa sensacional que é o BioEP; pelos conselhos profissionais e pessoais, amizade e pela confiança em mim depositada.

Ao grupo de pesquisa Bioenergia e Bioprodutos de Base Florestal (BioEP) pelo acolhimento e o prazer de fazer parte deste grupo. E ao meu parceiro de laboratório Álison Moreira por toda a ajuda nas análises e, principalmente, nos momentos de dificuldade.

Ao Otávio Neto da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" pela ajuda na condução do experimento e pela coleta e envio dos materiais.

Ao professor Gilson Fernandes e Jeferson Martins ambos do laboratório de manejo florestal pela ajuda crucial na parte estatística com a análise dos dados.

A todos os meus professores e professoras de graduação, pois cada um contribuiu de alguma forma para minha formação e sem os seus ensinamentos eu não estaria neste momento. São para mim a base de todo o meu conhecimento adquirido na vida acadêmica.

A todos que de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente, para a minha formação.

Muito obrigado!

RESUMO

O uso da biomassa como fonte alternativa de energia se intensificou nos últimos anos e tem ganhado espaço na substituição de combustíveis fósseis e seus derivados. A espécie Jatropha curcas L. é utilizada como matéria-prima para a produção do biodiesel, gerando enorme quantidade de resíduos. A heterogeneidade das características desses materiais impõe a necessidade de pré-tratamentos térmicos para sua valorização, como o processo térmico de torrefação. Este estudo teve como objetivo investigar a biomassa de Jatropha curcas L. frente a disponibilidade hídrica e sua resposta ao processo de torrefação. Foram analisadas as características físicas, química e energéticas da biomassa. O perfil frente a termodegradação foi analisado (TGA/DTG) e a estrutura química aromática determinada por espectroscopia de infravermelho (FTIR). A biomassa apresentou comportamentos diferentes em relação ao tipo de regime hídrico, como umidade, densidade a granel e teores de lignina e extrativos. A torrefação contribuiu para o incremento das características físico-químicas da biomassa valorizando-as para o uso energético como diminuição do teor de materiais voláteis, aumento dos teores de lignina e carbono fixo e aumento do poder calorífico útil. O uso desta fonte renovável para fins energéticos contribui para a diminuição de impactos ambientais devido a redução do descarte desses resíduos no ambiente, proporcionando um destino sustentável e mais eficiente.

Palavras-chave: Biomassa e bioenergia; Espécie oleaginosa; Pré-tratamentos térmicos da biomassa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivo específicos	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	
2.1. Cultura Jatropha curcas L.	4
2.2. A biomassa de Jatropha curcas L. para fins energéticos	5
2.3. Ação do calor na biomassa pelo processo de torrefação	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Área experimental e obtenção da biomassa de Jatropha curcas L	11
3.2 Processo térmico de torrefação da biomassa de Jatropha curcas L	11
3.3 Avaliações da biomassa <i>in natura</i> e torrefada	12
3.4 Análise de dados	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4.1 Propriedades físicas e químicas da biomassa de Jatropha curcas L	16
4.2 Energia calorífica da biomassa de Jatropha curcas L	24
4.3 Análise termogravimétrica diferencial da biomassa de Jatropha curcas L	26
4.4 Espectroscopia de infravermelho médio com transformada de Fo	
5. CONCLUSÃO	33
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de fontes de biomassa utilizadas no Brasil e seus potenciais
energéticos6
Tabela 2 – Teor de lignina da biomassa <i>in natura</i> e torrefada de <i>Jatropha curcas</i>
sobre diferentes regimes hídricos com base no material original19
Tabela 3 - Teor de holocelulose da biomassa in natura e torrefada de Jatropha
curcas, sobre diferentes regimes hídricos com base no material original.
20
Tabela 4 - Teor de extrativos da biomassa in natura e torrefada de Jatropha curcas
sobre diferentes regimes hídricos com base no material original21
Tabela 5 – Energia calorífica da biomassa in natura e torrefada de Jatropha curcas
sobre diferentes regimes hídricos24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do forno tipo mufla (vista frontal e diagonal). A: forno mufla; B:
reator metálico12
Figura 2 - Resultados da umidade da biomassa de Jatropha curcas in natura e
torrefada, sobre diferentes regimes hídricos16
Figura 3 - Densidade a granel da biomassa in natura e torrefada de Jatropha curcas
em diferentes regimes hídricos17
Figura 4 - Imagens do epicarpo (A) e torta (B) in natura de Jatropha curcas. Vista
em Microscopia Confocal da superfície do epicarpo e torta in natura, (C e
D), respectivamente, e da superfície do epicarpo e torta torrefados, (E e
F), respectivamente19
Figura 5 - Análise imediata para a biomassa in natura de Jatropha curcas, sobre
diferentes regimes hídricos22
Figura 6 - Análise imediata para a biomassa torrefada de Jatropha curcas, sobre
diferentes regimes hídricos22
Figura 7 - Estoque energético da biomassa in natura e torrefada de Jatropha curcas
sobre diferentes regimes hídricos25
Figura 8 - Análise termogravimétrica e DTG do epicarpo in natura e torrefado de
Jatropha curcas, sobre diferentes regimes hídricos27
Figura 9 - Análise termogravimétrica e DTG da torta in natura e torrefada de
Jatropha curcas, sobre diferentes regimes hídricos29
Figura 10 - Espectros de FTIR do epicarpo de Jatropha curcas, em que (EIT 280)
epicarpo irrigado torrefado; (EIN) epicarpo irrigado in natura; (EST 280)
epicarpo não irrigado torrefado; e (ESN) epicarpo não irrigado in natura.30
Figura 11 - Espectros de FTIR da torta de Jatropha curcas, em que (TIT 280) torta
irrigada torrefada; (TIN) torta irrigada in natura; (TST 280) torta não
irrigada torrefada; e (TSN) torta não irrigada in natura31

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas de energia se intensificou devido ao uso de combustíveis renováveis e sua notável eficiência energética, que juntamente a proteção ambiental, se tornaram questões sérias nos últimos anos (POUSA et al., 2007; KUMAR et al., 2012). Com isso a utilização da biomassa vem ganhando espaço na substituição de combustíveis fósseis e seus derivados, sendo essencial a sua caracterização para utilização de forma eficiente, em função da sua diversidade de uso.

Um diagnóstico realizado pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos quantificou e realizou uma estimativa das possibilidades energéticas por meio do reaproveitamento da biomassa. Os resíduos orgânicos analisados eram de origem de atividades agrossilvopastoris e agroindustriais primárias. Segundo Hendges (2012) e Dai (2018), os resíduos agrícolas são habitualmente utilizados em grande parte para a alimentação animal e/ou humana, fertilizantes orgânicos, condicionador de solos e outros usos nas propriedades rurais, o que reduz consideravelmente o potencial energético desses resíduos, além de portarem inviabilidades técnicas no seu aproveitamento como descentralização, equipamentos e transportes. Os resíduos oriundos da biomassa em determinadas regiões podem expandir a participação na matriz energética brasileira, reforçando a necessidade de caracterização e indicações de usos eficientes. Na União Europeia, por exemplo, a produção energética a partir de fontes renováveis de energia passou de 8,5% em 2004 para 17,5% em 2017, através de planos de ação nacionais (EUROSTAT, 2019).

A maior disponibilidade de áreas para o cultivo de plantas oleaginosas torna a situação do Brasil confortável devido ao potencial de produção de matéria-prima para biodiesel em relação à maioria dos países (SAUREZ et al., 2009; EMBAYE et al., 2018). No Brasil, as principais matérias-primas para a produção de biodiesel se encontram entre as mais de 200 espécies de oleaginosas, como a soja (*Glycine max*), mamona (*Ricinus communis*), pinhão manso (*Jatropha curcas*), entre outras (SATURNINO et al., 2005; ARAÚJO; SOUSA, 2008; CAVALCANTE FILHO et al., 2019). *Jatropha curcas* L. é uma dessas espécies utilizadas como matéria-prima para a produção do biodiesel, devido ao elevado teor de óleo em suas sementes,

que variam de 32 a 50% conforme o processo de extração, e de outras características desejáveis como altos rendimentos em grãos, óleo de boa qualidade e adaptabilidade a diferentes regiões (ACHTEN et al., 2010; SANTOS et al., 2017a). A qualidade do óleo de *J. curcas* atende padrões internacionais, ocupando um lugar especial entre as espécies com capacidade para produção de biocombustíveis, culminando em maiores investimentos governamentais e na criação de projetos comunitários ao longo do mundo, como o "Jatropha system", que resultou em grandes inciativas de implantação da espécie nos trópicos semiáridos (AZAM et al., 2005; GEXSI, 2008; ACHTEN et al., 2010). As suas características de adaptação têm gerado colocações contraditórias com relação a dependência ou não de irrigação, evidenciando a necessidade de estudos nas diversas regiões do globo, com objetivo de avaliar a resposta da planta sob diferentes manejos de irrigação e a influência dessa disponibilidade hídrica sobre as propriedades físico-químicas dos seus constituintes. Estudos realizados na América Central demonstraram que a espécie se desenvolveu melhor em climas de savana tropical e demandou de uma taxa mínima de precipitação de 944 mm ano⁻¹ (MAES et al., 2009; ACHTEN et al., 2010).

No processo de produção do biodiesel a partir de *J. curcas*, com a retirada das sementes, uma grande quantidade de resíduos é gerada, principalmente o epicarpo (cascas) e a torta (produto gerado a partir da prensagem das sementes de *J. curcas* para extração do óleo bruto). Esta espécie com múltiplos usos, pode possibilitar a utilização dos resíduos da extração do óleo para a geração de energia térmica por meio da combustão. Entretanto, seus atributos físico-químicos e energéticos, obriga a esses materiais a necessidade de homogeneização para a sua valorização energética, através de tratamentos rápidos, eficientes e de baixo custo. O processo térmico de torrefação é um exemplo de tratamento, que altera as propriedades tecnológicas da biomassa e valoriza energeticamente os resíduos do processamento de *J. curcas*. Esse "novo" produto conhecido como biomassa "torrificada, torrada ou torrefada" obtido em temperaturas entre 200 a 300°C, apresenta diversas vantagens em relação a biomassa *in natura* como maior teor de lignina e carbono fixo, menor umidade e teor de materiais voláteis (ALMEIDA et al., 2010; ANDRADE et al., 2017; SILVA et al., 2018; NIU et al., 2019).

É neste cenário que surgem questionamentos acerca da disponibilidade hídrica alterar a composição físico-química de *J. curcas* por meio dos materiais residuais do

processamento da planta (epicarpo e torta) e se a aplicação do tratamento térmico de torrefação poderá incrementar as propriedades energéticas no sentido a valorização dessa biomassa.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Investigar a biomassa residual do beneficiamento de *Jatropha curcas* L., epicarpo e torta, cultivado em dois sistemas de disponibilidade hídrica e suas respostas ao processo térmico de torrefação.

1.1.2 Objetivo específicos

- Analisar a influência da irrigação sobre as propriedades físico-químicas e energéticas da biomassa de *J. curcas*;
- Analisar o efeito do processo térmico de torrefação sobre a biomassa de *J. curcas*;
- Verificar qual dos materiais da biomassa estudados (epicarpo ou torta) de *J. curcas* apresentam incrementos energéticos frente a disponibilidade hídrica e ao processo de torrefação.

.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura Jatropha curcas L.

Jatropha curcas L. é uma espécie oleaginosa pertencente à família Euphorbiaceae, popularmente conhecida no Brasil como pinhão manso. *J. curcas*, pode ou não ser uma espécie nativa do Brasil, pois seu centro de origem é desconhecido, porém, devido a crença de que sua disseminação tenha sido realizada por navegadores portugueses, acredita-se que a América do Sul e América Central sejam seus centros de origem (KUMAR et al., 2016; VIRGENS et al., 2017).

Amplamente cultivada no México, Nicarágua, Tailândia e em partes da Índia, o cultivo de *J. curcas* é incentivado por diversas organizações mundiais como o Banco Mundial, o Instituto Internacional de Pesquisa em Genética Vegetal, Fundação Rockefeller e Organizações de Assistência Técnica da Áustria, Holanda e Alemanha, devido ser uma espécie com óleo potencial para substituir o diesel. O plantio comercial de *J. curcas* no Brasil tem sido promovido por ser uma espécie que possui alto potencial de exploração. No ano de 2008 o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa nº 4, de 14 de janeiro de 2008, autorizou a inscrição, no Registro Nacional de Cultivares, da espécie *Jatropha curcas* L., para sua exploração comercial. Podendo ser utilizada em indústrias farmacêuticas, alimentação animal, recuperação de áreas degradadas e principalmente, para a produção de energia limpa através da produção de biocombustível, devido ao elevado teor de óleo em suas sementes (OPENSHAW, 2000; ROSCOE, 2008; TORAL et al., 2008; GARRONE et al., 2016; VIÇOSI et al., 2018).

A distribuição geográfica da espécie é vasta, sendo adaptável a diversas condições edafoclimáticas. Porém, se destaca nas regiões áridas e semiáridas, devido à sua rusticidade e resistência a longos períodos de estiagem. Em cultivos comerciais de *J. curcas* na África, por exemplo, diversos agricultores abandonaram as plantações não pela falta de água, mas sim devido a diversidade de produção de sementes e pelo mal gerenciamento das plantações (POHL, 2010; SINGH et al., 2013; LAMA et al., 2014). Sua adaptabilidade também é observada em vários tipos de solos, incluindo solos pobres em nutrientes (TORAL et al., 2008; SATO et al.,

2009; VIRGENS et al., 2017). Em relação ao requerimento de água da espécie, as informações, todavia, são divergentes, em que condições irrigadas, a planta pode receber 1500 mm ano⁻¹, e sem irrigação, apresenta boa resposta a uma precipitação de 1200 mm ano⁻¹ combinado com elevadas temperaturas e capacidade de sobreviver com apenas 200 mm ano⁻¹ (KHEIRA; ATTA, 2009; OPENSHAW, 2000; ACHTEN et al., 2010).

De acordo com Rashid et al. (2010), em termos de disponibilidade, custo e facilidade de cultivo, como uma das espécies de oleaginosas não comestíveis, *J. curcas* pode ser considerada umas das mais adequadas para produção de biocombustíveis. A produção mínima de óleo da espécie varia em torno de duas toneladas por hectare, ocorrendo um aumento da produtividade até os cinco primeiros anos de plantio, o que pode se estender por trinta anos. Entretanto, sua produção pode variar devido alguns fatores como o método de cultivo, o sistema de irrigação, a fertilidade do solo e a região de implantação do plantio (ARRUDA et al., 2004; DRANSKI et al., 2010).

2.2. A biomassa de Jatropha curcas L. para fins energéticos

Classificada como uma fonte de energia limpa e renovável e, caracterizada como toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal, com potencial para uso energético, a biomassa é responsável pela maior energia renovável do mundo (PARIKKA, 2004; XU et al., 2018; NIU et al., 2019), e sua contribuição energética pode variar com o desenvolvimento de cada país. Em países desenvolvidos, como Suécia e Letônia, a biomassa na forma de madeira e biocombustíveis sólidos representam 42% da fonte de energia total. Em contra partida, em países subdesenvolvidos, com baixa renda per capita, baixo IDH e pouco industrializados, a biomassa contribui com mais de 90% das fontes de energia (GENOVESE et al., 2006; EUROSTAT, 2019). A estratégia de se utilizar a biomassa como suprimento de energia renovável ganhou força após o Acordo de Paris (COP-21), ocorrido em 2015 (BAUER; MENRAD, 2019), onde os países se comprometeram, entre inúmeras metas estipuladas, com a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, principalmente, o dióxido de carbono, liberado com a queima dos combustíveis fósseis (ONU, 2015; MORGAN et al., 2019).

A liberação de gases que provocam o efeito estufa, como monóxido e dióxido de carbono, devido à combustão da biomassa é menor e considerada sustentável se comparada a dos combustíveis fósseis, pois o carbono liberado durante o processo de combustão da biomassa seria o mesmo carbono incorporado às plantas durando o processo de fotossíntese (MACHADO; PIMENTEL, 2019). No Brasil, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019), 566 usinas de produção de energia operam utilizando biomassa como fonte de geração de energia, as quais totalizam 14.926.722 kW de potência registrada, representando 8,77% do total de potência prevista dentre todas as fontes utilizadas na matriz energética nacional. A Tabela 1 apresenta os tipos de biomassa que são utilizadas nas 566 usinas operantes do país.

Tabela 1 - Tipos de fontes de biomassa utilizadas no Brasil e seus potenciais energéticos.

Fonte Nível 1	Quant.	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	(%)
Floresta	102	3.188.568	3.180.653	21,36
Resíduos sólidos urbanos	25	178.355	172.423	1,19
Resíduos animais	14	4.481	4.481	0,03
Biocombustíveis líquidos	3	4.670	4.670	0,03
Agroindustriais	422	11.550.648	11.493.806	77,38
Total	566	14.926.722	14.856.033	100,00

Fonte: (ANEEL, 2019).

A fonte de biomassa que apresenta o maior número de usinas e o maior potencial energético, de acordo com a Tabela 1, é a fonte de origem agroindustrial, devido ao fato de que grande parte dos resíduos e subprodutos das produções, são oriundos de culturas como arroz (*Oryza* spp.), cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) e capim elefante (*Pennisetum purpureum*) (ANEEL, 2019). Dessa forma, o uso da biomassa se destaca como uma alternativa viável na substituição dos combustíveis fósseis e de seus derivados, sendo a sua caracterização fundamental para a sua utilização de forma eficiente, resultando em expectativas confiáveis em função das características da matéria-prima diante das diversas formas de obtenção. As características dos resíduos como opção para a geração de energia limpa e renovável, na maioria das vezes, são medidas por meio das variáveis:

granulometria, umidade, disponibilidade, existência de extrativos, contaminantes minerais, densidade, taxa de combustibilidade e poder calorífico. Medidas estas que influenciam na geração e na quantidade de energia produzida (KROOK et al., 2006; BOASIAKO & ACHEAMPONG, 2016; DIAS JÚNIOR et al., 2017). Os óleos vegetais são matérias-primas promissoras para a produção de biocombustíveis devido a características inerentes que são benéficas ao ambiente, como a biodegradabilidade e renovabilidade, além de possuírem maior poder calorífico e menor teor de enxofre. J. curcas faz parte das espécies produtoras de óleo não comestível que são consideradas adequadas para a produção de biodiesel (SHUIT et al., 2009; KUMAR; DAS, 2018). A competição da produção de biodiesel a partir espécies produtoras de óleo comestíveis com a indústria de alimentos, em países que não possuem excesso de produção, contribui para a exploração de *J. curcas* (SHUIT et al., 2009; KOH; GHAZI, 2011). Segundo estudos de Jain e Sharma (2010) e Gonzáles (2016), o óleo de *J. curas* L. foi considerado entre as espécies produtoras de óleo não comestível, a mais adequada para a produção de biodiesel, proporcionando maior rendimento e produtividade.

O óleo das sementes de *J. curcas* possui características valiosas, como baixa acidez, boa estabilidade, em comparação ao óleo de soja (*Glycine max*), baixa viscosidade, se comparado ao óleo da mamona (*Ricinus communis*), e melhores propriedades, em relação ao azeite de dendê (*Elaeis guineenses*). Além de obter maior número de cetano (hidrocarboneto utilizado como padrão na avaliação das propriedades ignitoras do diesel) se comparado ao diesel, o que o torna um excelente combustível alternativo, sem a necessidade de modificações no motor a combustão (TAPANES et al., 2008; DIVAKARA et al., 2010; JAIN; SHARMA, 2010; GONZÁLES, 2016).

Durante o processo de extração do óleo de *J. curcas* para a produção de biodiesel, é gerada uma grande quantidade de resíduos, produção de epicarpo (cascas), que pode ser considerado o primeiro resíduo do processo e, na sequência, com a prensagem da semente para a extração do óleo bruto, há a produção da torta. A reutilização desses resíduos para fins energéticos é uma alternativa para a diminuição dos custos de produção do biocombustível. Para isso é necessário caracterizar de forma energética essa biomassa residual e determinar suas propriedades físicas e químicas como umidade, densidade, massa específica, poder

calorífico, teores de voláteis e cinzas, e teor de carbono fixo (VALE et al., 2011; VIEIRA, 2012; SANTOS et al., 2017b; NIU et al., 2019).

De acordo com Nogueira (2007), Medic et al. (2012) e Niu et al. (2019), a densidade é a principal característica da biomassa que define a sua logística de transporte e o seu armazenamento. Baixos valores de densidade podem implicar em maiores custos de transporte e dificuldades no manuseio do resíduo caso não seja compactado. Vale et al. (2011) observou a densidade a granel do epicarpo do pinhão manso de 100,6 kg m⁻³, considerada um resíduo leve se comparado com a madeira de Pinus elliottii (488 kg m⁻³), casca do café (167 kg m⁻³) e com resíduos de madeira (115 kg m⁻³) (VALE et al., 2007; TOMELERI et al., 2017). Por outro lado, a densidade a granel observada na torta de pinhão manso foi de 601 kg m⁻³ devido a sua menor granulometria em função do processo de prensagem da amêndoa para a extração do óleo. O mesmo autor encontrou valores elevados de umidade, teor de materiais voláteis e teor de cinzas, e baixo teor de carbono fixo e de poder calorífico para o epicarpo e torta de pinhão manso in natura. A heterogeneidade, umidade elevada e baixa densidade energética são características indesejáveis para o uso energético. Incrementar esses atributos é o desafio das pesquisas por meio de tratamentos específicos, como o processo térmico de torrefação, o qual melhora as características energéticas da matéria-prima, tornando-a mais competitiva entre uma matriz energética primária (MEDIC et al., 2012; SILVA et al., 2018).

2.3. Ação do calor na biomassa pelo processo de torrefação

Alguns tipos de biomassa não possuem características promissoras para serem utilizadas para fins energéticos, porém com a aplicação de tratamentos térmicos, é possível que haja uma uniformização das características físico-químicas desses resíduos e que culminem com a sua valorização energética. O processo de torrefação é um desses tratamentos térmicos que alteram as propriedades da biomassa e que permitem sua homogeneização, gerando um produto intermediário entre a biomassa *in natura* e a biomassa carbonizada (PIERRE et al., 2011; GRASSMANN et al., 2016; ANDRADE et al., 2017). A torrefação é um tratamento térmico desenvolvido na fase endotérmica da pirólise, entre 200 a 300°C, em

atmosfera inerte e com baixas taxas de aquecimento (ALMEIDA et al., 2010; NEVES et al., 2011; MAMVURA et al., 2017; SILVA et al., 2018).

O subproduto da torrefação é muito utilizado em processos de gaseificação, além de voláteis que podem servir de matéria-prima para produtos químicos (TUMULURU et al., 2011; MAMVURA et al., 2017). Já o produto da torrefação apresenta diversas vantagens se comparado ao material original, como o aumento da resistência à degradação, altos rendimentos energéticos, menor umidade e menor conteúdo de materiais voláteis, entretanto, o seu rendimento são influenciados pela composição da biomassa, tamanho da partícula e pela metodologia adotada no processo de torrefação (RODRIGUES; ROUSSET, 2009; MACEDO et al., 2014; TALERO et al., 2019). Considerada como um resíduo lignocelulósico a biomassa vegetal é composta, principalmente, de celulose (40 a 50%), hemicelulose (20 a 40%), lignina (20 a 35%) e de pequenas quantidades de produtos orgânicos e inorgânicos (MARTINI, 2009; ABBASI 2010; MAMVURA et al., 2017; XU et al., 2018), que possuem comportamentos térmicos distintos.

A biomassa quando submetida a torrefação sofre inúmeras reações químicas, entre elas a decomposição dos seus componentes principais, celulose, hemiceluloses e lignina que ocorrem em distintas faixas de temperatura, porém ocasionalmente sobrepostas. A deterioração da hemicelulose ocorre entre temperaturas de 200 e 300°C, da celulose em temperaturas entre 300 a 400°C e a lignina que possui a decomposição térmica mais difícil, se decompõe mais lentamente, em uma faixa mais ampla, entre 250 a 500°C (BRITO et al., 2006; COUHERT et al., 2009; WILD et al., 2009; ANDRADE et al., 2017; MAMVURA et al., 2017). A lignina é o principal componente da biomassa com tendência a formação de produto sólido, enquanto que as hemiceluloses e a celulose propendem a formação de produtos voláteis. Na temperatura de 300°C já ocorre a liberação de voláteis primários compostos por gases permanentes (monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, alcatrão, entre outros) e gases condensáveis à temperatura ambiente (água e compostos orgânicos) (TRUGILHO; SILVA, 2001; RAAD et al., 2006; NEVES et al., 2011; ANDRADE et al., 2017). Os constituintes inorgânicos da biomassa são responsáveis pelo material residual (cinzas), que permanecem após a queima da biomassa devido sua oxidação em altas temperaturas (BRITO; BARRICHELO, 1978; SILVA et al., 2018; DAI et al., 2019).

As cinzas são constituídas principalmente, de compostos de silício, potássio, sódio, enxofre, cálcio, ferro e magnésio, podendo ainda ser encontrados outros tipos de compostos conforme a fonte de origem da biomassa. Quando apresentada em altas concentrações, as cinzas podem diminuir o poder calorífico e agir de forma negativa no rendimento (BRITO; BARRICHELO, 1977; KLAUTAU, 2008; BENITES et al., 2018). O poder calorífico também pode ser influenciado de forma negativa pela umidade da biomassa, pois parte da energia liberada é gasta na evaporação da água (ANDRADE et al., 2017), em contra partida, a lignina e os extrativos de natureza aromática contribuem de forma positiva para o aumento do poder calorífico devido suas estruturas apresentarem grandes quantidades de carbono e hidrogênio e menor quantidade de oxigênio respectivamente, que são responsáveis pela energia térmica liberada por um combustível (SILVA et al., 2014; CHEN et al., 2018). Já o teor de carbono fixo compreendido pela massa restante após a liberação dos compostos voláteis, retirando os valores de umidade e cinzas (MCKENDRY, 2002; VIEIRA, 2012), foi obtido em máximo valor por Roz et al. (2015), relacionado com maior rendimento, quando submetida a biomassa em temperatura de 300°C no processo de torrefação, fato também apresentado por Andrade et al. (2017), que observou aumento significativo neste teor após a aplicação do processo em resíduos madeireiros de origem urbana.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental e obtenção da biomassa de Jatropha curcas L

Foi utilizado a biomassa do epicarpo e da torta de *Jatropha curcas* L., as quais tiveram as plantas cultivadas em duas áreas, sendo uma irrigada por pivô central e outra que não recebeu irrigação. A irrigação no tratamento irrigado foi realizada através do pivô central, sendo o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) de 82 e 81% avaliado nos anos de 2014 e 2015, respectivamente. O manejo da irrigação foi realizado com base nos dados de evapotranspiração da cultura determinados por dois lisímetros de pesagem circular, sendo os mesmos instalados, calibrados e testados na área experimental Flumignan (2011). A partir da leitura dos lisímetros de pesagem, foi determinada a quantidade de água necessária para reposição conforme o consumo periódico da planta. A adubação para satisfazer a demanda nutricional da cultura foi realizada em quatro aplicações ao longo de cada ciclo produtivo, utilizando ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio como fontes de NPK (12-6-12), respectivamente, sendo distribuídos 200 g da formulação por planta.

As mudas de *J. curcas* foram cultivadas em casa de vegetação e transplantadas, dispostas em espaçamento de 4 x 3 m (12 m² de área por planta) entre linhas e plantas, respectivamente, totalizando 833 plantas ha⁻¹. Os frutos foram colhidos ao atingirem o estágio de maturação fisiológica, determinado pela coloração amarela (PESSOA et al., 2012). No total foram realizadas cinco colheitas que ocorreram após quatro anos de experimento instalado. Após a colheita os frutos foram colocados para secar na sombra em temperatura ambiente, sendo pesados ao atingirem umidade em torno de 8% para o beneficiamento do fruto, obtendo dois materiais, o epicarpo e a torta, resultante do processo de extração do óleo das sementes.

3.2 Processo térmico de torrefação da biomassa de Jatropha curcas L

Amostras do epicarpo e da torta de J. curcas foram inicialmente secas em estufa regulada a 103 \pm 3°C até massa constante. Em seguida o material foi

adicionado no interior de um reator metálico de torrefação hermeticamente fechado, dotado de porta de acesso e orifícios destinados à inserção de termopares para controle da temperatura e evacuação de gases do processo, e em seguida inserido no interior de um forno tipo mufla, conforme Figura 1.

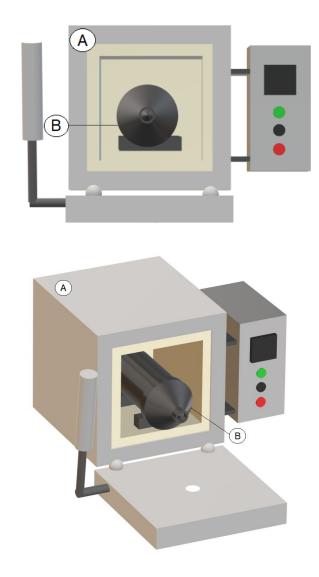


Figura 1- Esquema do forno tipo mufla (vista frontal e diagonal). A: forno mufla; B: reator metálico.

Fonte: o autor (2019).

A temperatura do processo iniciou-se a ± 30°C, a uma taxa de aquecimento de 1,5°C min⁻¹ e temperatura final de 280°C (± 5°C), mantida por 60 minutos. A temperatura final de 280°C é baseada nos resultados obtidos por (ARIAS et al., 2008; DHUNGANA; DUTTA; BASU, 2012; ANDRADE et al. 2017). O patamar final de 60 minutos e a respectiva taxa de aquecimento foram definidos com base nos testes pilotos anteriormente observados por pesquisas realizadas com o apoio do

grupo de pesquisa Bioenergia e Bioprodutos de Base Florestal (BioEP/DCFM/UFES).

3.3 Avaliações da biomassa in natura e torrefada

A determinação da umidade da biomassa foi realizada segundo os procedimentos contidos na norma NBR 8112 (ABNT, 1986). A densidade a granel foi estabelecida de acordo com a norma NBR 6922 (ABNT, 1981). O rendimento de material torrefado foi obtido mensurando o material após cada processo de torrefação, de acordo com a Equação 1:

$$RE = \left(\frac{Mf}{Mi}\right) \times 100$$
 (Equação 1)

Em que: RE: rendimento gravimétrico do material após ser torrefado (%); Mf = massa final da biomassa após ser torrefada (g); Mi = massa inicial da biomassa *in natura* (g).

A determinação dos teores de lignina e extrativos da biomassa foram feitas de acordo com os procedimentos contidos nas normas TAPPI T-222 (TAPPI, 1974) e TAPPI T-12 (TAPPI, 1975). O teor de holocelulose foi obtido por diferença, subtraindo da massa inicial da amostra livre de extrativos, o teor de lignina total. A análise imediata da biomassa (teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), foi conduzida de acordo com a norma D1762-84 (ASTM, 2007), em que o teor de carbono fixo foi obtido por diferença de acordo com a Equação 2:

$$TCF = 100 - (MV + CZ)$$
 (Equação2)

Em que: TCF = teor de carbono fixo (%); MV = teor de materiais voláteis (%); CZ = teor de cinzas (%).

Para a determinação do poder calorífico superior da biomassa foi utilizado como base a norma NBR 8633 (ABNT, 1984). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em calorímetro adiabático, modelo Ika C200. Para determinar o poder calorífico inferior (PCI) foi utilizada a Equação 3:

$$PCI = PCS - (600 \times 9H/100)$$
 (Equação 3)

Em que: PCI = poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); PCS = poder calorífico superior (kcal kg⁻¹).

E para a determinação do poder calorífico útil (PCU) foi utilizada a Equação 4:

$$PCU = [PCI \times (1 - U)] - 600U$$
 (Equação 4)

Em que: PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹); PCI = poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); U = umidade base úmida (%).

A densidade energética foi calculada com base no poder calorífico útil (PCU) e a densidade a granel dos materiais. De acordo com a Equação 5:

$$DE = PCU \times DG$$
 (Equação 5)

Em que: DE = densidade energética (Gcal m⁻³); PCU = poder calorífico útil (kcal kg⁻¹); DG = densidade a granel (g cm⁻³).

A análise termogravimétrica diferencial (TGA) foi realizada em equipamento Shimadzu TGA-60, sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de 50 ml min⁻¹ e razão de aquecimento de 10°C min⁻¹. A massa utilizada foi de ± 4 mg de material com granulometria situada entre 200 mesh e 270 mesh. Os termogramas foram obtidos a partir da temperatura ambiente, em torno de 25°C, até a temperatura máxima de 850°C. A análise da estrutura química carbonosa foi avaliada com o auxílio de um espectrofotômetro por transformada de Fourier (FTIR) no modo experimental de reflectância difusa (DRIFT) utilizando o equipamento Bruker Tensor-27, com 32 scans e amplitude espectral entre 600 a 4000 cm⁻¹ com amostra em um acessório de ATR (reflexão total atenuada) com cristal de ZnSe. Para análise das microestruturas da biomassa in natura e torrefada produzida e amostras do plano transversal foram analisadas por microscopia Confocal, através do microscópio confocal Olympus OLX. As amostras analisadas não necessitaram passar por nenhum tratamento específico visto que a superfície analisada foi a original da amostra. As imagens foram realizadas em três aumentos e obtidas em luz branca e luz ultravioleta.

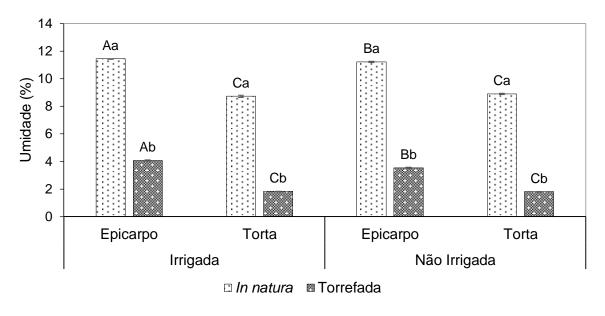
3.4 Análise dos dados

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade dos dados. Para a verificação da proximidade das variâncias foi aplicado o teste de Levene. A análise de variância (ANOVA) foi realizada seguindo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), tipo parcelas subdivididas (regime sequeiro e irrigado x biomassa *in natura* e torrificada) e cinco repetições. Para o teste de comparação múltipla das médias foi utilizado o teste de Tukey. Os testes foram a 95% de probabilidade. As análises foram realizadas com o auxílio do Software R Core.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades físicas e químicas da biomassa de Jatropha curcas

Na Figura 2 são apresentados os resultados médios para a umidade do epicarpo e torta da biomassa, *in natura* e torrefada, frente ao regime hídrico.



Letras maiúsculas comparam as médias da biomassa *in natura* ou torrefada, em função da disponibilidade hídrica. Letras minúsculas comparam as médias dentro de cada tipo de biomassa, *in natura* e torrefada. Médias seguidas pela mesma letra em cada categoria não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 2 – Resultados da umidade da biomassa de *Jatropha curcas in natura* e torrefada, sobre diferentes regimes hídricos.

O epicarpo de *J. curcas* de maneira geral, apresentou maior umidade quando comparado a torta, comportamento este semelhante ao encontrado por Vale et al. (2011), que associa a menor umidade da torta ao efeito da prensagem da semente para a extração do óleo. Entretanto, o epicarpo resultante de plantas que tiveram seu cultivo irrigado, apresentou maior umidade em comparação ao epicarpo de plantas que não foram irrigadas em seu cultivo. É notável que a torrefação influenciou na higroscopicidade da biomassa, tornando-a menos úmida (PIMCHUAI et al., 2010). De acordo com Ciolkosz e Wallace (2011), este fato é explicado devido a decomposição da hemicelulose, celulose e lignina, tornando-as mais fragilizadas, ocasionando a liberação de moléculas de água armazenadas no nível celular e a diminuição de ligações de hidrogênio devido a remoção de grupos OH.

600 Aa Ва 500 Densidade a granel (kg m⁻³) 400 Ab Bb 300 Ca Ca Cb Db 200 100 0 **Epicarpo** Torta **Epicarpo** Torta Irrigada Não Irrigada

Na Figura 3 são apresentados os valores médios da densidade a granel da biomassa.

Letras maiúsculas comparam as médias da biomassa *in natura* ou torrefada, em função da disponibilidade hídrica. Letras minúsculas comparam as médias dentro de cada tipo de biomassa, *in natura* e torrefada. Médias seguidas pela mesma letra em cada categoria não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

□ In natura ■ Torrefada

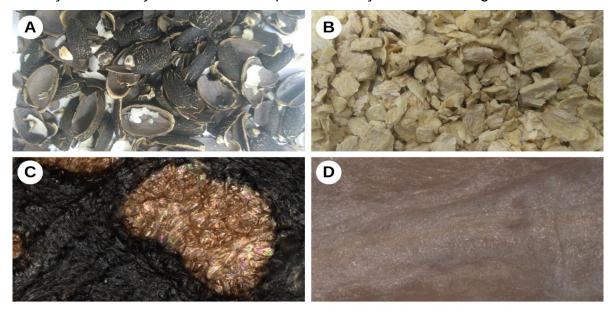
Figura 3 - Densidade a granel da biomassa *in natura* e torrefada de *Jatropha curcas*, em diferentes regimes hídricos.

A densidade a granel da torta, de modo geral foi maior do que a densidade do epicarpo, entretanto houve diferença significativa entre a densidade da torta *in natura* que foi obtida através do regime irrigado em comparação com a torta *in natura* oriunda do regime sequeiro, o que culminou também em uma diferença entre as mesmas torrefadas. Os epicarpos não apresentaram diferença significativa quanto ao regime irrigado. Vale et al. (2011) também obteve resultados superiores de densidade a granel da torta quando comparada a do epicarpo, inferindo que a menor granulometria da torta, devido ao seu manuseio e o processo de prensagem, ambos para a extração do óleo, contribuíram para o aumento da densidade. Após a torrefação todos os materiais apresentaram diferenças significativas em comparação aos mesmos *in natura*. Grassmann et al. (2016), observou resultados semelhantes ao aplicar o processo de torrefação em resíduos de madeira, os quais apresentaram decréscimo significativo em sua densidade a granel, devido a degradação dos seus constituintes pela ação do calor. Percebe-se também que a torta *in natura*, a qual possui maior densidade que o epicarpo, sofreu maior redução dessa variável após a

torrefação. Enquanto que, o epicarpo apresentou em média 15% de decréscimo em sua densidade a granel, a torta apresentou em média 38% de perda, fato este semelhante ao encontrado por Grassmann et al. (2016), que observou que resíduos de madeira com menor densidade apresentaram menor redução de massa por unidade de volume após o processo de torrefação.

O rendimento do processo de torrefação foi de aproximadamente 52 e 75% para epicarpo e torta de *J. curcas*, respectivamente, não havendo diferença significativa entre a biomassa das plantas que receberam irrigação com aquelas que não receberam irrigação. Isso pode ser devido ao fato de que a temperatura é considerada por diversos autores a variável mais significativa para perda de massa no processo de torrefação, proporcionando um impacto muito maior na perda do que a água constituinte presente na biomassa (HUANG et al., 2019; MEDIC et al., 2012; VAN DER STELT et al., 2011; CHEN et al., 2011; BRIDGEMAN et al., 2010; PIMCHUAI et al., 2010). Quanto maior o aumento da temperatura no processo de torrefação e do tempo de permanência, maior será a perda de massa do material torrefado, resultando em um decréscimo no rendimento (NIU et al., 2019; MEDIC et al., 2012; WANG et al., 2011). De acordo com Niu et al. (2019), o parâmetro dominante durante o processo de torrefação é a temperatura, considera ótima em aproximadamente 250°C, em relação ao rendimento em massa e a densidade energética da biomassa.

Apesar das mudanças nas propriedades físicas, em um aspecto visual, não foi possível identificar estas alterações na biomassa. Entretanto, foi possível notar a mudança de coloração da biomassa após a torrefação conforme Figura 4.



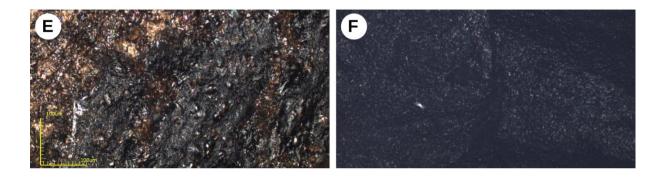


Figura 4 – Imagens do epicarpo (A) e torta (B) *in natura* de *Jatropha curcas*. Vista em Microscopia Confocal da superfície do epicarpo e torta *in natura*, (C e D), respectivamente, e da superfície do epicarpo e torta torrefados, (E e F), respectivamente.

Nota-se que o epicarpo *in natura* (C) apresenta estruturas em sua superfície que, quando observadas no epicarpo torrefado (E), se mostrou degradada pela ação da temperatura. Já na torta *in natura* (D) não foi observado quaisquer estruturas em sua superfície, diferentemente da torta torrefada (F), onde pequenas pontuações brancas foram observadas, evidenciando a possível presença de cinzas no material.

As Tabelas 2, 3 e 4 constam os resultados obtidos da análise química dos teores de lignina, holocelulose e extrativos, respectivamente, da biomassa *in natura* e torrefada de *J. curcas*.

Tabela 2 – Teor de lignina da biomassa *in natura* e torrefada de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos com base no material original.

Dogimo Hídrico	Diamaga	Teor de lignina (%)		
Regime Hídrico	Biomassa	In natura	Torrefada	
Irrigada -	Epicarpo	29,04±1,43 Ab	82,41±0,60 Ba	
	Torta	30,93±1,57 Aa	25,11±0,02 Db	
NIC - Luuil-	Epicarpo	2,79±0,93 Cb	86,17±0,38 Aa	
Não Irrigada	Torta	5,70±0,02 Bb	27,22±0,15 Ca	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O teor de lignina de ambas as biomassas *in natura*, epicarpo e torta, que foram procedentes de plantas irrigadas, foi influenciado pelo regime hídrico, apresentando valores superiores significantes se comparada a biomassa daquelas plantas que não obtiverem irrigação em seu cultivo. Singh et al. (2013) e Santos

(2016), observaram que os frutos de *J. curcas* de plantas com tratamento irrigado superiores aos de tratamento não irrigado, apresentando desenvolvimento, produtividade e rendimento em sementes. Após ter passado pelo processo de torrefação a biomassa sofreu algumas alterações. O teor de lignina que antes era maior na biomassa in natura de plantas irrigadas, em geral, na biomassa torrefada se apresenta maior nos epicarpos se comparados às tortas, isto porque a lignina é responsável pela formação de produto sólido (BRITO; BARRICHELO, 1977; BRITO et al., 2006; NEVES et al., 2011; MAMVURA et al., 2017), devido sua composição complexa, se tornando o principal constituinte após o processo de torrefação. Dessa forma, ocorre o aumento do teor de lignina após a torrefação, e desse modo obtêm-se correlações positivas com o poder calorífico superior, teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico com o aumento do teor de lignina (SANTOS et al., 2011; BENITES et al., 2018). E novamente o regime hídrico foi um fator que diferenciou o teor de lignina das biomassas torrefadas, pelo fato de ser maior no epicarpo e na torta de plantas com o cultivo não irrigado.

Tabela 3 – Teor de holocelulose da biomassa *in natura* e torrefada de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos com base no material original.

Regime Hídrico	Biomassa	Teor de holocelulose (%)		
		In natura	Torrefada	
Irrigada -	Epicarpo	49,38±2,18 Ba	7,15±0,42 Bb	
	Torta	49,26±1,40 Ba	14,31±0,07 Ab	
Não Irrigada -	Epicarpo	52,58±0,84 Aa	6,37±0,06 Bb	
	Torta	49,00±0,05 Ba	13,34±0,09 Ab	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O teor de holocelulose da biomassa não apresentou diferença significativa quanto ao regime hídrico, exceto o epicarpo de plantas não irrigadas que apresentou um valor pouco superior aos demais resíduos. Benites et al. (2016), estudando o efeito da irrigação em clones de eucalipto, não observou aumento no teor de holocelulose com o uso da irrigação. O teor de holocelulose das biomassas diminuíram significativamente com o processo de torrefação, principalmente nos epicarpos, pois a temperatura final do processo próxima a 300°C, contribuiu principalmente para a degradação da hemicelulose, que possui a menor faixa de

degradação, inserida entre 200 a 300°C devido sua estrutura ramificada e amorfa (COUHERT et al., 2009; WILD et al., 2009; MAMVURA et al., 2017; BENITES et al., 2018; CHEN et al., 2018). A diminuição do teor de holocelulose é vantajosa para fins energéticos, visto que a celulose e a hemicelulose possuem correlações negativas com o rendimento gravimétrico, por serem responsáveis pela liberação de gases e produtos líquidos durante a torrefação (BRITO; BARRICHELO, 1977; BENITES et al., 2018; CHEN et al., 2018).

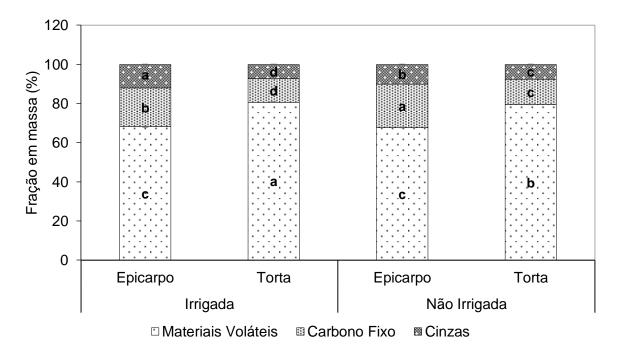
Tabela 4 – Teor de extrativos da biomassa *in natura* e torrefada de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos com base no material original.

Dogimo Uídrico	Biomassa	Teor de extrativos (%)		
Regime Hídrico		In natura	Torrefada	
Irrigada -	Epicarpo	21,58±0,75 Ba	10,44±0,18 Bb	
	Torta	19,81±2,97 Bb	60,58±0,09 Aa	
Não Irrigada -	Epicarpo	44,62±0,12 Aa	7,46±0,32 Cb	
	Torta	45,31±0,07 Ab	59,43±0,07 Aa	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

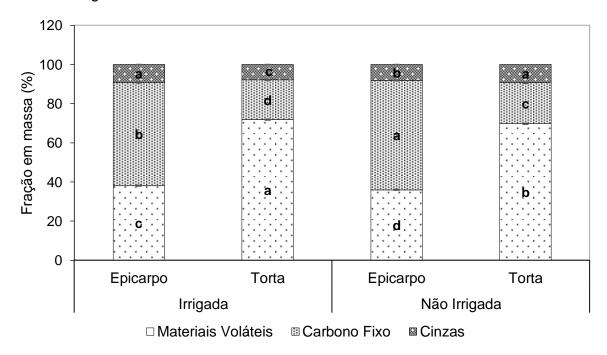
O teor de extrativos foi superior na biomassa *in natura* proveniente de plantas não irrigadas, evidenciando que o regime hídrico tem influência positiva sobre os extrativos presentes na biomassa. O elevado teor de extrativos encontrado na biomassa de *J. curcas* pode ser relacionado ao elevado teor de óleo que contém em suas sementes. Entretanto, alguns estudos demonstram que o teor de óleo nas sementes de *J. curcas* respondem positivamente a irrigação (KHEIRA; ATTA, 2009; KAUSHIK, 2013; MEDEIROS et al., 2014). O teor de extrativos encontrado na biomassa após a torrefação, foi superior nas tortas se comparado aos epicarpos, fato este explicado pela presença de óleo nas tortas mesmo após o processo de torrefação, que não foi suficiente para causar a termodegradação do óleo presente na biomassa. Regatieri (2016), estudando a termodegradação em biodiesel de soja, observou que é necessário altas temperaturas, acima de 280°C, para se iniciar a termodegradação do biodiesel.

Os valores obtidos dos teores de materiais voláteis, cinzas e de carbono fixo, estão representados na Figura 5, para biomassa *in natura*, e na Figura 6 para a biomassa torrefada.



Médias seguidas pelas mesmas letras em cada categoria não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 5 – Análise imediata para a biomassa *in natura* de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos.



Médias seguidas pelas mesmas letras em cada categoria não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 6 - Análise imediata para a biomassa torrefada de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos.

Quanto ao teor de materiais voláteis, detectou-se diferenças significativas quanto a torta, *in natura* e torrefada, e ao epicarpo torrefado, em relação ao regime hídrico, apresentando valores superiores destas biomassas quando provindas de plantas irrigadas, fato este podendo ser explicado devido a água constituinte da biomassa fazer parte dos gases condensáveis a temperatura ambiente, os quais são classificados como materiais voláteis quando presentes na biomassa, contribuindo para o aumento deste teor (RAAD et al., 2006; NEVES et al., 2011; MACEDO et al., 2014). Entretanto o epicarpo *in natura*, não apresentou diferença significativa entre os regimes hídricos. De modo geral, a biomassa torrefada quando comparada a biomassa *in natura*, apresentou valores inferiores de materiais voláteis devido a ação da temperatura no processo de torrefação, que próxima a 300°C é responsável pela liberação de gases permanentes e condensáveis a temperatura ambiente, culminando na diminuição de voláteis presentes na biomassa após a torrefação (RAAD et al., 2006; NEVES et al., 2011; CHEN et al., 2015).

O teor de carbono fixo da biomassa apresentou diferenças significativas quanto ao regime hídrico e a torrefação, em um modo geral, o epicarpo *in natura* ou torrefado apresentou maior teor de carbono fixo do que a torta *in natura* ou torrefada. Macedo et al. (2014), também observou elevado teor de carbono fixo no epicarpo de *J. curcas* quando comparado a outras biomassas como bagaço de cana (*Saccharum officinarum* L.), capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum var. mineiro) e bambu (*Bambusa vulgaris* ex J.C. Wendl. var. vulgaris). O elevado teor de carbono fixo do epicarpo pode ser explicado pelo seu elevado teor de lignina, que estão diretamente correlacionados de maneira positiva, pois a elevada porcentagem de carbono elementar na estrutura da lignina contribui para o aumento do teor de carbono fixo (BRITO; BARRICHELO, 1977; SANTOS et al., 2011; BENITES et al., 2018; YANG et al., 2020). Analisando o epicarpo e a torta de *J. curcas* em relação ao regime hídrico, em ambos os tratamentos, *in natura* e torrefado, a biomassa oriunda de plantas irrigadas, foi influenciada negativamente em seu teor de carbono fixo, apresentando médias inferiores se comparada a biomassa de plantas não irrigadas.

O teor de cinzas do epicarpo *in natura* de plantas irrigadas foi maior em relação ao epicarpo de plantas não irrigadas, entretanto, o comportamento das tortas foi inverso, em que a torta de plantas não irrigadas obteve valores de cinzas superiores ao da torta de plantas submetidas a irrigação. De modo geral, os epicarpos apresentaram maiores valores de cinzas em comparação as tortas,

resultado semelhante ao encontrado por Vale et al. (2011), que também observou valores de cinzas do epicarpo superiores aos da torta *in natura* de *J. curcas*, fato este relacionado a presença de materiais inorgânicos na biomassa como potássio, cálcio, ferro e magnésio, entre outros, oriundos em parte da adubação ou da origem da biomassa (KLAUTAU, 2008; VALE et al., 2011; SILVA et al., 2018; DAI et al., 2019; NIU et al., 2019). Outro fato é a diminuição do teor de cinzas dos epicarpos após a torrefação, pois a torrefação contribui para o aumento deste (ÁLVAREZ et al., 2018; DAI et al., 2019; GAN et al., 2019), devido a degradação dos componentes orgânicos.

4.2. Energia calorífica da biomassa de Jatropha curcas

A Tabela 5 apresenta os valores do poder calorífico superior, inferior e útil, respectivamente, da biomassa de *J. curcas*, *in natura* e torrefada.

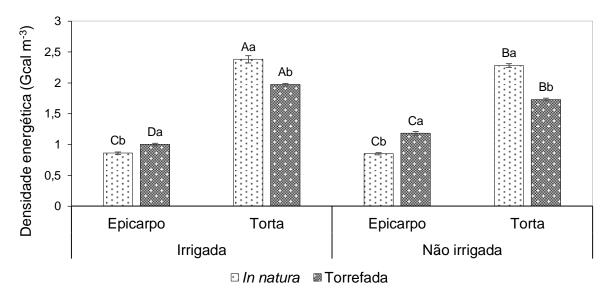
Tabela 5 – Energia calorífica da biomassa *in natura* e torrefada de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos.

Poder Calorífico Superior (MJ kg ⁻¹)				
Regime Hídrico	Biomassa	In natura	Torrefada	
Irrigado -	Epicarpo	21,10±0,18 Bb	26,81±0,39 Ba	
	Torta	23,27±0,18 Ab	27,66±0,21 Aa	
Não irrigado -	Epicarpo	20,82±0,01 Bb	27,85±0,62 Aa	
	Torta	23,24±0,09 Ab	26,86±0,07 Ba	
Poder Calorífico Inferior (MJ kg ⁻¹)				
Regime Hídrico	Biomassa	In natura	Torrefada	
Irrigado	Epicarpo	19,74±0,18 Bb	25,45±0,39 Ba	
Irrigado	Torta	21,91±0,18 Ab	26,30±0,21 Aa	
Não irrigado —	Epicarpo	19,46±0,01 Bb	26,49±0,62 Aa	
	Torta	21,88±0,09 Ab	25,50±0,07 Ba	
F	Poder Calorífico Út	til (MJ kg ⁻¹)		
Regime Hídrico	Biomassa	In natura	Torrefada	
Irrigado	Epicarpo	17,20±0,16 Bb	24,32±0,37 Ca	
Irrigado -	Torta	19,78±0,19 Ab	25,78±0,22 Aa	
Não irrigado	Epicarpo	17,00±0,02 Bb	25,47±0,60 ABa	
Não irrigado	Torta	19,71±0,06 Ab	25,00±0,07 Ba	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O poder calorífico útil da biomassa in natura não apresentou diferença em relação ao tipo de regime hídrico, entretanto houve diferenças quanto ao tipo de biomassa, sendo que as tortas apresentaram maior poder calorífico em comparação aos epicarpos. Estes fatos podem estar relacionados ao maior teor de cinzas dos epicarpos, que culmina na diminuição do poder calorífico deste tipo de biomassa (BRITO; BARRICHELO, 1977; BENITES et al., 2018). Já as tortas que apresentaram poder calorífico útil maior, relacionando à presença de óleo residual na biomassa, fatos estes também observados por Vale et al. (2011). Para a biomassa torrefada houve aumento significativo do poder calorífico em ambas as biomassas, visto que o processo de torrefação contribui para o aumento do teor de carbono fixo e, consequentemente, ocasiona o aumento do poder calorífico destes materiais (SANTOS et al., 2011; BENITES et al., 2018; GAN et al., 2019; YANG et al., 2020). O regime hídrico contribuiu para um comportamento diferente para a biomassa torrefada, em que o poder calorífico do epicarpo irrigado foi igual ao da torta não irrigada, e de forma inversa, o poder calorífico do epicarpo não irrigado foi igual ao da torta irrigada.

Os resultados obtidos para a densidade energética da biomassa *in natura* e torrefada de *J. curcas* são apresentados na Figura 7.



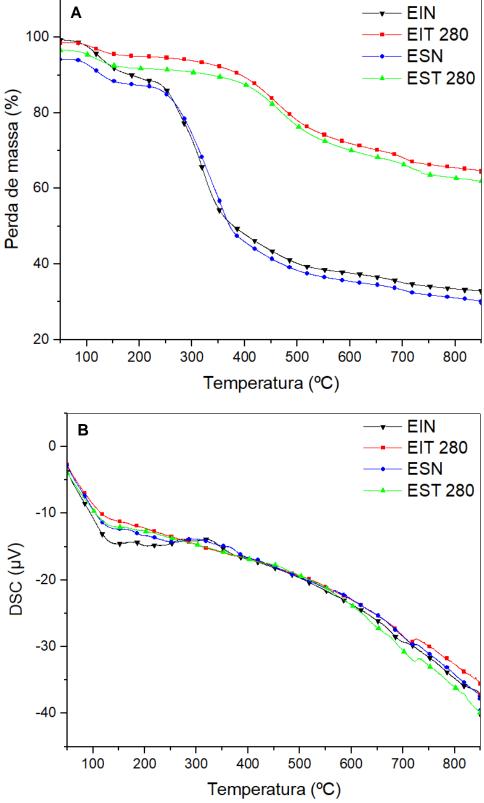
Letras maiúsculas comparam as médias da biomassa *in natura* ou torrefada, em função da disponibilidade hídrica. Letras minúsculas comparam as médias dentro de cada tipo de biomassa, *in natura* e torrefada. Médias seguidas pela mesma letra em cada categoria não diferem estatisticamente a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Figura 7 - Estoque energético da biomassa *in natura* e torrefada de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos.

A densidade energética da biomassa de J. curcas apresentou comportamento semelhante ao da densidade a granel, de forma que os maiores valores de densidade a granel contribuíram para o aumento da densidade energética das biomassas (CHEN et al., 2015; ANDRADE et al., 2017), visto a pequena variação do poder calorífico útil, principalmente, na biomassa torrefada. Este fato é devido a relação diretamente proporcional entre essas variáveis, também observado por Souza e Vale (2016). As tortas apresentaram valores superiores de densidade energética em comparação aos epicarpos mesmo in natura e torrefadas, entretanto, houve diferença significativa entre o tipo de regime hídrico das tortas, em que a torta oriunda de plantas com regime irrigado, obteve maior densidade energética. A torrefação contribui para o aumento da densidade energética da biomassa visto que o processo favorece o aumento do teor carbono fixo, observado nos epicarpos de *J.* curcas. Entretanto, para as tortas este comportamento não foi observado, apresentando diminuição da densidade energética após a torrefação. Isso pode ser justificado pela densidade a granel da torta, que após passar pelo processo de torrefação sofreu maior redução de sua densidade a granel do que os epicarpos, influenciando de maneira negativa na densidade energética, explicando assim a diminuição após a torrefação.

4.3. Análise termogravimétrica diferencial da biomassa de Jatropha curcas

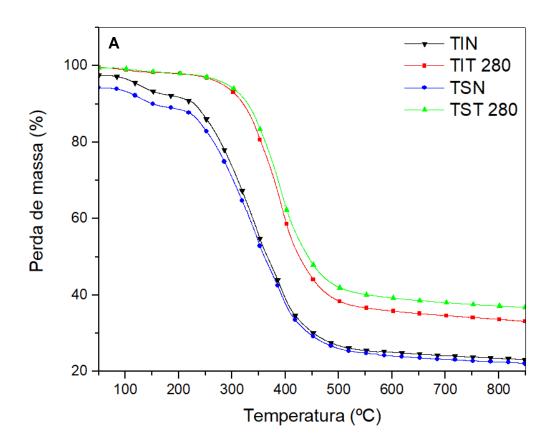
A Figura 8 e a Figura 9 apresenta a análise termogravimétrica do epicarpo e da torta, *in natura* e torrefada, de *J. curcas*.

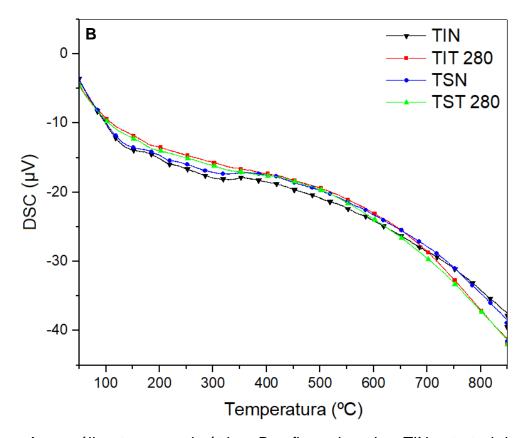


Em que: A = análise termogravimétrica; B = fluxo de calor; EIN = epicarpo irrigado *in natura*; EIT 280 = epicarpo irrigado torrefado; ESN = epicarpo não irrigado *in natura*; EST 280 = epicarpo não irrigado torrefado.

Figura 8 – Análise termogravimétrica e DTG do epicarpo *in natura* e torrefado de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos.

O primeiro estágio da perda de massa ocorrido de 50 a 150°C é compreendido pela perda de umidade da biomassa. A decomposição térmica da holocelulose representa o segundo estágio, contribuindo para a perda de massa ocorrida entre as temperaturas de 150 a aproximadamente 270°C, seguida do terceiro estágio ocasionado pela degradação da celulose em temperaturas de 270 a 350°C (SRICHAROENCHAIKUL; ATONG, 2009; VARMA; MONDAL, 2017; GAN et al., 2019). O quarto estágio ocorre pela degradação gradual da lignina em uma faixa mais ampla a partir de 400°C, a qual ocasiona a perda de massa gradual da biomassa até sua total degradação (MUSELLIM et al., 2018; GAN et al., 2019). A perda de massa mais evidente foi nos epicarpos *in natura*, visto a não degradação dos componentes químicos deste material, ao contrário dos epicarpos torrefados, que apresentaram menor perda de massa com a ação do calor em função do menor teor de holocelulose e maior teor de lignina, fazendo com que esta biomassa seja mais resistente termicamente. A Figura 9 apresenta a análise termogravimétrica da torta *in natura* e torrefada de *J. curcas*.





Em que: A = análise termogravimétrica; B = fluxo de calor; TIN = torta irrigada *in natura*; TIT 280 = torta irrigada torrefada; TSN = torta não irrigada *in natura*; TST 280 = torta não irrigada torrefada.

Figura 9 – Análise termogravimétrica e DTG da torta *in natura* e torrefada de *Jatropha curcas*, sobre diferentes regimes hídricos.

Para as tortas de *J. curcas*, os estágios de perda de massa foram semelhantes aos observados nos epicarpos. De modo que a degradação de seus componentes químicos ocorreu em faixas de temperatura muito semelhantes. Entretanto, nota-se que as tortas apresentaram de maneira geral, maior perda de massa que os epicarpos, principalmente nas tortas *in natura*. Porém, diferente das tortas *in natura*, as tortas torrefadas não apresentaram perda de massa significativa entre 50 a 150°C (primeiro estágio), relacionada com a perda de água da biomassa, salientando a menor umidade deste material, proporcionada pela torrefação (PIMCHUAI et al., 2010; GAN et al., 2019). Contudo, apesar da ausência do primeiro estágio (Figura 9A), as tortas torrefadas apresentaram a mesma tendência de perda de massa que as tortas *in natura*, fato este relacionado ao menor teor de lignina desse material, o qual contribui para a menor resistência térmica das tortas mesmo torrefadas.

4.4. Espectroscopia de infravermelho médio com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros da análise de FTIR da biomassa de *J. curcas* são apresentados na Figura 10 e Figura 11 da biomassa *in natura* e torrefada.

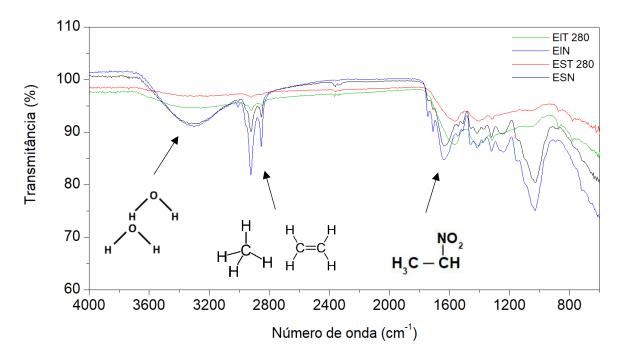


Figura 10 - Espectros de FTIR do epicarpo de *Jatropha curcas*, em que (EIT 280) epicarpo irrigado torrefado; (EIN) epicarpo irrigado *in natura*; (EST 280) epicarpo não irrigado torrefado; e (ESN) epicarpo não irrigado *in natura*.

O epicarpo *in natura* e torrefado apresentaram semelhanças, porém os espectros dos epicarpos torrefados demonstraram que algumas bandas desapareceram devido à quebra da ligação química em consequência da temperatura. No epicarpo irrigado *in natura* (EIN) e no epicarpo não irrigado *in natura* (ESN), foi observado o alongamento do grupo funcional hidroxil associado (ligações OH), que variaram de 3600 a 3200 cm⁻¹ (PIMCHUAI et al., 2010; GAN et al., 2019). A presença deste grupo funcional é relacionada a água constituinte no material, pois em comparação aos epicarpos *in natura*, o epicarpo irrigado torrefado (EIT 280) e epicarpo não irrigado torrefado (EST 280), não apresentaram em seus espectros grandes concentrações do grupo funcional hidroxil, ou seja, corrobora o

fato de que a torrefação contribui para a diminuição da umidade do material. A banda entre 3000 e 2850 cm⁻¹ indicou a presença dos grupos alifáticos (alongamento de ligações CH) (LI et al., 2018; GAN et al., 2019), no ESN e em maior concentração no EIN devido ao cultivo irrigado, que aumenta o teor de óleo nas sementes (KHEIRA; ATTA, 2009; KAUSHIK, 2013; MEDEIROS et al., 2014), explicando a maior concentração desse grupo funcional. O epicarpo irrigado torrefado (EIT 280) e epicarpo não irrigado torrefado (EST 280) apresentaram baixa concentração dos grupos alifáticos, demonstrando que a torrefação provocou a degradação desses grupos funcionais neste tipo de biomassa. Entre 1745 a 1700 cm⁻¹ foi observado nos espectros dos epicarpos in natura a presença de alongamentos C=O (cetonas, ácidos carboxílicos, ésteres e aldeídos) (SALEMA et al., 2014), principalmente em maiores concentrações no epicarpo irrigado in natura (EIN), devido a contribuição da água para o aumento desses grupos funcionais. No epicarpo irrigado torrefado (EIT 280) e epicarpo não irrigado torrefado (EST 280), não há a presença destes grupos funcionais devido a volatilização em decorrência da ação da temperatura, entretanto observa-se a presença de nitrocompostos em 1550 cm⁻¹, que facilitam a reação exotérmica.

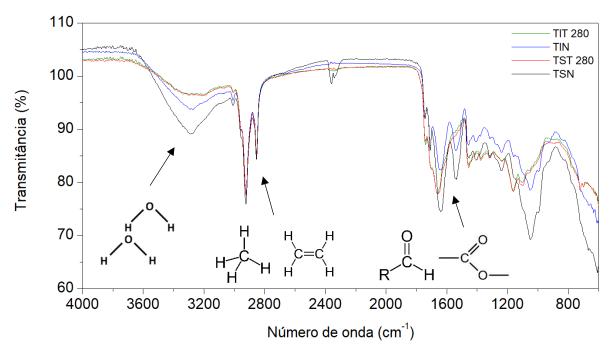


Figura 11 - Espectros de FTIR da torta de *Jatropha curcas*, em que (TIT 280) torta irrigada torrefada; (TIN) torta irrigada *in natura*; (TST 280) torta não irrigada torrefada; e (TSN) torta não irrigada *in natura*.

Os espectros das tortas de *J. curcas* assim como os espectros dos epicarpos apresentaram algumas diferenças nas bandas em virtude da torrefação. Os grupos funcionais hidroxil presentes entre 3600 a 3200 cm⁻¹ foram superiores na torta irrigada in natura (TIN) e na torta não irrigada in natura (TSN), evidenciando que a torrefação diminui a umidade da biomassa (PIMCHUAI et al., 2010; GAN et al., 2019) e consequentemente contribuindo para o aumento do poder calorífico útil, visto que este grupo funcional está relacionado a água presente na biomassa. Nas tortas também foi observado a presença de grupos alifáticos entre 3000 e 2850 cm⁻¹, entretanto diferente dos epicarpos, as tortas mesmo torrefadas não apresentaram diminuição deste grupo funcional, visto que a temperatura da torrefação não foi suficiente para provocar a volatilização do óleo que constitui as tortas (REGATIERI, 2016), resultando em uma mesma concentração de grupos alifáticos para ambas as biomassas, in natura e torrefada. A torta irrigada in natura (TIN) e torta não irrigada in natura (TSN), entre 1745 a 1630 cm⁻¹ apresentaram diversos grupos funcionais C=O como ésteres, aldeídos, cetonas e amidas que estão ausentes e/ou em baixas concentrações na torta irrigada torrefada (TIT 280) e na torta não irrigada torrefada (TST 280), em função da degradação destes grupos em virtude da temperatura da torrefação.

5. CONCLUSÃO

A biomassa torta de *Jatropha curcas* L. oriunda de plantas irrigadas se destacou para o uso energético, por apresentar a maior densidade energética e poder calorífico útil. Todavia, esta biomassa *in natura* é de composição heterogênea capaz de apresentar características físico-químicas que podem não ser benéficas para o seu uso energético. O processo de torrefação apesar de diminuir a densidade energética desta biomassa, contribuiu para o aumento do seu poder calorífico útil e para sua homogeneidade, melhorando dessa forma as características físico-químicas e energéticas para o seu uso energético.

A utilização desta fonte renovável para fins energéticos contribui para redução de impactos ambientais, com a retirada deste material do ambiente, proporcionando um destino mais sustentável aos resíduos sólidos gerados na extração do óleo de *Jatropha curcas* L.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, T. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. India: Elsevier, v. 14, p. 919-937, 2010.

ACHTEN, W. M. J.; MAES, W. H.; REUBENS, B.; MATHIJS, E.; SINGH, V. P.; VERCHOT, L.; MUYS, B. Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, p. 667–676, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). BIG — **Banco de Informações de Geração**: Capacidade de Geração do Brasil, 2019.

Disponível em:

http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse_fn1.cf m

Acesso em: 29 ago. 2019.

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.

ÁLVAREZ, A.; NOGUEIRO, D.; PIZARRO, C.; MATOS, M.; BUENO, J. L. Non-oxidative torrefaction of biomass to enhance its fuel properties. **Energy**, v. 158, p. 1-81, 2018.

ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O; DIAS JÚNIOR, A. F.; LANA, A. Q. Changes caused by torrefaction on urban wooden waste. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 117, p. 275-284, 2017.

ARAÚJO, L.G. de.; SOUSA, K.C.I. Pinhão-manso para produção de biodiesel. **Revista Anhangüera**, Goiânia, v. 9, n. 1, p. 95–119, 2008.

ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSO, J.; PLAZA, M. G.; RUBIERA, F.; PIS, J. J. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.

ARRUDA, F. P.; BELTRÃO N. E. M.; ANDRADE A. P.; PEREIRA W. E.; SEVERINO L. S. Cultivo de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v. 8, n. 1, p. 789-799, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6922**: carvão vegetal – ensaios físicos determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, p. 2, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 8633**: carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, p. 13, 1984.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, p. 5, 1986.
- ASTM International **D1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal, 2007.
- AZAM, M. M.; WARIS, A.; NAHAR, N. M. Prospects and potential of fatty acid methyl esters of some non-traditional seed oils for use as biodiesel in India. **Biomass and Bioenergy**, v. 29, p. 293-302, 2005.
- BAUER, A.; MENRAD, K. Standing up for the Paris Agreement: do global climate targets influence individuals' greenhouse gas emissions? **Environmental Science e Policy**, v. 99, p. 72-79, 2019.
- BENITES, P. K. R. M.; LOPES, A. S.; GOUVÊA, A. F. G.; SILVA, F. C.; SOUZA, C. C. B. Caracterização tecnológica da madeira de híbridos de eucalipto irrigados e fertirrigados. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1716-1728, 2018.
- BOASIAKO, C. A.; ACHEAMPONG, B. B. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 85, p.144-152, 2016.
- BRIDGEMAN, T. G.; JONES, J. M.; WILLIAMS, A.; WALDRON, D. J. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. **Fuel**, v. 89, p. 3911-3918, 2010.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, 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. **IPEF**, n.16, p. 63-70, 1978.
- BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, v. 12, n. 2, 2006.
- CAVALCANTE FILHO, P. G.; BUAINAIN, A. M.; BENATTI, G. S. S. A cadeia produtiva agroindustrial do biodiesel no Brasil: um estudo sobre sua estrutura e caracterização. **Desenvolvimento Regional em debate**, v. 9, p. 772-799. 2019
- CHEN, D.; GAO, A.; CEN, K.; ZHANG, J.; CAO, X.; MA, Z. Investigation of biomass torrefaction based on three major components: hemicellulose, cellulose, and lignin. **Energy Conversion and Management**, v. 169, p. 228-237, 2018.
- CHEN, W-H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44,

p. 847-866, 2015.

CHEN, W-H.; HSU, H-C.; LU, K-M.; LEE, W-J.; LIN T-C. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. **Energy**, v. 36, p. 3012-3021, 2011.

CIOLKOSZ, D.; WALLACE, R. A review of torrefaction for bioenergy feedstock production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, p. 317-329, 2011.

COUHERT, C.; COMMANDRE, J. M.; SALVADOR, S. Is it possible to predict gas yields of any biomass after rapid pyrolysis at high temperature from its composition in cellulose, hemicellulose and lignin? **Fuel**, v. 88, p. 408–417, 2009.

DAI, L.; WANG, Y.; LIU, Y.; RUAN, R.; HE, C.; YU, Z.; JIANG, L.; ZENG, Z.; TIAN, X. Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: a state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 20-36, 2019.

DAI, Y.; SUN, Q.; WANG, W.; LU, L.; LIU, M.; LI, J.; YANG, S.; SUN, Y.; ZHANG, K.; XU, J.; ZHENG, W.; HU, Z.; YANG, Y.; GAO, Y.; CHEN, Y.; ZHANG, X.; GAO, F.; ZHANG, Y. Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: a review. **Chemosphere**, v. 211, p. 235-253, 2018.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANUTO, R. B.; ANDRADE, C. R.; SOUZA, N. D.; TAKESHITA, S.; BRITO, J. O.; NOLASCO, A. M. Influence of *eucalyptus* wood addition to urban wood waste during combustion. **Cerne**, v. 23, n. 4, p. 455-464, 2017.

DIVAKARA, B. N.; UPADHYAYA, H. D.; WANI, S. P.; GOWDA, L. C. L. Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: a review. **Applied Energy**, v. 87, p. 732-742, 2010.

DHUNGANA, A.; DUTTA, A.; BASU, P. Torrefaction of non-lignocellulose biomass waste. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 90, n. 1, p. 186–195, 2012.

DRANSKI, J. A. L.; JÚNIOR, A. S. P..; STEINER, F.; ZOZ, T.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M.; GUIMARÃES, V. F. Physiological maturity of seeds and colorimetry of fruits of *Jatropha curcas* L. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 4, p. 158-165, 2010.

EUROSTAT: Statistics explained. **Renewable energy statistics**, 2019.

Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics

Acesso em: 10 set. 2019.

EMBAYE, W. T.; BERGTOLD, J. S.; ARCHER, D.; FLORA, C.; ANDRANGO, G. C.; ODENING, M.; BUYSSE, J. Examining farmers' willingness to grow and allocate land for oilseed crops for biofuel production. **Energy Economics**, v. 71, p. 311-320, 2018.

FLUMIGNAN, D. L. Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.), p. 200, 2011. Tese (Doutorado em

Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GAN, Y. Y.; ONG, H. C.; LING, T. C.; CHEN, W-H. CHONG, C. T. Torrefaction of deoiled *Jatropha* seed kernel biomass for solid fuel production. **Energy**, v. 170, p. 367-374, 2019.

GARRONE, R. F.; CAMPOS, A. G.; SILVEIRA, C. P.; LAVRES JUNIOR, J. Produção de biomassa, diagnose nutricional e absorção de nitrogênio e cálcio durante crescimento inicial do pinhão-manso. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 22-31, 2016.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. **Encontro de Energia no Meio Rural**, n. 6, 2006.

GEXSI. **Global market study on Jatropha**: final report. London: GEXSI LLP, 2008. Disponível em: http://np-net.pbworks.com/f/GEXSI+(2008)+Global+market+study+on+Jatropha+FULL-REPORT.pdf
Acesso em: 10 set. 2019.

GONZÁLES, N. F. C. International experiences with the cultivation of *Jatropha curcas* for biodiesel production. **Energy**, v. 112, p. 1245-1258, 2016.

GRASSMANN, G. S.; ANDRADE, C. R.; DIAS JÚNIOR, A. F.; SILVA JÚNIOR, F. G.; BRITO, J. O. Timber wastes torrefaction for energy use. **Ciencia y tecnología**, v. 18, p. 105-112, 2016.

HENDGES, A. S. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Agrossilvopastoris no Brasil. Cidadania & Meio Ambiente, Parte 1 – Orgânicos, n. 1521, 2012.

Disponível em: http://www.ecodebate.com.br/2012/02/07/diagnostico-dos-residuos-solidos-agrossilvopastoris-no-brasil-parte-1-organicos-artigo-de-antonio-silvio-hendges/.

Acesso em: 06 maio 2019.

HUANG, CW.; LI, YH.; XIAO, KL.; LASEK, J. Cofiring characteristics of coal blended with torrefied *Miscanthus* biochar optimized with three Taguchi indexes. **Energy**, v. 172, p. 566-579, 2019.

JAIN, S.; SHARMA, M.P. Prospects of biodiesel from *Jatropha* in India: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 763-771, 2010.

KAUSHIK, N.; BHARDWAJ, D. Screening of *Jatropha curcas* germplasm for oil content and fatty acid composition. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 210- 218, 2013.

KHEIRA, A. A. A.; ATTA, N. M. M. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: Yield, water use efficiency and oilseed characteristics. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 1–8, 2009.

- KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos.** 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba, 2008.
- KOH, M. Y.; MOHD. GHAZI, T. I. A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2240-2251, 2011.
- KROOK, J.; MÂRTENSSON, A.; EKLUND, M. Sources of heavy metal contamination in Swedish wood waste used for combustion. **Waste Management**, v. 26, n. 2, p. 158-166, 2006.
- KUMAR, P.; SRIVASTAVA, V. C.; JHA, M. K. *Jatropha curcas* phytotomy and applications: development as a potential biofuel plant through biotechnological advancements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 818-838, 2016.
- KUMAR, R.; DAS, N. Seed oil of *Jatropha curcas* L. germplasm: analysis of oil quality and fatty acid composition. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 663-668, 2018.
- KUMAR, S.; CHAUBE, A.; JAIN, K.S. Sustainability issues for promotion of Jatropha biodiesel in Indian scenario: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 1089–1098, 2012.
- LAMA, A. D.; KLEMOLA, T.; SALONIEMI, I.; NIEMELA, P.; VUORISALO, T. Factors affecting genetic and seed yield variability of *Jatropha curcas* (L.) across the globe: a review. **Energy for Sustainable Development**, v. 42, p. 170-182, 2014.
- LI, S-X.; CHEN, C-Z.; LI, M-F.; XIAO, X. Torrefaction of corncob to produce charcoal under nitrogen and carbon dioxide atmospheres. **Bioresource Technology**, v. 249, p. 348-353, 2018.
- MACEDO, L. A.; ROUSSET, P. L. A.; VALE, A. T. Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis da torrefação de resíduos vegetais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 417-424, 2014.
- MACHADO, J. S. T.; PIMENTEL, R. M. Potencial do capiaçu como biomassa energética. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**, v. 5, n. 2, p. 56-62, 2019.
- MAES, W. H.; TRABUCCO, A.; ACHTEN, W. M. J.; MUYS, B. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. **Biomass and Bioenerg**, v. 33, p. 1481-1485, 2009.
- MAMVURA, T. A.; PAHLA, G.; MUZENDA, E. Torrefaction of waste biomass for aplication in energy production in South Africa. **South African Jornal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 1-12, 2017

- MARTINI, P. R. R. Conversão Pirolítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos. 2009. Dissertação (mestrado em química) PPGQ, UFSM, Santa Maria, 2009.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.
- MEDEIROS, S. S.; GUERRA, H. O. C.; LIMA, V. L. A.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, T. S. Teor de óleo do pinhão manso com adubação fosfatada e irrigado com água residuária. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 299–305, 2014.
- MEDIC, D.; DARR, M.; SHAH, A.; POTTER, B.; ZIMMERMAN, J. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. **Fuel**, v. 91, p. 147-154, 2012.
- MORGAN, E. A.; NALAU, J.; MACKEY, B. Assessing the alignment of national-level adaptation plans to the Paris Agreement. **Environmental Science e Policy**, v. 93, p. 208-220, 2019.
- MUSELLIM, E.; TAHIR, M. H.; AHMAD, M. S.; CEYLAN, S. Thermokinetic and TG/DSC-FTIR study of pea waste biomass pyrolysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 137, p. 54-61, 2018.
- 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, p. 611-630, 2011.
- NIU, Y.; LV, Y.; LEI, Y.; LIU, S.; LIANG, Y.; WANG, D.; HUI, S. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109395, 2019.
- NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa Energética**: Caracterização da Biomassa. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis SC, 2007.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Convenção quadro sobre mudanças do clima**. Conferência das partes Vigésima primeira sessão, Paris, p. 42, 2015.
- OPENSHAW, K. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, n. 1, p. 1-15, 2000.
- PARIKKA, M. Global biomass fuel resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, p. 613-620.
- PESSOA, A.M.S.; MANN, R.S.; SANTOS, A.G.; RIBEIRO, M.F.L. Influência da maturação de frutos na germinação, vigor e teor de óleo de sementes de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.). **Scientia Plena**, v. 8, n. 7, 2012.

PIERRE, F.; ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Influence of torrefaction on some chemical and energy properties of maritime pine and pedunculate OAK. **BioResources**, v. 6, n. 2, p. 1204–1218, 2011.

PIMCHUAI, A.; DUTTA, A.; BASU, P. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energy Fuel**, v. 24, p. 4638-4645, 2010.

POHL C. Jatropha: money doesn't grow on trees ten reasons why Jatropha is neither a profitable nor sustainable investment. Friends of the Earth International, 2010.

Disponível em: https://www.foei.org/wp-content/uploads/2013/12/jatropha_FoEIreport.pdf

Acesso em: 12 set. 2019.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. da C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus spp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

RASHID, U.; ANWAR, F.; JAMIL, A.; BHATTI, H. N. *Jatropha curcas* seed oil as a viable source for biodiesel. **Pakistan Journal of Botany**, v. 42, p. 575-582, 2010.

REGATIERI, Helton R. **Estudo da termodegradação em biodiesel de soja e gordura animal**, 2016, Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P. Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* wood. **Cerne**, v. 15, p. 446-452, 2009.

ROSCOE, R. O que muda com a liberação do plantio de pinhão-manso no Brasil? Catálogo da Indústria do Biodiesel, 2008.

Disponível em: http://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/convidado/muda-liberacao-plantiopinhao-manso-brasil-07-02-08.htm.

Acesso em: 06 maio 2019.

RÓZ, A. L. da; 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**, v. 19, n. 8, p. 810-814, 2015.

SALEMA, A, A.; AFZAL, M. T.; MOTASEMI, F. Is there synergy between carbonaceous material and biomass during conventional pyrolysis? A TG-FTIR approach. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 217-226, 2014.

SANTOS, O. N. A.; FOLEGATTI, M. V.; DUTRA, L. M.; ANDRADE, I. P.; FANAYA JÚNIOR, E. D.; LENA, B. P.; BARISON, A.; SANTOS, A. D. C. Tracking lipid profiles of *Jatropha curcas* L. seeds under diferente prunning types and water managements by low-field and HR-MAS NMR spectroscopy. **Industrial Crops and Products**, v. 109, p. 918-922, 2017a.

SANTOS, S. B.; MARTINS, M. A.; CARNEIRO, A. C. O. Energy potential of coproducts generated from *Jatropha curcas* L. biodiesel production. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 3, p. 574-579, 2017b.

- SANTOS, O. N. A. Irrigação e tipos de poda no cultivo de pinhão-manso em Piracicaba-SP, p. 118, 2016. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, 2016.
- 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.
- SATO, M.; BUENO, O. C.; ESPERANCINI, M. S. T.; FRIGO, E. P. A cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.): uso para fins combustíveis e descrição agronômica. **Revista Varia Scientia**, v. 07, n. 13, p. 46-62, 2009.
- SATURNINO, H.M.; PACHECO, D.D.; KAKIDA, J.; TOMINAGA, N.; GONÇALVES, N.P. Cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 44–78, 2005.
- SHUIT, S. H.; LEE, K. T.; KAMARUDDIN, A. H.; YUSUP, S. Reactive extraction and *in situ* esterification of *Jatropha curcas* L. seeds for the production of biodiesel. **Fuel**, v. 89, p. 527-530, 2009.
- SILVA, C. M. S. da; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; CARVALHO, A. G.; CÂNDIDO, W. L. Biomass torrefaction for energy purposes Definitions and na overview of challenges and opportunities in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2426-2432, 2018.
- SILVA, D. A. da; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.
- SINGH, B.; SINGH, K.; RAO, G. R.; CHIKARA, J.; KUMAR, D.; MISHRA, D. K.; SAIKIA, S. P.; PATHRE, U. V.; RAGHUVANSHI, N.; RAHI, T.; TULI, R. Agrotechnology of *Jatropha curcas* for diverse environmental conditions in India. **Biomass and Bioenergy**, v. 48, p. 191-202, 2013.
- SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.
- SRICHAROENCHAIKUL, V.; ATONG, D. Thermal decomposition study on *Jatropha curcas* L. waste using TGA and fixed bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, p. 155-162, 2009.
- SUAREZ, P. A. Z.; SANTOS, A. L. F.; RODRIGUES, J. P.; ALVES, M. B. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizálos. **Química Nova,** São Paulo, v. 32, p. 768–775, 2009.

- TALERO, G.; RINCÓN, S.; GÓMEZ, A. Biomass torrefaction in a standard retort: a study on oil palm solid residues. **Fuel**, v. 244, p. 366-378, 2019.
- TAPANES, N. C. O.; GOMES A. D. A.; CARNEIRO, M. J. W.; ANTUNES, C. O. A. Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: theoretical and experimental studies of biodiesel reaction. **Fuel**, v. 87, p. 2286-2295, 2008.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY TAPPI. Industry preparation of wood for chemical analysis (Including procedures for removal of extractives an determination of moisture content). TAPPI T-12 05-75, p. 21, 1975.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY TAPPI. Industry lignin in wood, TAPPI 222 05-74, p.12, 1974.
- TOMELERI, J. O. P.; VALENTIM, L. B.; SILVA, J. P. da; YAMAJI, F. M. PÁDUA, F. A. Caracterização química e energética de epicarpo residual do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) e briquete produzido. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, p. 942-952, 2017.
- TORAL, O. C.; IGLESIAS, J. M.; OCA, S. M.; SOTOLONGO, J. A.; GARCÍA, S.; TORSTI, M. *Jatropha curcas* L., una especie arbórea con potencial energético en Cuba. **Pastos y Forrajes**, v. 31, n. 3, p. 1, 2008.
- TRUGILHO, P. F.; DA SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 45-53, 2001.
- TUMULURU, J. S.; SOKHANSANJ, S.; HESS, R. J.; WRIGHT, C. T.; BOARDMAN, R. D. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Industrial Biotechnology**, v. 7, p. 384-401, 2011
- VALE, A. T.; GENTIL, L. V.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F. Caracterização energética da biomassa e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica* L.) e de madeira (*Cedrorana catenaeformis*), **Congresso Internacional De Agroenergia E Biocombustíveis**, Teresina, 2007.
- VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.
- VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 3748-3762, 2011.
- VARMA, A. K.; MONDAL, P. Pyrolysis of pine needles: effects of process parameters on products yield and analysis of products. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, p. 2057-2072, 2017.

- VIÇOSI, K. A.; FREITAS, I. A. S.; SILVA, E. C.; COSTA, J. P.; SILVA, J. F.; BARROSO, F. M.; OLIVEIRA, L. A. B.; SILVA, C. L. T.; MATOS, F. S. Cienciometria: análise qualitativa e quantitativa da literatura científica global sobre estresses abióticos em *Jatropha curcas* L. **Revista Agri-Environmental Sciences**, v. 4, n. 2, 2018.
- VIEIRA, A. C. M. Universidade Estadual do Oeste do Paraná UNIOESTE, janeiro 2012. Caracterização da Biomassa Proveniente de Resíduos Agrícolas para Geração de Energia. Orientador: Samuel Nelson Melegari de Souza; Co-orientador: Reinaldo A. Baricatti. 2012.
- VIRGENS, I. O.; CASTRO, R. D.; LOUREIRO, M. B.; FERNANDEZ, L. G. Review: *Jatropha curcas* L.: morphophysiological and chemical aspects. **Braz. J. Food Technol.**, v. 20, 2017.
- WANG, G. J.; LUO, Y. H.; DENG, J.; KUANG, J. H.; ZHANG, Y. L. Pretreatment of biomass by torrefaction. **Chin Sci Bull**, v. 56, p. 1442-1448, 2011.
- WILD, P.J.; DEN UIL, H.; REITH, J.H.; KIEL, J.H.A.; HEERES, H.J. Biomass valorisation by staged degasification: A new pyrolysis-based thermochemical conversion. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, p. 124–133, 2009.
- XU, C.; LIAO, B.; PANG, S.; NAZARI, L.; MAHMOOD, N.; TUSHAR, M. S. H. K.; DUTTA, A.; RAY, M. B. Biomass Energy. **Comprehensive Energy Systems**, v. 1, p. 770-794, 2018.
- YANG, X.; KANG, K.; QIU, L.; ZHAO, L.; SUN, R. Effects of carbonization conditions on the yield and fixed carbon content of biochar from pruned apple tree branches. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1691-1699, 2020.