

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, este
arquivo será disponibilizado somente a
partir de
02/02/2025.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JÚNIOR DA SILVA CAMARGO

**AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DAS
BIOMASSAS E DOS *BIOCHARS* DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS
PARA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO**

Ilha Solteira

2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA E QUÍMICA

JÚNIOR DA SILVA CAMARGO

**AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DAS
BIOMASSAS E DOS *BIOCHARS* DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS
PARA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – SP, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais. Área de concentração: Química dos Materiais.

Prof. Dr. Michael Jones da Silva
Orientador

Dra. Sonia Tomie Tanimoto
Coorientadora

Ilha Solteira

2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C173a Camargo, Júnior da Silva.
Avaliação e comparação do potencial das biomassas e dos biochars de
macrófitas aquáticas para adsorção de azul de metileno / Júnior da Silva
Camargo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
82 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Química dos Materiais,
2023

Orientador: Michael Jones da Silva
Co-orientador: Sonia Tomie Tanimoto
Inclui bibliografia

1. *Eichhornia crassipes*. 2. *Egeria najas*. 3. Pirólise. 4. Bio-carvão.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CIB/D - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DAS BIOMASSAS E DOS BIOCHARS DE MACROFITAS AQUÁTICAS PARA ADSORÇÃO DE AZUL DEMETILENO

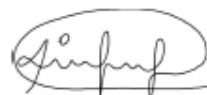
AUTOR: JÚNIOR DA SILVA CAMARGO

ORIENTADOR: MICHAEL JONES DA SILVA

COORDINADORA: SONIA TOMIE TANIMOTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência dos Materiais,
área: Química dos Materiais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MICHAEL JONES DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia - Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC)
Campus de Rosana - UNESP



Prof. Dr. LEANDRO FERREIRA PINTO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia - Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC)
Campus de Rosana - UNESP



Profa. Dra. ANDREIA FATIMA ZANETTE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia - Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC)
Campus de Rosana - UNESP



Ilha Solteira, 02 de fevereiro de 2023

DEDICATÓRIA

Inicialmente este trabalho seria dedicado inteiramente a minha filha Júlia D'Ippolito Camargo. Mas com a triste ocorrência do falecimento do meu pai Mario Arnaldo Caetano de Camargo compartilho a dedicatória deste trabalho com os dois.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me proporcionado força, fé, sabedoria, inteligência e discernimento em todo este período.

A minha família, meus pais Maria de Lourdes da Silva e Mario Arnaldo Caetano de Camargo, a minha irmã Juliana da Silva Camargo, por todo amor, carinho e afeto. Em especial a minha querida e maravilhosa filha Júlia D'Ippolito Camargo, que um dia está pesquisa seja motivo do seu orgulho.

A minha namorada Vitoria Aparecida Kull Prestes, que me acompanhou, incentivou e esteve sempre me ajudando nos momentos mais difíceis que passei durante a reta final desta jornada.

A toda equipe de pesquisadores, analistas e colegas de trabalho do Instituto SENAI de Inovação em Biomassa (ISI Biomassa) em especial aos meus companheiros que trabalharam diretamente comigo no Projeto MACROFUEL: Sonia Tomie Tanimoto, Fernando Alves Ferreira, Layssa Aline Okamura, Paulo Renato dos Santos, Vitor Vinícius Anjos Bonfim Ribeiro e Julia Sanchez Barbosa, por toda ajuda e incentivo que me proporcionaram nesse momento.

Ao meu grande amigo de longa data Dr. Fabrício Cerizza Tanaka pela ajuda e incentivo no ingresso ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais de Ilha Solteira – SP.

Ao meu orientador Dr. Michael Jones da Silva e minha coorientadora Dra. Sonia Tomie Tanimoto, por toda dedicação, paciência, companheirismo e confiança durante essa etapa do trabalho.

Ao Dr. Willian Pereira Gomes, que me auxiliou na reta final de conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas do Grupo de Materiais Inteligentes e Aplicações (Grupo de Pesquisa), por todas as ajudas, discussões e reflexões.

Ao Projeto MACROFUEL, SISTEMA FIEMS e ao Instituto SENAI de Inovação em Biomassa pela estrutura para o desenvolvimento desse trabalho e ao SENAI DN e SENAI DR/MS, a EMBRAPPII e a CTG BRASIL pelo apoio e suporte financeiro.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – SP (FEIS), e o Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais pela oportunidade concedida.

A CAPES pelo apoio financeiro ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM) do campus de Ilha Solteira-SP.

E a todas as pessoas que de uma forma contribuíram e influenciaram direta e indiretamente para realização dessa conquista.

A todos a minha eterna gratidão.

“O trabalho científico não pode ser considerado do ponto de vista de sua utilização imediata. É preciso fazê-lo pelo que é em si, pela ciência. Depois, ficará aberta para sempre a possibilidade de que uma descoberta científica se transforme em benefício para a humanidade.”

Albert Einstein.

LISTA DE ABREVIATÖES

%	porcento;
%[AM] _{adsorvido}	percentual de AM adsorvido;
%AM _{adsorvido} /m _{adsorvente}	percentual de azul de metileno adsorvido por massa de adsorvente;
%AM _{meio}	percentual de azul de metileno no meio da solução;
%CF	teor de carbono fixo;
%H	teor de hidrogênio;
%m/m	percentual massa/massa;
%U	teor de umidade;
%V	teor de material volátil;
%Z	teor de cinzas;
[AM] _{adsorvido}	concentração de azul de metileno adsorvido;
[AM] _{meio}	concentração de azul de metileno no meio da solução;
[AM] _{meio(final)}	concentração final de azul de metileno no meio da solução;
[AM] _{meio(inicial)}	concentração inicial de azul de metileno no meio da solução;
>MED _{mAMadsorvido/madsorvente}	maior média dentre todos os tempos de adsorções analisados da massa de azul de metileno adsorvido por massa de adsorvente;
°C	grau Celsius;
Abs _{diluída}	absorbância diluída;
Abs _{real}	absorbância real;
AM	azul de metileno;
BBOT	2,5-bis(5-terc-butil-benzoxazol-2-il)tiofeno;
cm	centímetro;
coef _{angular}	coeficiente angular da equação da reta;

coef _{linear}	coeficiente linear da equação da reta;
dil _{amostra}	diluição da amostra;
DTG	derivada termogravimétrica;
EDX	energia dispersiva de raios-X;
eV	elétron-volt;
FTIR	espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier;
g	grama;
g/L	grama por litro;
H/C	relação atômica da razão hidrogênio/carbono;
He	hélio;
ICP-OES	espectroscopia de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado;
ISI Biomassa	Instituto SENAI de Inovação em Biomassa;
kg	quilograma;
kV	quilovolt;
L	litro;
m _{adsorvente}	massa de adsorvente;
mAM _{adsorvido} /m _{adsorvente}	massa de azul de metileno adsorvido por massa de adsorvente;
mAM _{adsorvido} /m _{adsorvente}	massa de azul de metileno adsorvido por massa de adsorvente;
MEC	macrófita <i>Eichhornia crassipes</i> ;
MEN	macrófita <i>Egeria najas</i> ;
MEV	microscopia eletrônica de varredura;
mg	miligrama;
mg/g	miligrama por grama;

mg/kg	miligrama por quilograma;
mg/L	miligrama por litro;
MJ/kg	megajoule por quilograma;
mL	mililitro;
mL/min	mililitro por minuto;
mm	milímetro;
mmH ₂ O	milímetro de água;
mol/L	mol por litro;
nm	nanômetro;
O/C	relação atômica da razão oxigênio/carbono;
PCI	poder calorífico inferior;
PCS	poder calorífico superior;
<i>RG</i>	rendimento gasoso;
<i>RL</i>	rendimento líquido;
rpm	rotação por minuto;
<i>RS</i>	rendimento sólido;
s	segundo;
TG	análise termogravimétrica;
UV-Vis	espectrofotometria de ultravioleta na região do visível;
V _{adsorvato}	volume de adsorvato.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração de uma biomassa lignocelulósica.	22
Figura 2. Ilustração das principais formas biológicas das macrófitas aquáticas.	23
Figura 3. Monitoramento da proliferação da macrófita aquática <i>Nymphoides indica</i> no Balneário Municipal de Três Lagoas-MS.	24
Figura 4. a) Macrófita aquática <i>MEC</i> . b) Macrófita aquática <i>MEN</i>	25
Figura 5. Fórmula estrutural do corante azul de metileno.	27
Figura 6. a) Secagem ao sol das biomassas de macrófitas aquáticas <i>MEC</i> e <i>MEN</i> . b) Biomassas de macrófitas aquáticas <i>MEC</i> e <i>MEN</i> preparadas para serem trituradas.	30
Figura 7. a) Picador triturador forrageiro utilizado para trituração das macrófitas. b) Biomassa de macrófita aquática triturada em granulometria de 20 mesh (0,8 mm).	31
Figura 8. a) Sistema de volatilização de biomassa de reator de leito fixo modelo SIVOMO-250 utilizado nos processos de pirólise para obtenção dos <i>biochars</i> de macrófitas aquáticas. b) Esquema do sistema de volatilização de biomassa de reator de leito fixo modelo SIVOMO-250.....	32
Figura 9. Curva e derivada termogravimétrica das biomassas de macrófitas aquáticas. a) TG da <i>MEC</i> . b) DTG da <i>MEC</i> . c) TG da <i>MEN</i> . d) DTG da <i>MEN</i>	44
Figura 10. <i>Biochars</i> da macrófita aquática <i>MEN</i> obtidos em diferentes temperaturas através do processo termoquímico de pirólise. a) <i>Biochar</i> obtido a 300 °C. b) <i>Biochar</i> obtido a 500 °C. c) <i>Biochar</i> obtido a 750 °C.	48
Figura 11. <i>Biochars</i> da macrófita aquática <i>MEC</i> obtidos em diferentes temperaturas através do processo termoquímico de pirólise. a) <i>Biochar</i> obtido a 500 °C. b) <i>Biochar</i> obtido a 750 °C.	49
Figura 12. Espectros de FTIR da amostra de biomassa da macrófita aquática <i>MEC</i> e dos <i>biochars</i> obtidos pelo processo de pirólise nas temperaturas de 500 e 750 °C.	54

Figura 13. Espectros de FTIR da amostra de biomassa da macrófita aquática <i>MEN</i> e dos <i>biochars</i> obtidos pelo processo de pirólise nas temperaturas de 300, 500 e 750 °C.	55
Figura 14. Microimagens da macrófita aquática <i>MEC</i> e dos <i>biochars</i> . a) Biomassa. b) <i>Biochar</i> de 500 °C. c) <i>Biochar</i> de 750 °C.	57
Figura 15. Microimagens da macrófita aquática <i>MEN</i> e dos <i>biochars</i> . a) Biomassa. b) <i>Biochar</i> de 300 °C. c) <i>Biochar</i> de 500 °C. d) <i>Biochar</i> de 750 °C.	57
Figura 16. Análise de EDX. a) Microimagem da biomassa de <i>MEC</i> . b) Espectro de EDX da biomassa de <i>MEC</i> . c) Microimagem do <i>biochar</i> de 500 °C da <i>MEC</i> . d) Espectro de EDX do <i>biochar</i> de 500 °C da <i>MEC</i> . e) Microimagem do <i>biochar</i> de 750 °C da <i>MEC</i> . f) Espectro de EDX do <i>biochar</i> de 750 °C da <i>MEC</i>	58
Figura 17. Representação gráfica comparativa da porcentagem de peso dos elementos identificados pela análise de EDX da <i>MEC</i> e seus respectivos <i>biochars</i> em diferentes temperaturas.	59
Figura 18. Análise de EDX. a) Microimagem da biomassa de <i>MEN</i> . b) Espectro de EDX da biomassa de <i>MEN</i> . c) Microimagem do <i>biochar</i> de 300 °C da <i>MEN</i> . d) Espectro de EDX do <i>biochar</i> de 300 °C da <i>MEN</i> . e) Microimagem do <i>biochar</i> de 500 °C da <i>MEN</i> . f) Espectro de EDX do <i>biochar</i> de 500 °C da <i>MEN</i> . g) Microimagem do <i>biochar</i> de 750 °C da <i>MEN</i> . h) Espectro de EDX do <i>biochar</i> de 750 °C da <i>MEN</i>	60
Figura 19. Representação gráfica comparativa da porcentagem peso dos elementos identificados pela análise de EDX da <i>MEN</i> e seus respectivos <i>biochars</i> em diferentes temperaturas.	61
Figura 20. Percentual de adsorvato adsorvido em função do tempo de adsorção da macrófita <i>MEC</i> e dos <i>biochars</i> . a) Biomassa. b) <i>Biochar</i> de 500 °C. c) <i>Biochar</i> de 750 °C.	62
Figura 21. Percentual de adsorvato adsorvido em função do tempo de adsorção da macrófita <i>MEN</i> e dos <i>biochars</i> . a) Biomassa. b) <i>Biochar</i> de 300 °C. c) <i>Biochar</i> de 500 °C. d) <i>Biochar</i> de 750 °C.	64

Figura 22. Massa de adsorvato adsorvido por massa de adsorvente em função do tempo de adsorção da macrófita aquática *MEC* e dos *biochars*. **a)** Biomassa. **b)** *Biochar* de 500 °C. **c)** *Biochar* de 750 °C..... **65**

Figura 23. Massa de adsorvato adsorvido por massa de adsorvente em função do tempo de adsorção da macrófita aquática *MEN* e dos *biochars*. **a)** Biomassa. **b)** *Biochar* de 300 °C. **c)** *Biochar* de 500 °C. **d)** *Biochar* de 750 °C. **66**

Figura 24. Percentual de adsorvato adsorvido por massa de adsorvente em função do tempo de adsorção da macrófita aquática *MEC* e dos *biochars*. **a)** Biomassa. **b)** *Biochar* de 500 °C. **c)** *Biochar* de 750 °C..... **67**

Figura 25. Percentual de adsorvato adsorvido por massa de adsorvente em função do tempo de adsorção da macrófita aquática *MEN* e dos *biochars*. **a)** Biomassa. **b)** *Biochar* de 300 °C. **c)** *Biochar* de 500 °C. **d)** *Biochar* de 750 °C. **68**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condições utilizadas na análise elementar das amostras de macrófitas aquáticas e dos <i>biochars</i>	36
Tabela 2. Condições operacionais do equipamento Calorímetro Isoperibol automático para análise das amostras de macrófitas aquáticas e dos <i>biochars</i>	37
Tabela 3. Parâmetros operacionais das condições da análise de ICP-EOS das amostras de macrófitas aquáticas.....	38
Tabela 4. Resultados da análise imediata das macrófitas aquáticas <i>MEC</i> e <i>MEN</i>	43
Tabela 5. Resultado da análise de espectroscopia de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado das amostras de macrófitas aquáticas <i>MEC</i> e <i>MEN</i>	46
Tabela 6. Rendimentos obtidos nos processos termoquímicos de pirólise da biomassa da macrófita aquática <i>MEN</i> e <i>MEC</i> em diferentes temperaturas de trabalho.	49
Tabela 7. Resultados da análise elementar (CHNS-O) e a relação atômica da razão H/C e O/C da biomassa da macrófita aquática <i>MEC</i> e dos <i>biochars</i> obtidos no processo de pirólise à 500 e 750 °C.....	51
Tabela 8. Resultados da análise elementar (CHNS-O) e a relação atômica da razão H/C e O/C da biomassa da macrófita aquática <i>MEN</i> e dos <i>biochars</i> obtidos no processo de pirólise à 300, 500 e 750 °C.....	52
Tabela 9. Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) das amostras de biomassa de <i>MEC</i> e dos <i>biochars</i> obtidos nas temperaturas de 500 e 750 °C.	53
Tabela 10. Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) das amostras de biomassa de <i>MEN</i> e dos <i>biochars</i> obtidos nas temperaturas de 300, 500 e 750 °C.	53

RESUMO

As macrófitas *Eichhornia crassipes* (MEC) e *Egeria najas* (MEN) são as principais plantas aquáticas invasoras identificadas no rio Paraná na divisa dos estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo. Essas biomassas amplamente disponíveis e com pouca visibilidade têm potencial para produção de *biochars*. Por isso, o presente trabalho visou estudar e avaliar o potencial dessas biomassas lignocelulósicas e dos *biochars* obtidos a partir do processo termoquímico de pirólise nas temperaturas de 500 e 750 °C para a MEC e 300, 500 e 750 °C para a MEN, para a adsorção do corante azul de metileno (AM) em solução aquosa. As propriedades dos materiais lignocelulósicos e dos *biochars* foram investigados através de análise imediata, análise termogravimétrica (TG/DTG), espectroscopia de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), análise elementar (CNHS-O), poder calorífico, espectroscopia de absorção no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e energia dispersiva de raios-X (EDX). A MEN apresentou um maior rendimento de obtenção de *biochar* com 83,67 %m/m e teor de metais superior a MEC demonstrado pela análise de ICP-OES. As curvas TG/DTG apresentaram comportamentos similares para ambas as macrófitas, com 4 estágios de decomposição relacionados à perda de massa. O FTIR e a análise elementar apresentaram uma redução de grupos funcionais e nos teores de hidrogênio e oxigênio, respectivamente, com o aumento da temperatura de pirólise. Observou através das microimagens obtidas pelo MEV que os materiais apresentam estruturas heterogêneas e irregulares com tamanhos distintos. O *biochar* da MEC obtido em 500 °C apresentou uma melhor eficiência na capacidade adsortiva do corante azul de metileno, com uma remoção de 93,13% de AM em um período de 360 minutos.

Palavras-chave: *Eichhornia crassipes*; *Egeria najas*; pirólise; bio-carvão.

ABSTRACT

The macrophytes *Eichhornia crassipes* and *Egeria najas* are the main invasive aquatic plants found in the Parana River on the border between the states of Mato Grosso do Sul and São Paulo. A wide variety of biomasses, which are widely available and have little visibility, may be suitable for biochar production. Therefore, the current study aimed to study and evaluate the potential of lignocellulosic biomasses and biochars obtained from the thermochemical pyrolysis process at temperatures of 500 and 750 °C for *Eichhornia crassipes* and 300, 500, and 750 °C for *Egeria najas* for the adsorption of methylene blue (MB) dye in aqueous solution. By performing immediate analyses, thermogravimetric analyses (TGA/DTGA), inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-OES), elemental analyses (CNHS-O), calorific value, Fourier transform infrared absorption spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive X-ray analysis, we were able to determine the properties of the lignocellulosic materials and biochars. As demonstrated by ICP-OES analysis, *Egeria najas* produces biochar at a higher rate (83.67 % m/m) and contains a higher level of metal content than *Eichhornia crassipes*. In both macrophytes, TGA/DTGA curves showed similar behavior, with four stages of decomposition related to mass loss. FTIR and elemental analysis revealed a reduction in functional groups and hydrogen and oxygen contents, respectively, as the pyrolysis temperature increased. According to the microimages obtained by SEM, the materials present heterogeneous and irregular structures. *Eichhornia crassipes* biochar obtained at 500 °C displayed an improved adsorptive capacity for methylene blue dye, removing 93.13% of AM within 360 minutes.

Keywords: *Eichhornia crassipes*; *Egeria najas*; pyrolysis; biochar.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	<i>Biomassa Lignocelulósica</i>	21
2.2	<i>Macrófitas Aquáticas</i>	22
2.3	<i>Pirólise</i>	25
2.4	<i>Biochar</i>	26
2.5	<i>Azul de Metileno e Adsorção</i>	27
3	OBJETIVOS	29
3.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	29
3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	29
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
4.1	<i>Obtenção e Preparação das Macrófitas Aquáticas.....</i>	30
4.2	<i>Obtenção dos Biochars de Macrófitas Aquáticas</i>	31
4.3	<i>Análise Imediata</i>	33
4.3.1	<i>Determinação do Teor de Umidade (%U).....</i>	33
4.3.2	<i>Determinação do Teor de Material Volátil (%V).....</i>	34
4.3.3	<i>Determinação do Teor de Cinzas (%Z)</i>	34
4.3.4	<i>Determinação do Teor de Carbono Fixo (%CF)</i>	35
4.4	<i>Análise Termogravimétrica (TG) e Derivada Termogravimétrica (DTG)</i>	35
4.5	<i>Análise Elementar (CHNS-O)</i>	35
4.6	<i>Poder Calorífico</i>	37
4.7	<i>Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).....</i>	38
4.8	<i>Espectroscopia de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	38
4.9	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</i>	39
4.10	<i>Energia Dispersiva de Raios-X (EDX)</i>	39
4.11	<i>Estudo de Adsorção</i>	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	<i>Análise Imediata</i>	43

5.2	<i>Análise Termogravimétrica (TG) e Derivada Termogravimétrica (DTG)</i>	44
5.3	<i>Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)</i>	46
5.4	<i>Rendimentos Obtidos do Processo Termoquímico de Pirólise</i>	48
5.5	<i>Análise Elementar (CHNS-O)</i>	51
5.6	<i>Poder Calorífico</i>	53
5.7	<i>Espectroscopia de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	54
5.8	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	56
5.9	<i>Energia Dispersiva de Raios-X (EDX)</i>	58
5.10	<i>Estudo de Adsorção</i>	62
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7	IMPACTO E RELEVÂNCIA CIENTÍFICO-SOCIAL	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A terminologia macrófitas aquáticas, segundo o *International Biological Programme* (IBP), é designado para os vegetais que habitam desde de brejos até ambientes totalmente submersos, com base no contexto ecológico e nos aspectos taxonômicos (DO NASCIMENTO *et al.*, 2007).

As macrófitas desempenham funções efetivas nos ecossistemas terrestres e principalmente nos aquáticos, pois fornecem *habitat* e suprimentos nutricionais para alguns animais aquáticos, além de desempenhar um papel ambiental importante como acumulador de nutrientes, metais e na diversidade e distribuição de outros organismos (SOUZA, 2011; HAROON, 2022).

Entretanto, em casos de crescimento excessivo, ocasionam problemas ambientais, como obstrução da passagem de luz e redução dos níveis de oxigênio da água, que prejudicam a vida de outras plantas e animais daquele ecossistema. E problemas econômicos como a produção de energia nas usinas hidrelétricas devido à obstrução dos canais de fluxo de água que giram as turbinas (SOUZA, 2011; HAROON, 2022; SANTOS *et al.*, 2018).

A biomassa aquática é um potencial material lignocelulósico e tem sido considerado biomassa de terceira geração (ALVES *et al.*, 2019). Essa biomassa, tais como plantas aquáticas invasoras, especialmente macrófitas, têm sido estudadas para fitorremediação (MUSTAFA *et al.*, 2021), produção de biogás (KOYAMA *et al.*, 2015), liquefação hidrotérmica (KUMAR *et al.*, 2019), produção de bioetanol (ANKER *et al.*, 2016) e pirólise (SANTOS *et al.*, 2018). Comparada à biomassa lignocelulósica terrestre, ela tem a vantagem de não competir com culturas para produção de alimentos que requerem grandes áreas agrícolas, assim como não exigir enormes quantidades de água, fertilizantes e competir com o abastecimento de alimentos (POURKARIMI *et al.*, 2019; RAFA *et al.*, 2021). Além disso, essa biomassa contém materiais lignocelulósicos como celulose, hemicelulose e lignina, que são quimicamente similares à biomassa terrestre (DUTRA *et al.*, 2019). Ela é uma matéria-prima favorável para a produção de bioenergia devido a sua rápida taxa de crescimento, alta densidade energética, taxa de sequestro de dióxido de carbono, alta capacidade fotossintética, alta capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa,

forte adaptabilidade e, como já mencionado, ao fato de não competir com a produção de alimentos para uso terrestre (POURKARIMI *et al.*, 2019).

Entre os bioprodutos que podem ser obtidos por meio da pirólise da biomassa de macrófita destaca-se seu elevado potencial para produção de *biochar* (bio-carvão). *Biochar* é um material rico em carbono e cinzas (material inorgânico), obtido através de processos térmicos em temperaturas que variam entre 300 e 1200 °C com taxa de aquecimento constante e em atmosfera controlada (LI *et al.*, 2020; MENA, 2014; WEBER; QUICKER, 2018).

Devido ao alto teor de carbono, o *biochar* torna-se atrativo para diversas aplicações industriais, sendo utilizado na agricultura para melhoria e correção do solo e no tratamento de efluentes industriais, atuando na adsorção de metais pesados e corantes têxteis (TRIPATHI *et al.*, 2016).

Estudos apontam que os *biochars* produzidos a partir de biomassa lignocelulósica apresentam potencial para remoção de corantes em soluções aquosas, compostos estes que não são biodegradáveis e muitos deles tóxicos e cancerígenos. Devido o *biochar* apresentar uma estrutura porosa bem desenvolvida e uma variedade de grupos funcionais (principalmente os oxigenados) na superfície, tem um desempenho eficiente em processos adsorptivos de remoção de poluentes orgânicos, devido à interação das moléculas orgânicas na superfície dos *biochars* com as moléculas dos poluentes (PÉREZ-MORALES *et al.*, 2019; FAN *et al.*, 2017; FRANCISKI *et al.*, 2018; DAI *et al.*, 2019).

Segundo Fan e colaboradores (2017) o *biochar* obtido da pirólise de resíduos de lodo doméstico apresentou uma remoção de 100% do corante azul de metileno. Ahmad e colaboradores (2020) realizaram um estudo comparando a eficiência adsorptiva de *biochars* obtidos a partir da pirólise de resíduos de casca de arroz, esterco de vaca e lodo doméstico. E constataram que os materiais apresentaram uma remoção de cerca de 91-99% do corante azul de metileno da solução. Riguetto e colaboradores (2020) realizaram um estudo utilizando a raiz da macrófita *Eichhornia crassipes* (MEC), também conhecida como jacinto d'água ou aguapé, para remoção do corante reativo vermelho BF-4B, e obtiveram uma eficiência de adsorção de 95% do corante. Pérez-Morales e colaboradores (2019) utilizaram a macrófita aquática *Salvinia minima* para remoção do corante AM, obtendo como resultado entre 75-78% de remoção.

Carneiro e colaboradores (2022) utilizaram o caule e as folhas da macrófita aquática *MEC* para adsorção do corante azul de metileno. O caule apresentou uma adsorção de 90,8% e as folhas de 89,9%. Santos e colaboradores (2015) utilizaram a macrófita aquática *Salvinia sp* para o estudo de adsorção do corante AM e apresentou uma eficiência de 93% de remoção do corante.

Na literatura podemos encontrar alguns trabalhos utilizando *biochars* provenientes da pirólise de plantas aquáticas para remoção do corante azul de metileno, no entanto, não há evidências de trabalhos usando *biochars* obtidos da pirólise de macrófitas aquáticas *MEC* e *MEN* para essa finalidade. Nesse sentido, o presente estudo visa a obtenção de *biochars* provenientes das macrófitas aquáticas *MEC* e *MEN* para aplicação na adsorção do corante azul de metileno em solução aquosa e comparar a eficiência da remoção das biomassas aquáticas estudadas. Os materiais obtidos foram caracterizados para investigar as propriedades físicas, químicas e morfológicas por meio das análises imediata e elementar, espectroscopia de emissão atômica e de FTIR, microscopia eletrônica de varredura, poder calorimétrico e análise termogravimétrica (TG/DTG).

7 IMPACTO E RELEVÂNCIA CIENTÍFICO-SOCIAL

Este trabalho impacta em três vertentes distintas:

Relevância social: produção de um material de valor agregado a partir de um resíduo sem aplicações definidas, que tem a possibilidade de promover benefícios à sociedade e ao meio ambiente;

Relevância ambiental: destinação nobre e sustentável para as macrófitas aquáticas, que devido a sua elevada proliferação provoca uma série de problemas aos ecossistemas e a sociedade;

Relevância científica: geração de novos resultados obtidos no estudo, que ficaram disponíveis para comunidade científica e social, afim de ampliar a disseminação do conhecimento.

REFERÊNCIAS

ABDELHAFEZ, A. A.; LI, J. Removal of Pb (II) from aqueous solution by using biochars derived from sugar cane bagasse and orange peel. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Amsterdam, v. 61, p. 367-375, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Carvão vegetal**: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Carvão vegetal**: análise Imediata. Rio de Janeiro, 2015.

AHMAD, A.; KHAN, N.; GIRI, B. S.; CHOWDHARY, P.; CHATURVEDI, P. Removal of methylene blue dye using rice husk, cow dung and sludge biochar: Characterization, application, and kinetic studies. **Bioresource technology**, Amsterdam, v. 306, p. 123202, 2020.

ALEIXO, M. H. F.; QUIRINO, B. A.; YOFUKUJI, K. Y.; CARDOZO, A. L. P.; FUGI, R. Macrophyte biomass mediates trophic relationships between congeneric fishes and invertebrate communities. **Limnologia**, Muenchen, p. 125957, 2022.

ALVES, J. L. F.; DA SILVA, J. C. G.; DA SILVA FILHO, V. F.; ALVES, R. F.; DE ARAUJO GALDINO, W. V.; DE SENA, R. F. Kinetics and thermodynamics parameters evaluation of pyrolysis of invasive aquatic macrophytes to determine their bioenergy potentials. **Biomass and bioenergy**, Oxford, v. 121, p. 28-40, 2019.

AMIN, M. T.; ALAZBA, A. A.; SHAFIQ, M. Comparative study for adsorption of methylene blue dye on biochar derived from orange peel and banana biomass in aqueous solutions. **Environmental monitoring and assessment**, Dordrecht, v. 191, n. 12, p. 1-14, 2019.

ANKER, Y.; NAKONECHNY, F.; NIAZOV, B.; LUGOVSKOY, S.; NISNEVITCH, M. Biofuel production by fermentation of water plants and agricultural lignocellulosic by-products. *In*: **MATEC web of conferences**. EDP Sciences, 2016. p. 12005.

BRAZ, C. E. M. **Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2014.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical engineering journal**, Amsterdam, v. 91, n. 2-3, p. 87-102, 2003.

CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G.; UCHIMIYA, M.; NOVAK, J. M.; RO, K. S. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource technology**, Amsterdam, v. 107, p. 419-428, 2012.

CARNEIRO, M. T.; BARROS, A. Z.; MORAIS, A. I.; CARVALHO MELO, A. L.; BEZERRA, R. D.; OSAJIMA, J. A.; SILVA-FILHO, E. C. Application of water hyacinth biomass (*Eichhornia crassipes*) as an adsorbent for methylene blue dye from aqueous medium: Kinetic and isothermal study. **Polymers**, San Jose, v. 14, n. 13, p. 2732, 2022.

CHEN, L.; LI, F.; WEI, Y.; LI, G.; SHEN, K.; HE, H. J. High cadmium adsorption on nanoscale zero-valent iron coated *Eichhornia crassipes* biochar. **Environmental Chemistry Letters**, Heidelberg, v. 17, n. 1, p. 589-594, 2019.

CHEN, T.; LI, L.; ZHAO, R.; WU, J. Pyrolysis kinetic analysis of the three pseudocomponents of biomass—cellulose, hemicellulose and lignin. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v. 128, n. 3, p. 1825-1832, 2017.

DAI, Y.; ZHANG, N.; XING, C.; CUI, Q.; SUN, Q. The adsorption, regeneration and engineering applications of biochar for removal organic pollutants: a review. **Chemosphere**, Oxford, v. 223, p. 12-27, 2019.

DE AZEVEDO, C. G.; DOS SANTOS, R. J.; HIRANOBE, C. T.; ZANETTE, A. F.; JOB, A. E.; SILVA, M. J. The invasive *Egeria densa* macrophyte and its potential as a new renewable energy source: A study of degradation kinetics and thermodynamic parameters. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 856, p. 158979, 2023.

DIEFENBACH, S. S.; DA SILVA, W. L.; LOURENÇO, J. B. Adsorção de azul de metileno utilizando cabelo humano natural e calcinado. **Disciplinarum Scientia Ciências Naturais e Tecnológicas**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 85-98, 2019.

DO NASCIMENTO B. K. M.; PIEDADE, M. T. F.; KIRCHNER, F. F. Biomassa aérea e submersa de uma herbácea semi-aquática da várzea da Amazônia Central. **Revista Brasileira de Biociências**, [s. l.], v. 5, n. S1, p. 429-431, 2007.

DOAN, V. D.; TRAN, T. K. N.; NGUYEN, A. T.; TRAN, V. A.; NGUYEN, T. D. Comparative study on adsorption of cationic and anionic dyes by nanomagnetite supported on biochar derived from *Eichhornia crassipes* and *Phragmites australis* stems. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, Amsterdam, v. 16, p. 100569, 2021.

DUKU, M. H.; GU, S.; HAGAN, E. B. Biochar production potential in Ghana—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 15, n. 8, p. 3539-3551, 2011.

DUTRA, J. C.; PASSOS, M. F.; NASCIMENTO, L. A. S.; MACIEL FILHO, R.; MOCKAITIS, G. Biodegradability study of *Egeria densa* biomass using acid and basic pre-treatments for use in bioprocessing of energy products. **Bioresource technology reports**, Kidlington, v. 6, p. 279-284, 2019.

EBRAHIMBABAIE, P.; MEEINKUIRT, W.; PICHTEL, J. Phytoremediation of engineered nanoparticles using aquatic plants: Mechanisms and practical feasibility. **Journal of Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 93, p. 151-163, 2020.

EDUARDO. Elódea – Egeria najas. **Amazônica Aquários**, 2011. Disponível em: <http://paisagismoaquatico.blogspot.com/2011/09/elodea-egeria-najas.html>. Acesso em: 24, maio, 2022.

ELMORSI, T. M. Equilibrium isotherms and kinetic studies of removal of methylene blue dye by adsorption onto miswak leaves as a natural adsorbent. **Journal of Environmental Protection**, Irvine, v. 2, n. 06, p. 817, 2011.

ESTEVEES, F. A. Fundamentos de Limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2011.

FAN, S.; TANG, J.; WANG, Y.; LI, H.; ZHANG, H.; TANG, J.; WANG, Z.; LI, X. Biochar prepared from co-pyrolysis of municipal sewage sludge and tea waste for the adsorption of methylene blue from aqueous solutions: Kinetics, isotherm, thermodynamic and mechanism. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v. 220, p. 432-441, 2016.

FAN, S.; WANG, Y.; WANG, Z.; TANG, J.; TANG, J.; LI, X. Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: Adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 5, n. 1, p. 601-611, 2017.

FERREIRA-LEITAO, V.; GOTTSCHALK, L. M.; FERRARA, M. A.; NEPOMUCENO, A. L.; MOLINARI, H. B. C.; BOM, E. P. Biomass residues in Brazil: availability and potential uses. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 1, n. 1, p. 65-76, 2010.

FRANCISKI, M. A.; PERES, E. C.; GODINHO, M.; PERONDI, D.; FOLETTO, E. L.; COLLAZZO, G. C.; DOTTO, G. L. Development of CO₂ activated biochar from solid wastes of a beer industry and its application for methylene blue adsorption. **Waste Management**, Oxford, v. 78, p. 630-638, 2018.

HAROON, A. M. Review on aquatic macrophytes in Lake Manzala, Egypt. **The Egyptian Journal of Aquatic Research**, Amsterdam, v. 48, p. 1-12, 2022.

HOSLETT, J.; GHAZAL, H.; MOHAMAD, N.; JOUHARA, H. Removal of methylene blue from aqueous solutions by biochar prepared from the pyrolysis of mixed municipal discarded material. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 714, p. 136832, 2020.

HUNG, C. M.; CHEN, C. W.; HUANG, C. P.; DONG, C. D. Degradation of 4-nonylphenol in marine sediments using calcium peroxide activated by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)-derived biochar. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 211, p. 113076, 2022.

JI, B.; WANG, J.; SONG, H.; CHEN, W. Removal of methylene blue from aqueous solutions using biochar derived from a fallen leaf by slow pyrolysis: Behavior and mechanism. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 7, n. 3, p. 103036, 2019.

JUNIOR, M. J. O. **Uso de Macrófitas da Espécie *Pistia stratiotes* (alface d'água) como combustível sólido para fornalhas industriais, uma análise de viabilidade técnica e econômica**. 2011. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2011.

KALIL, P.; BOJARCZUK, T. A importância das macrófitas aquáticas. **UFSCar Universidade Federal de São Carlos**. São Carlos, 2017. Disponível em: https://www.ufscar.br/~probio/info_importancia.html. Acesso em: 17, setembro, 2020.

KINATA, S. E.; LOUBAR, K.; PARASCHIV, M.; BELLONCLE, C.; TAZEROUT, M. Combination of pyrolysis and hydrolquefaction of CCB-treated wood for energy recovery: Optimization and products characterization. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 118, p. 315-322, 2012.

KOYAMA, M.; YAMAMOTO, S.; ISHIKAWA, K.; BAN, S.; TODA, T. Enhancing anaerobic digestibility of lignin-rich submerged macrophyte using thermochemical pre-treatment. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 99, p. 124-130, 2015.

KUMAR, V.; KUMAR, S.; CHAUHAN, P. K.; VERMA, M.; BAHUGUNA, V.; JOSHI, H. C.; AHMAD, W.; NEGI, P.; SHARMA, N.; RAMOLA, B.; RAUTELA, I.; NANDA, M.; VLASKIN, M. S. Low-temperature catalyst based hydrothermal liquefaction of harmful macroalgal blooms, and aqueous phase nutrient recycling by microalgae. **Scientific reports**, London, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2019.

KUMARI, K.; SWAIN, A. A.; KUMAR, M.; BAUDDH, K. Utilization of Eichhornia crassipes biomass for production of biochar and its feasibility in agroecosystems: a review. **Environmental Sustainability**, Heidelberg, v. 4, n. 2, p. 285-297, 2021.

LEAL, P. V. B.; GREGÓRIO, A. M.; OTONI, E.; DA SILVA, P. R.; KRAUSER, M. O.; HOLZBACH, J. C. Estudo da adsorção do corante azul de metileno em resíduos de babaçu. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Tocantis, v. 3, n. 4, p. 166-171, 2012.

LENG, L.; HUANG, H. An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. **Bioresource technology**, Amsterdam, v. 270, p. 627-642, 2018.

LI, F.; SHEN, K.; LONG, X.; WEN, J.; XIE, X.; ZENG, X.; LIANG, Y.; WEI, Y.; LIN, Z.; HUANG, W.; ZHONG, R. Preparation and characterization of biochars from Eichhornia crassipes for cadmium removal in aqueous solutions. **PloS one**, San Francisco, v. 11, n. 2, p. e0148132, 2016.

- LI, Q.; TANG, L.; HU, J.; JIANG, M.; SHI, X.; ZHANG, T.; LI, Y.; PAN, X. Removal of toxic metals from aqueous solution by biochars derived from long-root *Eichhornia crassipes*. **Royal Society open science**, London, v. 5, n. 10, p. 180966, 2018.
- LI, S.; CHEN, G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures. **Waste Management**, Oxford, v. 78, p. 198-207, 2018.
- LI, W.; ZHOU, J.; DING, H.; FU, H.; LIU, J.; CHEN, Y.; DAI, T.; LOU, Q.; ZHONG, X.; FAN, H.; ZHONG, J. Low-dose biochar added to sediment improves water quality and promotes the growth of submerged macrophytes. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 742, p. 140602, 2020.
- LIU, C.; YE, J.; LIN, Y.; WU, J.; PRICE, G. W.; BURTON, D.; WANG, Y. Removal of Cadmium (II) using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) biochar alginate beads in aqueous solutions. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 264, p. 114785, 2020.
- MEILI, L.; LINS, P. V. S.; COSTA, M. T.; ALMEIDA, R. L.; ABUD, A. K. S.; SOLETTI, J. I.; DOTTO, G. L.; TANABE, E. H.; SELLAOUI, L.; CARVALHO, S. H. V.; ERTO, A. Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: experimental investigation and phenomenological modelling. **Progress in biophysics and molecular biology**, Oxford, v. 141, p. 60-71, 2019.
- MENA, L. E. H. **Estudo Experimental da Pirólise lenta de Bambu (*Dendrocalamus giganteus* Munro) e Caracterização do Carvão Vegetal**. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- MOURA, M. A. M.; FRANCO, D. A. S.; MATALLO, M. B. Manejo integrado de macrófitas aquáticas. **Divulgação Técnica Biológico**, [s. l.], p. 77-82, 2009.
- MUSTAFA, H. M.; HAYDER, G. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, v. 12, n. 1, p. 355-365, 2021.
- NAKASHIMA, G. T.; ADHMANN, I. C. S.; HANSTED, A. L. S.; BELINI, G. B.; WALDMAN, W. R.; YAMAJI, F. M. Materiais lignocelulósicos: caracterização e produção de briquetes. **Revista Virtual de Química**, Niteroi, v. 9, n. 1, p. 150-162, 2017.
- ONG, H. C.; CHEN, W. H.; FAROOQ, A.; GAN, Y. Y.; LEE, K. T.; ASHOKKUMAR, V. Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 113, p. 109266, 2019.
- PEDRALLI, G. Macrófitas aquáticas como bioindicadoras da qualidade da água: alternativas para usos múltiplos de reservatórios. **Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas**, [s. l.], p. 171-188, 2003.

PENIDO, E. S. **Conversão Pirolítica de Lodo de Esgoto a Biocarvão e Seu Uso na Remediação de Ambientes Contaminados**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Química). – Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

PÉREZ-MORALES, J. M.; SÁNCHEZ-GALVÁN, G.; OLGUÍN, E. J. Continuous dye adsorption and desorption on an invasive macrophyte (*Salvinia minima*). **Environmental Science and Pollution Research**, Oxford, v. 26, n. 6, p. 5955-5970, 2019.

POO, K. M.; SON, E. B.; CHANG, J. S.; REN, X.; CHOI, Y. J.; CHAE, K. J. Biochars derived from wasted marine macro-algae (*Saccharina japonica* and *Sargassum fusiforme*) and their potential for heavy metal removal in aqueous solution. **Journal of environmental management**, Amsterdam, v. 206, p. 364-372, 2018.

POURKARIMI, S.; HALLAJISANI, A.; ALIZADEHDAKHEL, A.; NOURALISHAHI, A. Biofuel production through micro-and macroalgae pyrolysis—A review of pyrolysis methods and process parameters. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 142, p. 104599, 2019.

PRABAKARAN, K.; LI, J.; ANANDKUMAR, A.; LENG, Z.; ZOU, C. B.; DU, D. Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: A review. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 138, p. 28-37, 2019.

RAFA, N.; AHMED, S. F.; BADRUDDIN, I. A.; MOFIJUR, M.; KAMANGAR, S. Strategies to produce cost-effective third-generation biofuel from microalgae. **Frontiers in Energy Research**, Lausanne, 2021.

RAHMAN, A.; FARROK, O.; HAQUE, M. M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 161, p. 112279, 2022.

RIGUETO, C. V. T.; PICCIN, J. S.; DETTMER, A.; ROSSETO, M.; DOTTO, G. L.; SCHMITZ, A. P. O.; PERONDI, D.; FREITAS, T. S. M.; LOSS, R. A.; GERALDI, C. A. Q. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) roots, an amazon natural waste, as an alternative biosorbent to uptake a reactive textile dye from aqueous solutions. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 150, p. 105817, 2020.

SAKHIYA, A. K.; ANAND, A.; AIER, I.; VIJAY, V. K.; KAUSHAL, P. Suitability of rice straw for biochar production through slow pyrolysis: product characterization and thermodynamic analysis. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, p. 100818, 2021.

SALVADOR, E. C. C. **Levantamento de algumas espécies de macrófitas aquáticas no lago Caiua na comunidade de Teresina III no município de Tabatinga-AM**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em

Ciências Biológicas – Licenciatura). – Centro de Estudos Superiores de Tabatinga-CESTB, Universidade do Estado do Amazonas, Tabatinga, 2019.

SANTAMARIA, L.; BEIROW, M.; MANGOLD, F.; LOPEZ, G.; OLAZAR, M.; SCHMID, M.; LI, Z.; SCHEFFKNECHT, G. Influence of temperature on products from fluidized bed pyrolysis of wood and solid recovered fuel. **Fuel**, Oxford, v. 283, p. 118922, 2021.

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

SANTOS, G.; MÓDENES, A.; OLIVEIRA, A.; BEZERRA, I.; BRAGIÃO, M.; TASCHIN, A. Aproveitamento Da Macrófita Salvinia Sp. E Do Palito De Erva-Mate Como Materiais Adsorventes De Corante. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 7215-7221, 2015.

SANTOS, L. O.; SILVA, F. F.; SANTOS, L. C.; CARREGOSA, I. S.; WISNIEWSKI JR, A. Potential bio-oil production from invasive aquatic plants by microscale pyrolysis studies. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Sao Paulo, v. 29, p. 151-158, 2018.

SARAVANAN, A; KUMAR, P. S.; JEEVANANTHAM, S.; KARISHMA, S.; VO, D. N. Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 344, p. 126203, 2022.

SILVA, P. B. R. **Análise espaço temporal de áreas contaminadas por compostos aromáticos em município do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo**. 2022. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Taubaté, São Paulo, 2022.

SILVEIRA, F. F. Eichhornia crassipes. **Flora Campestre**, 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/floracampestre/eichhornia-crassipes-aguape/>>. Acesso em: 24, maio, 2022.

SON, E. B.; POO, K. M.; CHANG, J. S.; CHAE, K. J. Heavy metal removal from aqueous solutions using engineered magnetic biochars derived from waste marine macro-algal biomass. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 615, p. 161-168, 2018.

TING, W. H. T.; TAN, I. A. W.; SALLEH, S. F.; WAHAB, N. A. Application of water hyacinth (Eichhornia crassipes) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. **Journal of water process engineering**, [s. l.], v. 22, p. 239-249, 2018.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 55, p. 467-481, 2016.

VALADÃO, L.; DUARTE, C.; ANDRADE, G.; SANTOS, D. D. L.; FILHO, P. S. Estudo comparativo dos bio-óleos obtidos por pirólises rápida e lenta do caroço de pêssgo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, p. 757-764, 2021.

VENCESLAU, A. D. F. A.; MENDONÇA, A. C.; CARVALHO, L. B.; FERREIRA, G. M. D.; THOMASI, S. S.; PINTO, L. M. A. Removal of methylene blue from an aqueous medium using atemoya peel as a low-cost adsorbent. **Water, Air, & Soil Pollution**, Dordrecht, v. 232, n. 11, p. 1-18, 2021.

VIEIRA, G. E. G.; NUNES, A. P.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, p. 167-178, 2014.

VIEIRA, G. E. G.; SILVEIRA, C. D.; CUTRIM, J.; RIBEIRO, J. Avaliação dos principais aspectos da fitorremediação aplicados na redução da poluição no solo e água. **Engenharia Ambiental**, Espirito Santo do Pinhal, v. 8, n. 2, p. 182-192, 2011.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, Oxford, v. 217, p. 240-261, 2018.

WU, W.; YANG, M.; FENG, Q.; MCGROUTHER, K.; WANG, H.; LU, H.; CHEN, Y. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. **Biomass and bioenergy**, Oxford, v. 47, p. 268-276, 2012.

XU, D.; LI, Z.; WANG, P.; BAI, W.; WANG, H. Aquatic plant-derived biochars produced in different pyrolytic conditions: spectroscopic studies and adsorption behavior of diclofenac sodium in water media. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, Amsterdam, v. 17, p. 100275, 2020.

YI, Y.; WANG, X.; MA, J.; NING, P. Fe (III) modified Egeria najas driven-biochar for highly improved reduction and adsorption performance of Cr (VI). **Powder Technology**, Amsterdam, v. 388, p. 485-495, 2021.

YI, Y.; WANG, X.; MA, J.; NING, P. An efficient Egeria najas-derived biochar supported nZVI composite for Cr (VI) removal: Characterization and mechanism investigation based on visual MINTEQ model. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 189, p. 109912, 2020.

YI, Y.; WANG, X.; ZHANG, Y.; MA, J.; NING, P. Adsorption properties and mechanism of Cr (VI) by Fe₂ (SO₄)₃ modified biochar derived from Egeria najas. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 645, p. 128938, 2022.

YOGALAKSHMI, K. N.; SIVASHANMUGAM, P.; KAVITHA, S.; KANNAH, Y.; VARJANI, S.; ADISHKUMAR, S.; KUMAR, G. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. **Chemosphere**, Oxford, v. 286, p. 131824, 2022.

ZHOU, Y.; LIU, L.; LI, M.; HU, C. Algal biomass valorisation to high-value chemicals and bioproducts: recent advances, opportunities and challenges. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 344, p. 126371, 2022.