



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL

**OBTENÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DO RESÍDUO DE
CASCA DO EUCALIPTO BRANCO**

Danrley Kristyam Rosa Dutra

Lajeado/RS, junho de 2021

Danrley Kristyam Rosa Dutra

OBTENÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DO RESÍDUO DE CASCA DO EUCALIPTO BRANCO

Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Química Industrial, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Cláucia Fernanda Volken de Souza.

Lajeado/RS, junho de 2021

RESUMO

O carvão ativado é o material mais utilizado nos processos de adsorção de diferentes substâncias, entre as quais se destacam os de corantes de efluentes industriais. Novas formas de obtenção deste produto tem sido estudadas, como, a partir de resíduos agroindustriais, que são materiais de elevada disponibilidade e custo reduzido. Os resíduos gerados pelo beneficiamento da madeira, como cascas, lascas e serragem, muitas vezes não têm um reaproveitamento adequado, sendo destinados a compostagens, aterros ou até a incineração, gerando um problema ambiental. Visando atender a estas duas demandas, o objetivo deste foi obter um carvão ativado a partir do resíduo de cascas de eucalipto branco como adsorvente para corantes. Os materiais foram submetidos à ativação com $ZnCl_2$ e $NaOH$, seguido por pirólise a $550^\circ C$ em atmosfera inerte de N_2 e lavagem com água. Foi realizada a caracterização do material por análise elementar de carbono orgânico total (TOC) e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS), análise termogravimétrica (ATG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os ensaios de adsorção foram realizados visando avaliar a capacidade de adsorção dos materiais obtidos e compará-los com o carvão ativado comercial, utilizando as isotermas de adsorção para análise. Os resultados indicam que o carvão ativado com $NaOH$ apresentou melhor desempenho que o carvão ativado com $ZnCl_2$, com eficiência de remoção do corante acima de 70% em 6 minutos e acima de 80% após 20 minutos de adsorção, resultados que se igualam aos obtidos para o carvão ativado comercial. Os três carvões analisados obtiveram um melhor ajuste dos dados para o modelo de Langmuir, com R^2 igual a 1. Entre os diferentes tipos de ativação, foi obtido um melhor resultado para a ativação com $NaOH$, verificando também que houve um processo de lavagem ineficaz na amostra produzida com $ZnCl_2$. Estes resultados são satisfatórios para a obtenção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais, com eficiência na remoção do corante que se assemelha ao carvão ativado comercial, tornando-se uma alternativa viável para produção de adsorventes e diminuição da disposição de resíduos, abrindo caminho para novos estudos de aprimoramento e aplicação neste tema.

Palavras-chave: Carvão ativado. Cascas de eucalipto branco. Adsorção. Azul de metileno.

ABSTRACT

Activated carbon is the material most used in the adsorption processes of different substances, among which those of dyes from industrial effluents stand out. New ways of obtaining this product have been studied, such as from agro-industrial residues, which are materials of high availability and low cost. The residues generated by the processing of wood, such as bark, chips and sawdust, are often not properly reused, being destined for composting, landfills or even incineration, generating an environmental problem. Aiming to meet these two demands, the objective of this was to obtain an activated carbon from the residue of white eucalyptus bark as an adsorbent for dyes. The materials were subjected to activation with ZnCl_2 and NaOH , followed by pyrolysis at 550°C in an inert atmosphere of N_2 and washing with water. The material was characterized by elemental analysis of total organic carbon (TOC) and energy dispersion X-ray spectroscopy (EDS), thermogravimetric analysis (ATG) and scanning electron microscopy (SEM). The adsorption tests were carried out to evaluate the adsorption capacity of the materials obtained and compare them with commercial activated carbon, using the adsorption isotherms for analysis. The results indicate that activated carbon with NaOH performed better than activated carbon with ZnCl_2 , with dye removal efficiency above 70% in 6 minutes and above 80% after 20 minutes of adsorption, results that are equal to those obtained for commercial activated carbon. The three carbons analyzed had a better fit of the data for the Langmuir model, with R^2 equal to 1. Among the different types of activation, a better result was obtained for activation with NaOH , also verifying that there was an ineffective washing process in the sample produced with ZnCl_2 . These results are satisfactory for obtaining activated carbon from agro-industrial residues, with efficiency in removing the dye that resembles commercial activated carbon, becoming a viable alternative for the production of adsorbents and reduction of waste disposal, opening the way for new studies for improvement and application in this theme.

Keywords: Activated carbon. White eucalyptus bark. Adsorption. Methylene blue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre um carvão comum e um carvão ativado	17
Figura 2 – Grupos funcionais mais frequentes na superfície de carvões ativados....	18
Figura 3 – Processo de ativação química do carvão ativado	19
Figura 4 – Comportamentos das isotermas de adsorção	23
Figura 5 – Classificações mais comuns das isotermas de adsorção	24
Figura 6 – Estrutura química do corante azul de metileno (AM).....	29
Figura 7 – Fluxograma das etapas de trabalho experimental.....	33
Figura 8 – Adaptação na tampa do forno mufla para entrada do N ₂	35
Figura 9 - Amostras obtidas de carvão ativado com ativação por ZnCl ₂ (a) e NaOH (b)	39
Figura 10 - Micrografias do carvão ativado com NaOH (A) e ZnCl ₂ (B)	42
Figura 11 – Curvas ATG dos carvões ativados com NaOH (A) e ZnCl ₂ (B)	47
Figura 12 – Espectros de energia dispersiva em raios X para o carvão ativado com NaOH (A) e ZnCl ₂ (B)	51
Figura 13 – Curva de calibração para o azul de metileno	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resíduos florestais gerados por tipo e método de disposição, 2018.....	15
Tabela 2 – Carvões ativados obtidos a partir de materiais carbonáceos	16
Tabela 3 – Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química	21
Tabela 4 – Relação entre n e a natureza da adsorção.....	26
Tabela 5 – Classificação dos corantes, aplicação, características e exemplos.....	28
Tabela 6 – Amostras de carvão ativado que foram preparadas	34
Tabela 7 – Diâmetro médio dos poros dos carvões ativados obtidos	45
Tabela 8 – Resultados da análise de carbono orgânico total nos carvões ativados obtidos.....	49
Tabela 9 – Composição elementar das amostras de carvões obtidas por EDS.....	52
Tabela 10 – Parâmetros obtidos das isotermas de Langmuir e Freundlich para a adsorção do corante azul de metileno.....	55
Tabela 11 – Eficiência do processo de adsorção dos carvões ativados	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	Associação brasileira dos produtores de florestas plantadas
AM	Azul de Metileno
ATG	Análises termogravimétricas
BEN	Balanço Energético Nacional
BET	Método Brunauer, Emmet e Teller
CA	Carvão Ativado
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IBA	Indústria Brasileira de Árvores
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RS	Resíduos Sólidos
TOC	Carbono Orgânico Total

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	111
1.1.1 Objetivo geral.....	111
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
1.2 Justificativa.....	12
2 REVISÃO TEÓRICA	144
2.1 Eucalipto	144
2.2 Carvão ativado.....	155
2.2.1 Produção de carvão ativado.....	188
2.2.2 Produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais	199
2.3 Adsorção.....	200
2.3.1 Fatores que influenciam na adsorção	211
2.3.2 Isotermas de adsorção	222
2.3.2.1 Isoterma de Langmuir	255
2.3.2.2 Isoterma de Freundlich	266
2.4 Corantes.....	266
2.4.1 Azul de metileno	299
2.5 Carvão ativado obtido de resíduo para adsorção de corantes	300
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	322
3.1 Materiais.....	322
3.2 Metodologia	322
3.3 Preparação dos carvões ativados.....	333
3.4 Caracterização dos carvões ativados obtidos.....	355
3.4.1 Rendimento.....	366
3.4.2 Microscopia eletrônica de varredura	366
3.4.3 Análise termogravimétrica	366

3.4.4 Análise elementar	366
3.4.4.1 Carbono orgânico total	366
3.4.4.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia	377
3.4.5 Análise de adsorção das amostras por espectroscopia UV/VIS	377
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	399
4.1 Caracterização dos carvões ativados obtidos.....	3939
4.1.1 Rendimento.....	399
4.1.2 Microscopia eletrônica de varredura	422
4.1.3 Análise termogravimétrica	466
4.1.4.1 Análise elementar de carbono orgânico total (TOC).....	499
4.1.4.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).....	500
4.1.4.3 Análise de adsorção das amostras por espectroscopia UV/VIS	533
5 CONCLUSÃO	599
REFERÊNCIAS.....	611

1 INTRODUÇÃO

O carvão ativado é um material rico em carbono com elevada área superficial e número de poros, que o tornam um ótimo adsorvente (SILVA *et al.*, 2017). Devido a estas características é utilizado em grande escala em processos como, adsorção, catálise, separações de gás e armazenamento de energia (GAO; YUEN; XU; GAO, 2015). No tratamento de efluentes contaminados por corantes, ele é o principal material utilizado, devido sua simplicidade de manipulação e economia na aplicação (DE SALES; BERTOLI; PINTO; MAGRIOTIS, 2015).

Em escala industrial o carvão ativado é um dos adsorventes mais utilizados para processos de adsorção em meio aquoso, e um de seus maiores problemas é o seu alto custo (SCHNEIDER, 2017). De acordo com Marckmann *et al.* (2015), uma das alternativas para contornar este problema é a produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais; estes tornam-se um problema devido ao grande volume e disposição em locais inadequados.

Os resíduos sólidos (RS) quando não tratados corretamente causam danos ao meio ambiente e à sociedade, podendo mencionar agravos a fauna, flora e à saúde dos seres humanos. Neste cenário através da Lei Federal nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, instituiu-se no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe de uma série de diretrizes adotadas pelo Governo Federal em conjunto com os estados e municípios a fim de estabelecer uma administração ambientalmente correta para os resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

O gênero *Eucalyptus* é uma das principais madeiras que abastecem a indústria brasileira, pela fácil adaptação em larga escala e a ampla aplicação do produto

(FRANÇA *et al.*, 2019). De acordo com Viana e Cruz (2016), junto com o *Pinus* são as principais madeiras na obtenção de celulose, sendo que 80% dessa produção é convertida em geração de resíduo, que acaba sendo utilizado como fertilizante e também na correção de solos. Os resíduos gerados no beneficiamento da madeira podem ser classificados de acordo com seu tamanho, como pó, serragem, maravalha, cavacos e lenha; a lenha é composta pelos resíduos de maiores dimensões, por exemplo, o topo da tora, lascas, costaneiras e as cascas (CERQUEIRA *et al.*, 2012).

O carvão vegetal representa uma parcela expressiva da economia do Brasil, de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, o país é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo. Há uma grande diversidade de carvões cujas propriedades podem ser avaliadas, principalmente os advindos de resíduos do beneficiamento da madeira, que podem representar um problema ambiental (FAO, 2014; SILVA *et al.*, 2007).

A obtenção do carvão ativado pode ser feita pelo método físico ou o químico, o método físico se baseia em uma carbonização com atmosfera inerte em temperaturas próximas a 1000°C, já o método químico é resumido em uma impregnação por um agente ativador, que entre os principais estão o $ZnCl_2$, H_3PO_4 e $NaOH$, seguido por uma carbonização em temperaturas próximas a 600°C (ASIMBAYA; ROSAS; ENDARA; GUERRERO, 2015).

Nese contexto, a hipótese deste trabalho é que a casca da madeira de árvores, por ser um resíduo orgânico rico em carbono, pode ser utilizada para produção de carvão ativado que será utilizado como adsorvente de corantes, desde que seja feito um tratamento adequado visando a mais eficiente abertura de seus poros. Para validar esta hipótese foram elencados os objetivos abaixo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Produzir um carvão ativado com diferentes métodos de ativação a partir do resíduo de cascas de eucalipto branco, visando aplicação como adsorvente para o corante azul de metileno.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter o carvão a partir de resíduo vegetal;
- Caracterizar o carvão ativado a partir de análise térmica, morfológica e elementar;
- Avaliar qual o melhor tratamento químico para ativação do carvão;
- Obter uma padronização de granulometria para o carvão ativado;
- Realizar teste de adsorção com o corante azul de metileno e comparar os resultados com o carvão ativado comercial;
- Construir isotermas de adsorção para avaliar o potencial adsorvente do material.

1.2 Justificativa

Com o desenvolvimento industrial, o volume de efluentes e resíduos industriais cresce aceleradamente, os quais devem ser tratados adequadamente antes de lançados ao solo ou corpos hídricos. A fim de minimizar a quantidade desses resíduos, a cada dia aumentam as pesquisas que visam a reutilização desses materiais (COSTA FILHO; SILVA; SILVA; SOUZA, 2017; FILHO; FRANCO, 2015; MARTINS *et al.*, 2015).

As indústrias de beneficiamento da madeira para produção de móveis e construção civil geram uma grande quantidade de resíduos sólidos, como a serragem proveniente do corte das peças e as cascas das toras, que são retiradas durante o pré-tratamento da matéria-prima, estas acabam por muitas vezes serem destinadas a compostagens, aterros ou ainda incineradas (LINHARES; MARCÍLIO; MELO, 2016; PREILIPPER *et al.*, 2016).

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) estima que os resíduos gerados por atividades agrícolas e as agroindústrias no ano de 2016 foram de aproximadamente 335 mil toneladas (SANTOS, 2018). Estes resíduos incluem cascas, bagaços, palhas, sabugos, caules, folhas, raízes, entre outros; são conhecidos como biomassa residual e são constituídos essencialmente por celulose, hemicelulose e lignina (ROCHA; ALMEIDA; CRUZ, 2017).

Quando não tratados corretamente estes resíduos podem ocasionar sérios problemas ambientais e de saúde pública, devido à liberação de compostos que por lixiviação podem contaminar o solo e berçários hídricos; uma das perspectivas é o desenvolvimento de subprodutos a partir destes resíduos, agregando valor a um material até então de baixo custo; como, por exemplo, a obtenção de carvão ativado (COSTA FILHO; SILVA; SILVA; SOUZA, 2017).

Pode-se produzir carvão ativado a partir de uma vasta quantidade de materiais de origem vegetal ou polimérica, uma das matérias-primas de baixo custo de origem vegetal que pode ser utilizada, é a casca do eucalipto branco que após o pré-tratamento das toras, torna-se um resíduo. A utilização destes resíduos como precursores de carvões ativados, além de agregar valor, e reduzir o descarte, também se torna uma opção acessível para o carvão ativado comercial (NAKAMURA; VEIT, 2014; DE SALES; BERTOLI; PINTO; MAGRIOTIS, 2015; GONÇALVES; NAKAMURA; VEIT, 2014).

A contaminação de recursos hídricos por corantes precedentes de indústrias têxteis é um problema ambiental, e a maior dificuldade encontrada neste tipo de efluente é causada pela baixa fixação dos corantes. No entanto, o processo de adsorção com carvão ativado pode ser empregado para o tratamento eficiente deste tipo de efluente por ser simples e de baixo custo (BUGIERECK et al., 2014; CITADIN, 2018).

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Eucalipto

O carvão vegetal é o principal termoreductor utilizado na indústria siderúrgica do Brasil, em 2018 sua produção alcançou 5,7 milhões de toneladas (BRASIL, 2019). A demanda por madeira cresce no Brasil, tanto para fins energéticos como também para o beneficiamento, a escolha da espécie que será utilizada no processo de carbonização, pode interferir em muitas características como densidade, resistência mecânica, umidade, teor de carbono fixo, teores de cinzas e de materiais voláteis (ARRUDA; ANDRADE; JÚNIOR, 2017). Em razão disso crescem os programas que visam o melhoramento de espécies para reflorestamento, aumentando sua resistência e tempo de crescimento (ELOY *et al.*, 2013).

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), em 2018, este segmento foi responsável pela geração de US\$ 12,5 bilhões em exportações para o Brasil, além da geração de 3,8 milhões de empregos de forma direta e indireta e uma geração de R\$ 12,8 bilhões em tributos federais. Isso mostra que o segmento florestal vem crescendo a cada ano no Brasil, em 2015, por exemplo, as exportações somaram US\$ 7,8 bilhões, 4 milhões de empregos e R\$ 10 bilhões em tributos federais (ABRAF, 2016).

Em relação ao eucalipto, o Brasil possui as mais modernas tecnologias para plantio e manejo, porém; um dos grandes desafios é a descentralização das terras das grandes empresas e o incentivo tecnológico de pequenos e médios produtores (ABRAF, 2016).

Em 2018 a geração de resíduos sólidos pelo setor florestal foi de 52 milhões de toneladas, sendo 98% dessa quantidade disposta no solo como forma de adubo e proteção, sem ter um reaproveitamento mais nobre. A Tabela 1 mostra os resíduos gerados, pelo tipo e método de disposição em 2018.

Tabela 1 – Resíduos florestais gerados por tipo e método de disposição, 2018

Atividade	Item	Milhões ton.	%	Destinação Final
Florestal (70,90%)	Cascas, galhos e folhas	36,11	98,00	Mantidas no campo como proteção e adubação do solo
	Óleos, graxas e embalagens de agroquímicos	0,74	2,00	Encaminhados atendendo critérios legais até sua destinação final
Subtotal		36,85	100,00	
Industrial (29,10%)	Cavacos, Serragem e Licor Preto	9,72	63,20	Destinados para geração de energia, por meio da queima em caldeiras
	Cavacos, Serragem a Aparas de Papel	4,52	29,40	Reutilizados como matéria-prima por empresas do setor de árvores plantadas
	Lama de Cal e Cinza de Caldeiras	0,70	4,60	Reutilizados como matéria-prima por outros setores industriais
	Compostos Químicos e Outros	0,43	2,80	Encaminhados para aterros industriais atendendo aos critérios legais
Subtotal		15,37	100,00	
Total		52,22	100,00	

Fonte: IBÁ (2019).

A área plantada de eucalipto no Brasil ocupa cerca de 5,7 milhões de hectares, entre os principais estados onde se concentra o plantio estão Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (16%). O estado do Rio Grande do Sul é o quinto maior em hectares plantados de árvores de eucalipto com 308.657 (IBÁ, 2018).

2.2 Carvão ativado

O carvão ativado (CA) é um material de suma importância no tratamento de efluentes, por interagir bem com diversos materiais, ele é capaz de adsorver moléculas de diversos tamanhos sem modificar a estrutura do substrato (DE SALES; BERTOLI; PINTO; MAGRIOTIS, 2015). Quase todos os tipos de materiais que

possuam um alto teor de carbono podem ser convertidos em carvão ativado, como madeira, ossos de animais, resíduos vegetais, resíduos minerais, petróleo entre outros (SCHNEIDER, 2008). Na Tabela 2 são relacionados alguns trabalhos nos quais o carvão ativado foi obtido a partir de diferentes materiais carbonáceos.

Tabela 2 – Carvões ativados obtidos a partir de materiais carbonáceos

Autor	Material Carbonáceo
Ma et al. (2019)	Fibras ocas de Seringueira (<i>Hevea brasiliensis</i>)
Angin (2014)	Carroço de cereja azeda (<i>Prunus cerasus L.</i>)
Islam et al. (2017)	Cascas de Karanja (<i>Pongamia pinnata</i>)

Fonte: Do autor (2021).

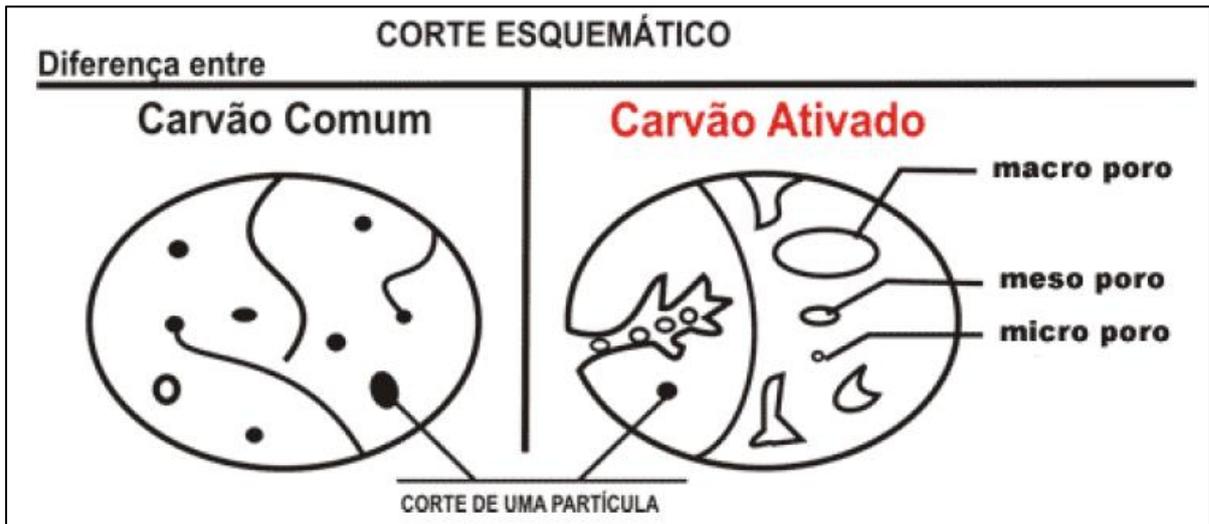
A capacidade adsorptiva do CA está diretamente ligada a diversos fatores, entre eles estão o seu material precursor, a área superficial, porosidade, número de grupos funcionais, e; a fatores de condições experimentais como o pH, temperatura, tempo, agitação e presença de contaminantes (ARAÚJO; GUIOTOKU, 2018; SILVA; DE LIMA; QUINÉIA, 2019).

Uma das propriedades mais importante do CA é o tamanho de seus poros, mesmo sendo um material com predominância em micro poros (diâmetro menor que 20 Å), ele ainda contém meso (diâmetro entre 20 e 500 Å) e macroporos (diâmetro maior que 500 Å), que são importantes na interface adsorvente/adsorbato em meio líquido, enquanto as moléculas grandes interagem com os macros e mesoporos, as moléculas pequenas são adsorvidas nos microporos (MIORANZA, 2015).

Outra característica muito importante do CA é a sua área superficial, em precursores carbonáceos este valor pode variar naturalmente entre 10 e 15 m² g⁻¹, porém; após a carbonização e tratamentos químicos a área superficial pode variar entre 600 e 1500 m² g⁻¹; quanto maior for este valor, mais eficiente será a adsorção (SCHNEIDER, 2008; MIORANZA, 2015).

A forma como o carvão ativado age no processo de adsorção, retendo as partículas dos contaminantes, se deve a sua alta porosidade resultante do processo de ativação, como indica a Figura 1 (CAVALCANTE, 2015).

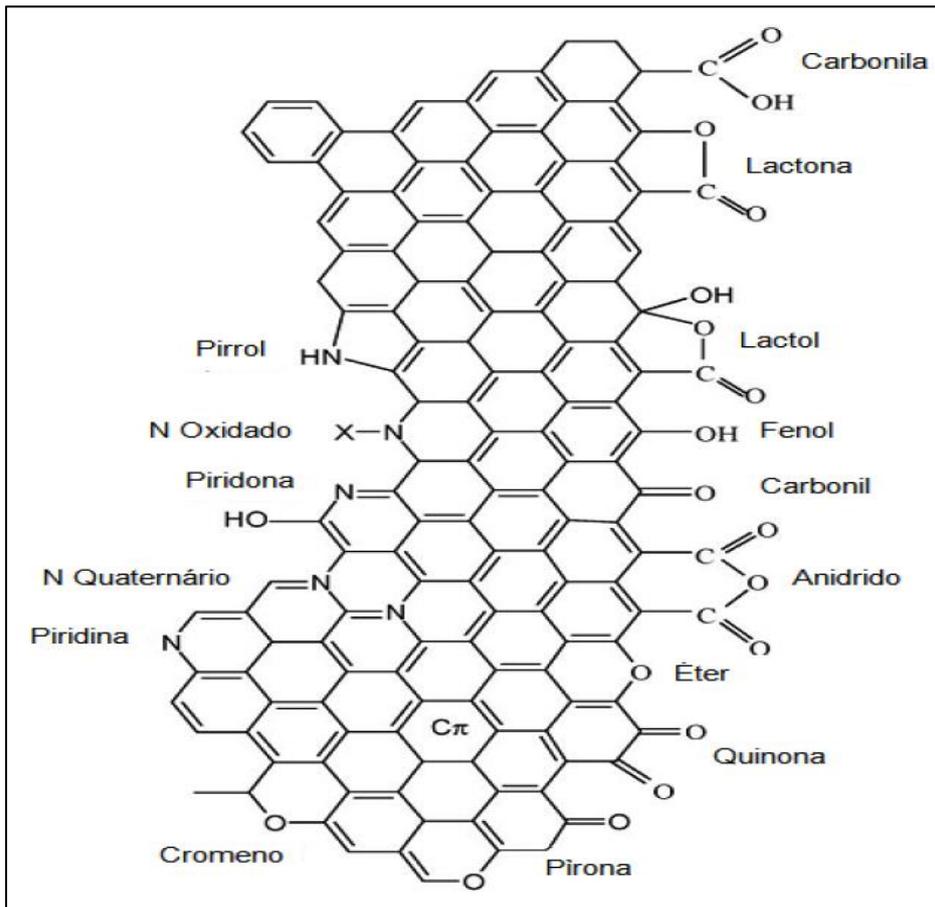
Figura 1 – Diferença entre um carvão comum e um carvão ativado



Fonte: Cavalcante (2015).

Além da porosidade e da área superficial, os grupos funcionais também influenciam na capacidade de adsorção do carvão ativado, causando uma diferença de eletronegatividade muito grande, que afeta a polaridade e o caráter ácido-base do carvão. Eles podem ser resquícios do material precursor utilizado; se formarem durante o processo de ativação ou pela retenção de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio quando expostos ao ar atmosférico (RAMOS, 2014). A Figura 2 mostra os grupos funcionais mais frequentes em carvões ativados.

Figura 2 – Grupos funcionais mais frequentes na superfície de carvões ativados



Fonte: Ramos (2014).

2.2.1 Produção de carvão ativado

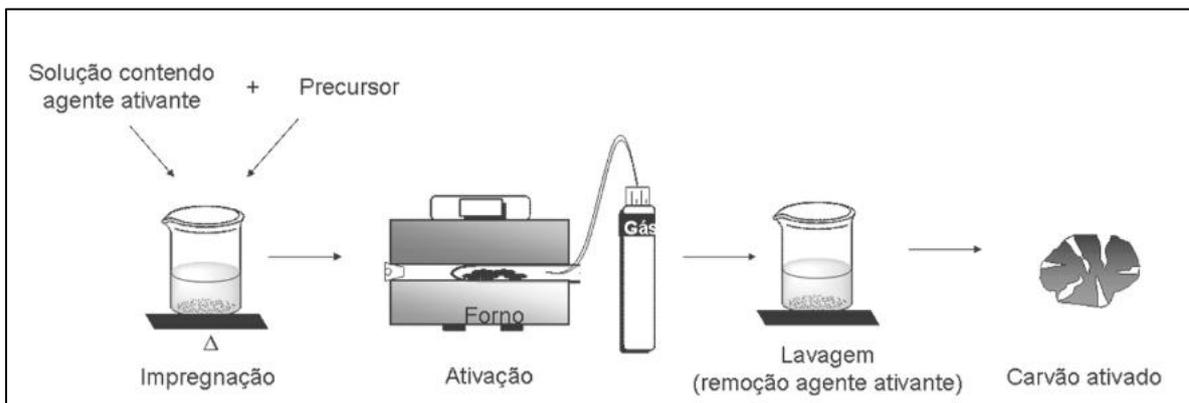
O processo de produção do carvão ativado consiste em duas principais etapas, a ativação que pode ser física ou química e a pirólise em atmosfera inerte que pode ocorrer simultaneamente com a ativação (HEYLMANN, 2015). Na ativação física o material é tratado termicamente em atmosfera levemente reativas como vapor de água e gás carbônico, ocorrendo simultaneamente a ativação e carbonização, onde são liberados umidade e materiais indesejáveis como alcatrão monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio e metano (GONÇALVES; NAKAMURA; VEIT, 2014).

O processo de ativação química se baseia na impregnação prévia do material precursor com agentes químicos que agem na abertura dos poros do carvão aumentando sua área superficial, podem ser usados nesta etapa: ácido fosfórico (H_3PO_4), cloreto de zinco ($ZnCl_2$), hidróxidos de metais alcalinos como o hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH), ou ácido sulfúrico (H_2SO_4); com

posterior carbonização em altas temperaturas e atmosfera inerte. Entre as vantagens na utilização da ativação química ao invés da física, estão economia de energia, maior rendimento de CA, e maior e melhor desenvolvimento da área superficial porosa (SANTOS, 2018).

O processo completo de ativação química em escala de laboratório, é apresentado na Figura 3, em que ocorre a impregnação do material pirolisado pelo agente ativante, seguido da ativação em temperaturas que variam de 400 a 800°C; ao final é necessária uma lavagem do material até que se obtenha um pH neutro, indicando que todo o agente ativante utilizado fora removido (BOLIGON, 2015).

Figura 3 – Processo de ativação química do carvão ativado



Fonte: Castro (2009).

2.2.2 Produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais

Conforme a economia do Brasil cresce, muito impulsionada pela produção agrícola, também aumentam a geração de resíduos agroindustriais, os quais são resultantes do processamento de matérias-primas como couro, fibras, madeira e alimentos. Um dos fatores que fazem com que a agroindústria do Brasil não tenha uma grande ascensão é a grande quantidade de resíduos gerados com potenciais contaminações ambientais (VIANA; CRUZ, 2016). A utilização destes resíduos no desenvolvimento de produtos de valor agregado é uma das alternativas para uma utilização sustentável destes materiais (COSTA FILHO; SILVA; SILVA; SOUZA, 2017).

A utilização de resíduos na produção de adsorventes como carvão ativado vem sendo amplamente estudada. Entre alguns materiais que demonstraram êxito estão casca de arroz (SCHETTINO *et al.*, 2007; LIMA, 2010; MARCKMANN *et al.*, 2015; REIS; SILVA; NEVES, 2015; SCHNEIDER, 2017), casca de banana (BUGIERECK *et al.*, 2014), mesocarpo do coco (RAMOS, 2014), endocarpo de coco (MORAIS *et al.*, 2019), resíduo de casca de acácia negra (LINHARES; MARCÍLIO; MELO, 2016), sabugo de milho (DE SALES; BERTOLI; PINTO; MAGRIOTIS, 2015), resíduos de coco verde (DE ALMEIDA; SILVA, 2017; STOPPE *et al.*, 2019), resíduo de erva-mate (GONÇALVES *et al.*, 2007; ARAÚJO; GUIOTOKU; 2010; LINHARES, 2013), resíduos vegetais (WERLANG; SCHNEIDER; RODRIGUEZ; NIEDERSBERG, 2013), casca de pequi (PATIAS *et al.*, 2015), biomassa amilácea (MOLETTA, 2011), resíduo madeireiro da região Amazônica (NOBRE; MOTTA; CASTRO; BIANCHI, 2015), resíduos do beneficiamento do café (BRUM *et al.*, 2008; CASTRO, 2009; BOLIGON, 2015), cinzas de caldeira (MARTINI, 2017), bagaço de malte (GOLÇALVES *et al.*, 2014; FRANCISKI, 2018;), mesocarpo de coco-da-baía (MORAIS; SANTANA; LELIS; PAES, 2014), casca de soja (FRANÇA *et al.*, 2019), resíduos de coco, banana e laranja (CAVALCANTE, 2015), endocarpo de noz macadâmia e de semente de goiaba (ROCHA; LUZ; LENA; BRUÑA-ROMERO, 2006), casca de batata (ALFREDO, 2013), carroço de pêsego (HEYLMANN, 2015), dendê *in natura* (FERREIRA *et al.*, 2018) e resíduos de bambu (SANTANA *et al.*, 2019).

2.3 Adsorção

A adsorção é um fenômeno físico-químico onde as moléculas de um fluido, são depositadas na superfície de um sólido, ela está relacionada com o equilíbrio entre as duas fases, sendo uma delas o adsorvente que é a superfície onde se depositam as moléculas, e a outra é o adsorbato que é adsorvido no processo da adsorção (FRANCISKI, 2018).

Existem dois tipos de adsorção conhecidos, que são a adsorção física e a adsorção química, suas principais diferenças estão dispostas na Tabela 3. Na adsorção física também chamada de fisissorção, há uma atração por forças de London entre o adsorvente e o adsorbato, que são fracas e longas; fazendo com que

o processo seja rápido e reversível, ocorrendo em mais de uma camada, a entalpia do processo é negativa, as energias liberadas são baixas (CASTRO, 2009).

Na adsorção química ou quimiossorção, a interação entre o adsorvente e o adsorbato é elevada, ocorrendo transferência de elétrons entre eles, o que torna o processo praticamente irreversível; aumentar a temperatura durante a quimiossorção favorece a adsorção, pois a entalpia é positiva, absorvendo calor durante a reação (ALFREDO, 2013).

Tabela 3 – Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química

Adsorção Física	Adsorção Química
Forças de interações longas e fracas, como de Van der Waals	Forças de interações fortes, envolvem transferências de elétrons
Sem transferência de elétrons	Com transferência de elétrons
Calor de adsorção= 2 – 6 kcal mol ⁻¹	Calor de adsorção= 10 – 200 kcal mol ⁻¹
A camada adsorvida pode ser removida por aplicação de vácuo à temperatura de adsorção	A camada adsorvida só é removida por aplicação de vácuo e aquecimento à temperatura acima da adsorção
Formação de multicamadas abaixo da temperatura crítica	Somente formação de monocamadas
Acontece somente abaixo da temperatura crítica	Acontece também a altas temperaturas
Lenta ou rápida	Instantânea
Adsorvente quase não é afetado	Adsorvente altamente afetado na superfície

Fonte: Cavalcante (2015).

2.3.1 Fatores que influenciam na adsorção

Para que se obtenha a maior eficiência possível no processo de adsorção, é necessário que haja o controle de alguns parâmetros, como temperatura, pH, velocidade de agitação, polaridade, concentração inicial de adsorbato, tamanho e forma das partículas, contaminantes e a presença de espécies que competem por sítios de adsorção. Também é necessário industrialmente que o adsorvente escolhido possua uma alta capacidade de adsorção, com alta disponibilidade e baixo custo (SCHNEIDER, 2017).

Como a adsorção geralmente é um processo exotérmico, ela é favorecida pela diminuição da temperatura, na adsorção química o calor de adsorção é superior ao calor latente de condensação, na física são inferiores, porém; torna-se difícil classificar um sistema por estes parâmetros. O pH também possui grande influência, na medida em que muda o grau de ionização dos compostos ácidos e básicos, quando a adsorção é favorecida por pHs mais baixos, ocorre que os íons H⁺ em grande disponibilidade no meio estão neutralizando as cargas negativas que se encontram na superfície do adsorvente (FRANCISKI, 2018).

A superfície do adsorvente possui uma característica polar, devido aos seus diversos grupos funcionais, a polaridade do adsorbato indica se ele terá mais afinidade com o solvente ou com a superfície do adsorvente; grupos polares (hidroxilas, carboxílicos e aminas) tem maior afinidade por metais, aumentando a interação entre íons metálicos e o adsorvente (LESSA, 2018).

2.3.2 Isotermas de adsorção

A isoterma de adsorção é uma curva que relaciona o equilíbrio entre a concentração de adsorbato na fase fluida (C_E), em mg.L⁻¹, e a concentração do adsorbato no adsorvente (Q_e) em mg.g⁻¹, a uma temperatura constante; podem ser obtidas pela Equação 1. A partir da isoterma de adsorção é possível obter informações sobre a capacidade de adsorção do material, bem como estimar uma avaliação econômica quanto a tratamento de impurezas por ele (MORAIS; SANTANA; LELIS; PAES, 2014; ODY, 2014).

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (01)$$

Onde:

q_e: capacidade de adsorção (mg.g⁻¹)

C_o: concentração inicial do adsorbato (mg.L⁻¹)

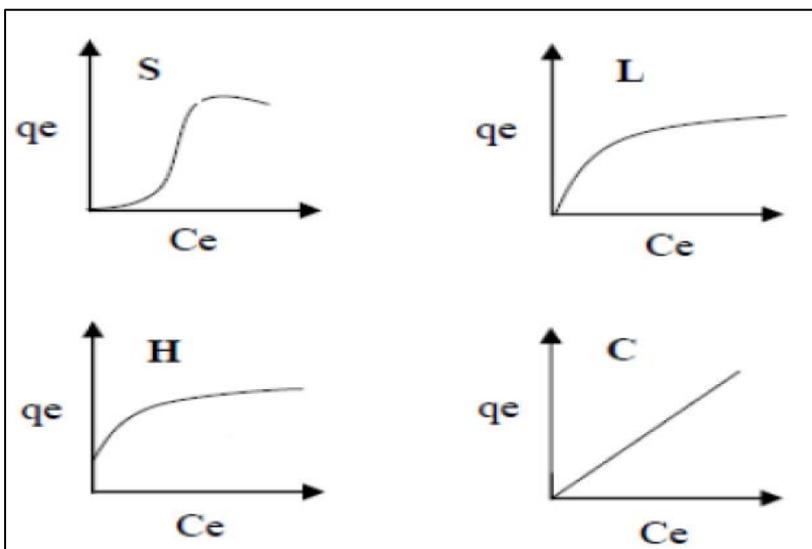
C_e: Concentração de adsorbato no equilíbrio (mg.L⁻¹)

V: volume de solução (fluido) (L)

m: massa de adsorvente (g)

De acordo com Giles, Macewan, Nakhwa e Smith (1960), as isotermas podem ser divididas em quatro classes principais, conforme a sua inclinação inicial, dentro de cada grupo podem existir várias outras subdivisões de acordo com as partes superiores da curva. As classes são denominadas por *Spherical* (S), Langmuir (L), *High affinity* (H) e *Constant partition* (C), que estão apresentadas na Figura 4 (GOUVEIA, 2014).

Figura 4 – Comportamentos das isotermas de adsorção



Fonte: Giles, Macewan, Nakhwa e Smith (1960).

- Isoterma S: Indica que a adsorção inicial é baixa, mas tende a se verticalizar, conforme o aumento das moléculas adsorvidas.

- Isoterma L: Indica uma leve inclinação não-linear com uma pequena concavidade, causada por uma afinidade grande entre o soluto e o adsorvente, em baixas concentrações do soluto e da solução.

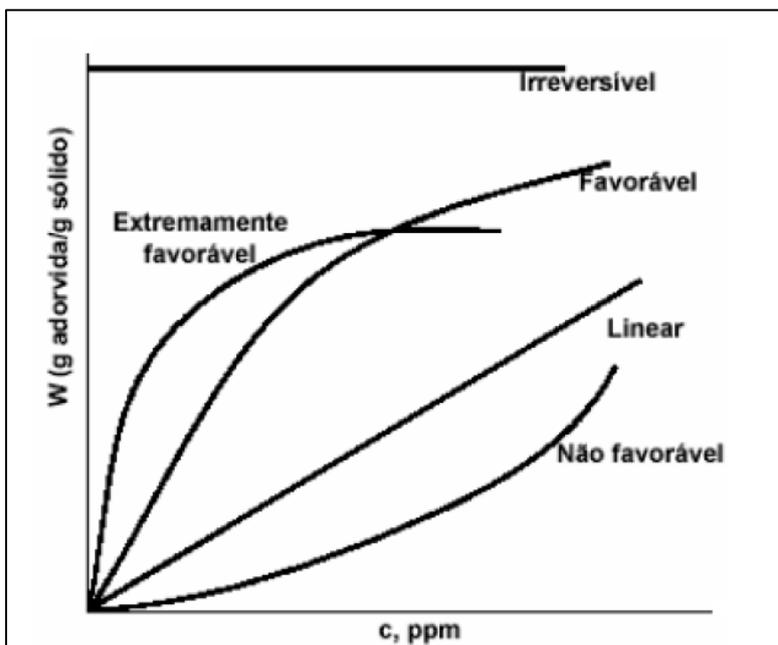
- Isoterma H: Indica uma inclinação inicial muito grande, seguida por uma quase linearidade, ocorre pela grande afinidade entre adsorvente a adsorbato, muito associada a quimiossorção.

- Isoterma C: Indica uma faixa linear constante, indicando a partição do adsorbato entre a solução e o material adsorvente, é muito comum em adsorventes microporosos e se assemelha muito a isoterma do tipo L.

Entre os modelos matemáticos mais utilizados para a determinação de isotermas estão os de Langmuir, Freundlich, Temkin, Brunauer-Emmett-Teller (BET) e Dubinin, sendo mais adequadas as de Langmuir e Freundlich para fisissorção e quimissorção; e BET e Dubinin para adsorção de gases e vapor em carbonos porosos (BOLIGON, 2015).

Estes modelos de isotermas mais comuns podem ser classificadas conforme mostra a Figura 5, em cinco tipos de acordo com o seu formato: favorável, muito favorável, não favorável, linear e irreversível.

Figura 5 – Classificações mais comuns das isotermas de adsorção



Fonte: Morais, Santana; Lelis; Paes (2014).

- Isoterma desfavorável: A quantidade de massa adsorvida de adsorbato é muito baixa, ainda que tenha uma elevada concentração de equilíbrio.

Isoterma favorável: Ocorre quando a massa adsorvida do adsorbato é muito grande em uma concentração de equilíbrio baixa.

Isoterma muito favorável: Ocorre da mesma forma da isoterma favorável porém com mais intensidade de retenção do adsorbato.

Isoterma linear: É quando a capacidade de adsorção é proporcional a concentração e equilíbrio.

Isoterma irreversível: É quando a quantidade em massa do adsorbato adsorvida não depende da concentração de equilíbrio (RODRIGUES, 2018).

2.3.2.1 Isoterma de Langmuir

O modelo proposto por Langmuir em 1918 e que leva seu nome, sugere que a superfície contenha um número finito de sítios homogêneos, as moléculas adsorvidas não interagem uma com as outras, interagem somente com um sítio definido, que só pode ser ocupado por uma molécula formando apenas uma monocamada; o modelo também não considera interações entre as moléculas de sítios vizinhos (HEYLMANN, 2015; RODRIGUES, 2018). O modelo da isoterma de Langmuir é descrito pela Equação 2.

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (02)$$

Onde:

q_e : quantidade adsorvida no equilíbrio ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

$q_{m\acute{a}x}$: capacidade máxima de adsorção ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

K_L : constante de Langmuir ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)

C_e : concentração de adsorbato no equilíbrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Linearizando-se a equação tem-se:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L \cdot q_{m\acute{a}x}} + \frac{C_e}{q_{m\acute{a}x}}$$

A característica da isoterma de adsorção pode ser prevista pelo fator de separação ou fator de equilíbrio (R_L), apresentado na Equação 3, que de acordo com Boligon (2015) e Linhares (2013); apresenta uma isoterma não favorável quando $R_L > 1$, favorável quando $0 < R_L < 1$, linear se $R_L = 1$ e irreversível quando $R_L = 0$.

$$R_L = \frac{1}{1 + (K \cdot C_o)} \quad (03)$$

2.3.2.2 Isoterma de Freundlich

O modelo de Freundlich apresenta uma equação empírica em sistemas caracterizados pela heterogeneidade, relacionando melhor os resultados experimentais que a isoterma de Langmuir, nele os sítios ativos possuem energias diferentes, com uma distribuição logarítmica, cada sítio pode acomodar mais de uma molécula, mas nem sempre encontra-se vago; a adsorção pode ocorrer em multicamadas (MARTINI, 2017; FRANCISKI, 2018). A Equação 4 representa a isoterma de Freundlich.

$$q_e = K_F x C_e^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad (04)$$

Onde:

q_e : concentração de equilíbrio do sólido (mg.g^{-1})

C_e : concentração em equilíbrio do líquido (mg.L^{-1})

K_F : constante de Freundlich que mede a capacidade de adsorção (mg.g^{-1})

n : constante de Freundlich que estima a intensidade da adsorção (adimensional)

O n é uma constante de Freundlich que está relacionada com a intensidade da adsorção, mas pode ser prevista através dela a natureza da adsorção. A relação entre n e a natureza da adsorção está disposta na Tabela 4 (CASTRO, 2009).

Tabela 4 – Relação entre n e a natureza da adsorção

Constante n de Freundlich	Tipo de isoterma
$1/n < 1$	Favorável
$1/n > 1$	Desfavorável
$n = 1$	Semelhante a de Langmuir

Fonte: Adaptado de Castro (2009).

2.4 Corantes

Os corantes são substâncias químicas aromáticas, que servem para conferir cor à um substrato específico que pode ser cabelo humano, pele, tecidos, couro, papel, entre outros (HEYLMANN, 2015). A busca por novas formas de corantes

resultou no desenvolvimento dos corantes sintéticos, com maior variedade de cores, facilidade de obtenção e utilização; estima-se que sejam produzidas 800 milhões de toneladas por ano deste tipo de corante (ODY, 2014; FRANCISKI, 2018).

A fórmula química para a maioria dos corantes torna-se difícil de determinar por se tratar de substâncias complexas, que muitas vezes são misturas de vários compostos, por isso geralmente são identificados pelos seus nomes comerciais. Os corantes são frequentemente classificados como apresenta a Tabela 5, de acordo com o substrato onde serão empregados.

Tabela 5 – Classificação dos corantes, aplicação, características e exemplos

Classe do corante	Característica	Aplicação	Exemplo
Ácidos	Solúveis em água, possuem ácidos sulfônicos ou outros em sua estrutura	Lã, seda e poliamida sintética	Fucsina ácida, azul de anilina e Orange G
Básicos	São solúveis em água e liberam cátions coloridos em solução	Fibras acrílicas	Azul de metileno, verde metil e azul de toluidina
Dispersos	Insolúveis em água, não são iônicos	Fibras hidrofóbicas, e fibras de celulose	Dispersol XF
Diretos	Solúveis em água, podem tingir fibras de celulose gerando pouco resíduo, sua fixação é aumentada por eletrólitos	Algodão e viscose	Vermelho Congo
Azoicos	Coloridos, insolúveis em água, alta fixação, resistência à luz e umidade	Celulose	Amarelo de alizarina R, vermelho de metila
Sulfurosos	Insolúveis em água, geram resíduos altamente tóxicos	Fibras celulósicas	Preto Sulfuroso Diresul RDT Líquido
À tina	Insolúveis em água, durante o processo de tintura tornam-se solúveis em água	Algodão	Índigo
Pré-metalizados	Contém metais formando complexos metálicos, geram efluentes com alto conteúdo de metais	Fibras proteicas e poliamida	VII cromo/corante 1:1
Branqueadores	Apresentam aparência amarelada por absorver luz em baixo comprimento de onda	Algodão, poliamida, lã e papel	VIII corante fluorescente 32

Fonte: Adaptado de Carvalho (2013) e Gouveia (2014).

Um dos principais problemas ambientais relacionados aos corantes é a contaminação de recursos hídricos pelo efluente de indústrias têxteis. Esses corantes dificultam a passagem dos raios solares, influenciam na fotossíntese de plantas subaquáticas e seus produtos de degradação podem ser potencialmente cancerígenos e tóxicos (BUGIERECK *et al.*, 2014; PATIAS *et al.*, 2015).

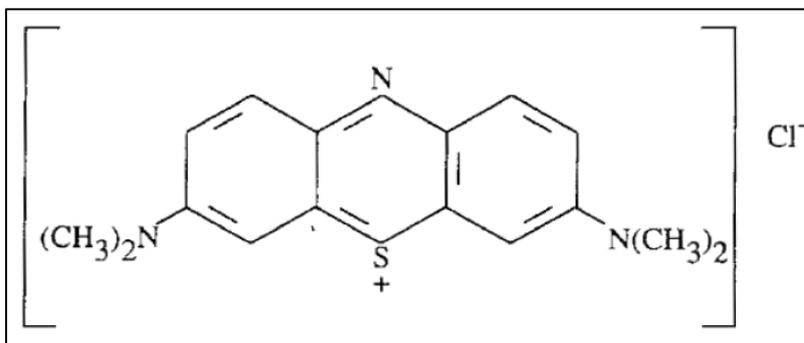
Um dos fatores que contribuem para o problema da contaminação de efluentes por corantes é causado pela baixa fixação de alguns corantes ao substrato e pelo fato de alguns corantes utilizarem a água como solvente, possuindo assim um alto potencial poluidor. As indústrias têxteis buscam técnicas que sejam eficazes e baratas

para tratamento de efluentes com corantes, entre elas a adsorção surge como um método simples e de baixo custo-benefício (PIMENTEL *et al.*, 2015; CITADIN, 2018).

2.4.1 Azul de metileno

O azul de metileno (AM) é um corante catiônico, aromático, heterocíclico, solúvel em água e álcool liberando cor azul; quando sólido é verde escuro e inodoro. A nomenclatura *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) é 3,7-bis(Dimethylamino)-phenothiazin-5-ium chloride, sua massa molar é 319,85 g/mol, apresenta maior absorção na região do UV-visível ($\lambda_{\max} = 665 \text{ nm}$) e possui fórmula molecular de $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$ como mostra a Figura 6 (CASTRO, 2009; FRANCISKI, 2018). É muito empregado na indústria de papel, tingimento de tecidos como poliésteres e nylons, mas também possui aplicações na área da química, biologia, medicina, aquarismo e piscicultura (FRANCISKI, 2018).

Figura 6 – Estrutura química do corante azul de metileno (AM)



Fonte: Alfredo (2013).

O azul de metileno é muito difícil de ser tratado, devido à capacidade que ele possui de interagir com diferentes substratos. Isto o torna um bom corante para estudos de cinética e ensaios de tratamentos de efluentes, como, por exemplo, por adsorção, sendo ele tratado pelo método com êxito; provavelmente outros corantes dissolvidos na água também são facilmente removidos (CASTRO, 2009; HEYLMANN, 2015).

2.5 Carvão ativado obtido de resíduo para adsorção de corantes

O carvão ativado pode ser produzido a partir de resíduos agroindustriais que possuem um alto teor de carbono, além de ser uma alternativa econômica ambiental, este material possui uma alta capacidade de remover contaminantes de águas residuais, em virtude de muitos de seus componentes básicos, que possuem grupos funcionais, atuam como sítios de adsorção, entre estes componentes estão a celulose, hemicelulose, lignina, enzimas, lipídios, proteínas e hidrocarbonetos (SCHNEIDER, 2017; FRANCISKI, 2018).

Diversos estudos recentes visam a utilização de resíduos para a produção de carvão ativado, em especial o uso de materiais lignocelulósicos derivados da madeira. Nobre, Motta, Castro e Bianchi (2015) relatam que entre as vantagens está a alta disponibilidade e baixo custo da matéria-prima, além de já se encontrar, em alguns casos, em uma baixa granulometria, como a serragem, e a alta demanda por carvão ativado que pode ser atendida.

Linhares, Marcílio e Melo (2016) estudaram a viabilidade do uso da casca de acácia negra como carvão ativado; para tal produziram um carvão ativado com tratamento por H_3PO_4 e compararam com o mesmo carvão de casca de acácia, porém sem tratamento de ativação. Para a caracterização foi aplicado a análise elementar, análises termogravimétricas (ATG), análise superficial pelo método Brunauer, Emmet e Teller (BET), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS). Os resultados obtidos indicaram que o material se mostrou promissor como carvão ativado.

Para analisar a capacidade de adsorção de corantes por carvões ativados, foram produzidos carvões com madeiras de *Acacia mangium*, *Pseudosamanea guachapelle* e *Eucalyptus grandis*, por vapor d'água superaquecido em temperaturas de 400, 500 e 600°C; a caracterização foi feita pelo rendimento em carbono fixo (RCF). A ativação com vapor d'água superaquecido influenciou positivamente na adsorção dos corantes para o *P. guachapelle* a 400°C, *A. mangium* e *E. grandis* a 500°C (ARRUDA; ANDRADE; JÚNIOR, 2017).

A madeira do bambu (*Bambusa vulgaris*) também foi estudada para produção de carvão ativado e posterior adsorção do AM (SANTANA *et al.*, 2019). Os autores utilizaram a ativação com CO_2 em 800°C, em seguida procederam com ensaios de

adsorção para AM e fenol utilizando as isotermas de Freundlich e Langmuir para se ajustar ao processo de adsorção. O bambu demonstrou ser um bom material precursor para o carvão ativado de alta qualidade, com um teor de carbono fixo de 82,13%, área superficial (S_{BET}) de $856,78 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, com alta capacidade de adsorção para o azul de metileno de $298,82 \text{ mg}.\text{g}^{-1}$ e $558,29 \text{ mg}.\text{g}^{-1}$ para o fenol.

Asimbaya, Rosas, Endara e Guerrero (2015) avaliaram a obtenção de carvão ativado proveniente da serragem da madeira de louro, canela e eucalipto. O material foi ativado com H_3PO_4 e carbonizado à 500°C por 2 h. A análise da adsorção foi feita por índice de iodo, e todas as amostras apresentaram valores superiores ao mínimo considerado para comercialização que é de 500 mg l/g de carvão. Nas amostras de 2 mm os resultados obtidos foram, canela 740 mg l/g , louro 737 mg l/g e eucalipto 639 mg l/g . Nas amostras com tamanhos entre $74 - 150 \mu\text{m}$ os resultados para adsorção de iodo foram de: canela 636 mg l/g , louro 600 mg l/g e eucalipto 535 mg l/g . Os valores superam ainda o esperado para o tratamento de resíduos de madeira com H_3PO_4 que é entre 405 e 505 mg l/g .

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Materiais

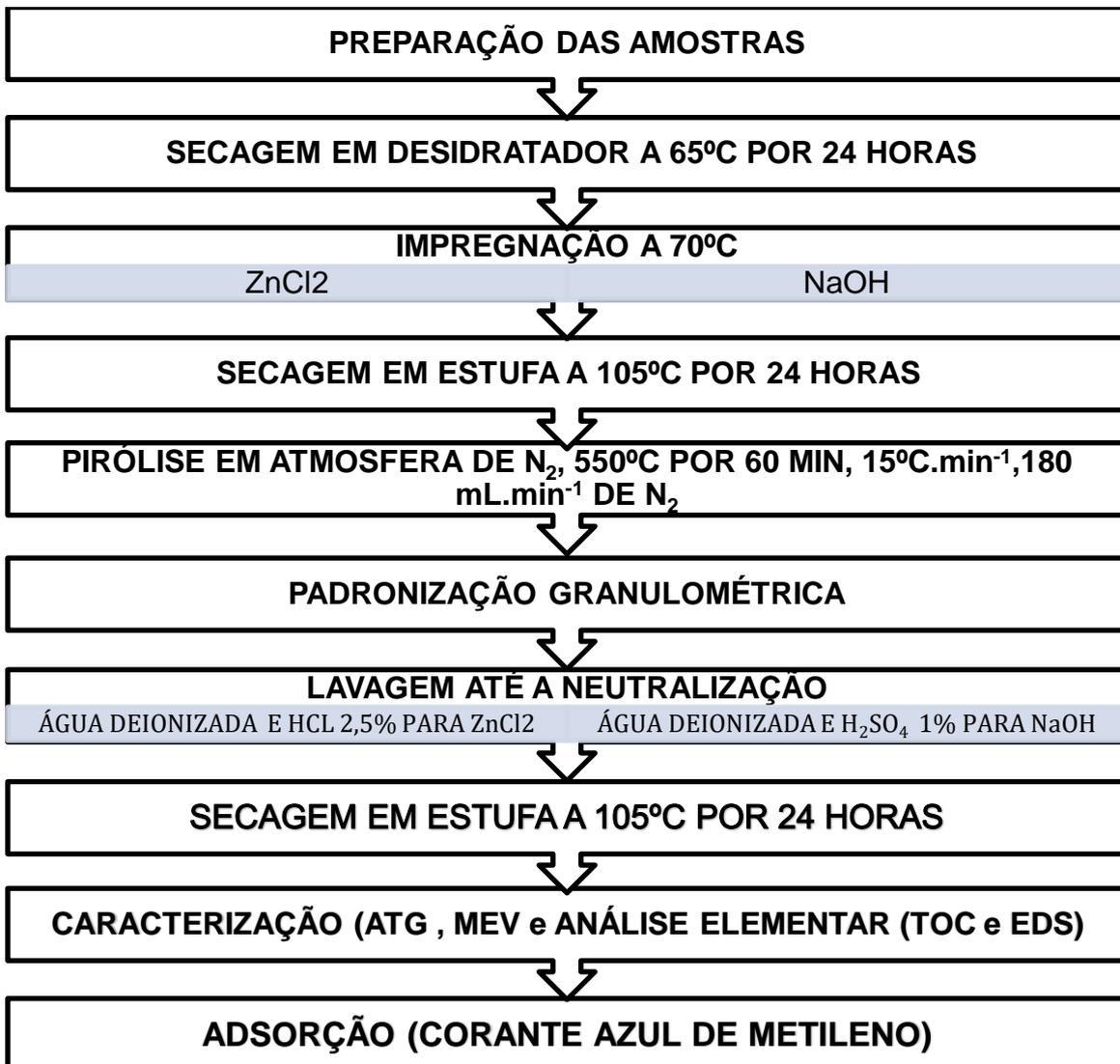
Para a realização deste trabalho foi utilizado o resíduo de cascas de eucalipto branco, provenientes de uma serraria localizada na cidade de Capitão/RS.

Para as etapas de preparação e tratamento das amostras utilizou-se cloreto de zinco (ZnCl_2) (Merck 98%) e hidróxido de sódio (NaOH) da marca Synth, para fins de comparação com o carvão ativado obtido, foi utilizado o carvão ativado comercial em pó, da marca Quimex. As duas etapas foram realizadas nos laboratórios de química da Universidade do Vale do Taquari – Univates, onde estavam disponíveis os reagentes mencionados; com exceção da etapa de pirólise que ocorreu no laboratório do Tecnovates. Nos ensaios de adsorção foi utilizado o corante azul de metileno da marca Synth.

3.2 Metodologia

Para a obtenção do carvão ativado a partir do resíduo da casca do eucalipto branco, o trabalho seguiu as etapas mostradas no fluxograma da Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma das etapas de trabalho experimental



Fonte: Do autor (2021).

3.3 Preparação dos carvões ativados

Foram coletados 800 g do resíduo no local onde geralmente são depositados, após foi realizada uma lavagem em água corrente, e em seguida o material foi submetido à exposição solar por 7 dias e secagem em desidratador (Pardal®, PE 60, Brasil) a 65°C por 24 h. Realizou-se a moagem do material precursor em um moinho de facas (Marconi®, Willey MA340, Brasil), até que o tamanho das partículas ficassem em torno de 1 cm.

Todas as massas foram verificadas em balança analítica (BEL Engineering®, M214AI, Itália). Foi preparada uma solução de 20 g de ZnCl₂ em 100 mL de água

deionizada e colocada em contato com 20 g do resíduo da casca de eucalipto branco. Para o NaOH foi preparada uma solução de 20 g de NaOH em 100 mL de água deionizada e colocada em contato com 20 g do resíduo de estudo, em uma proporção de 1/1 g (g de resíduo/g de $ZnCl_2$ e NaOH), conforme mostra a Tabela 6 (CAVALCANTE, 2015).

Tabela 6 – Amostras de carvão ativado que foram preparadas

Método de ativação	Granulometria (mesh)	Quantidade inicial (g)
Cloreto de Zinco ($ZnCl_2$)	30	20
Hidróxido de sódio (NaOH)	30	20
Total		40

Fonte: Do autor (2021).

As duas soluções foram aquecidas a 70°C em chapa aquecedora (VELP® Científica, F20520162, Itália), com agitação manual até a secagem de toda a solução de ativação do carvão ativado. Em seguida o material passou por uma secagem em estufa de secagem (De Leo®, A6AFD, Brasil) a $105 \pm 5^\circ C$ por 24 h. Após a secagem, foi feita a pirólise em forno mufla (SPLabor®, SP 1200 DM/B, Brasil), a 550°C com uma taxa de aquecimento de $15^\circ C \cdot min^{-1}$, durante 60 min em atmosfera inerte de N_2 com fluxo de gás nitrogênio numa vazão de $180 mL \cdot min^{-1}$, até que ocorresse a completa carbonização do material.

Para garantir que a pirólise ocorra em atmosfera inerte foi utilizado uma adaptação na tampa do forno mufla conforme mostra a Figura 8. Que consiste em uma mangueira de silicone de 4 m de comprimento e 25 mm de diâmetro ligada em uma das extremidades à um cilindro de N_2 e na outra extremidade à uma pipeta Pasteur de vidro de caminho reduzido, que foi inserida dentro da mufla através do orifício na porta do equipamento.

Figura 8 – Adaptação na tampa do forno mufla para entrada do N₂



Fonte: Do autor (2021).

Após a pirólise do material foi feita a padronização granulométrica das amostras, utilizando peneiras para análise granulométrica (Bertel®, redonda em inox 16" 34", Brasil) nas granulometrias de 16 e 34 mesh. A maior quantidade de material retida foi encontrada na peneira de 34 mesh, sendo está a granulometria utilizada como padrão para o carvão ativado obtido.

Na etapa de lavagem as amostras contendo ZnCl₂ foram lavadas com água deionizada e (HCl) 2,5% m/v, a 70°C sob agitação durante 1 h até a neutralização da água de lavagem. A amostra tratada com NaOH foi lavada com água deionizada e (H₂SO₄) 1% m/v, a 70°C sob agitação durante 1 h até a neutralização da água de lavagem. O material resultante foi seco em estufa de secagem a 105 ± 5°C por 24 h.

3.4 Caracterização dos carvões ativados obtidos

Para a caracterização dos carvões ativados obtidos foram empregadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise termogravimétrica (ATG), análise elementar por carbono orgânico total (TOC) e espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS). Todas as análises de caracterização foram realizadas no laboratório do Tecnovates.

3.4.1 Rendimento

De acordo com Vargas (2010), o rendimento final do carvão ativado pode ser calculado através da Equação 5, que relaciona a massa do material precursor utilizada com a massa resultante dos processos.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{MF}{MP} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

MF: Massa final do carvão obtido (g)

MP: Massa do material precursor utilizado (g)

3.4.2 Microscopia eletrônica de varredura

As características morfológicas e a superfície do carvão ativado obtido foram analisadas por MEV, através das micrografias obtidas por um microscópio eletrônico (ZEISS®, EVO LS 10, Alemanha) com voltagem de 10 kV e metalizadas com ouro. O diâmetro dos poros das amostras foi analisado utilizando o software “ImageJ”.

3.4.3 Análise termogravimétrica

A análise de estabilidade térmica das amostras do material adsorvente obtido, assim como as perdas de peso causadas por aumento da temperatura, foram analisadas por análise termogravimétrica (ATG), em analisador termogravimétrico (Perkin Elmer®, TGA 4000, Estados Unidos), sob fluxo de 100 mL.min⁻¹ de ar sintético, aquecendo de 20 a 900°C com taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹.

3.4.4 Análise elementar

3.4.4.1 Carbono orgânico total

A quantidade de carbono orgânico total presente nas amostras foi analisada por TOC. Utilizando um analisador de carbono orgânico total/nitrogênio total (Shimadzu®, TOC-V CPH, Japão).

3.4.4.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia

A determinação e quantificação dos elementos presentes na superfície das amostras foi realizada por EDS, através de um espectrômetro de dispersão de energia acoplado ao microscópio eletrônico (ZEISS®, EVO LS 10, Alemanha) utilizado na análise de MEV.

3.4.5 Análise de adsorção das amostras por espectroscopia UV/VIS

Para a avaliação da adsorção das amostras foram realizados ensaios de adsorção em meio aquoso utilizando como adsorbato o corante azul de metileno. Nos ensaios realizados, foram feitas soluções de azul de metileno em água destilada com concentrações de 5, 10, 25, 50, 100, 250 e 500 mg.L⁻¹, e após colocadas em contato com 20 mL desta solução e 20 mg do carvão ativado obtido; utilizando agitação automática por chapa magnética (VELP® Scientifica, F20520162, Itália) e barra magnética com rotação aproximada de 150 rpm durante 6 e 20 min em temperatura ambiente (25°C). Ao final as amostras foram filtradas à vácuo utilizando bomba (Marconi®, MA-058, Brasil), até total remoção do adsorvente.

Para determinar as concentrações restantes do corante azul de metileno na solução, as amostras foram analisadas por espectrofotômetro UV/VIS (Thermo Fisher Scientific®, UV/VIS Genesys 10S, Estados Unidos) em um comprimento de onda de 665 nm (BOLIGON, 2015). Este procedimento foi realizado com o carvão ativado obtido e com o carvão ativado comercial de origem mineral para fins de comparação.

A partir dos dados obtidos neste procedimento foi calculada a concentração em equilíbrio (q_e) através da Equação (1); em seguida foi possível verificar qual dos modelos, de Langmuir ou de Freundlich, mais se adaptou aos dados de adsorção obtidos; os cálculos do processo de adsorção foram realizados utilizando o software Microsoft Excel.

A eficiência da adsorção foi obtida através dos valores das concentrações iniciais e finais das soluções, conforme mostra a Equação 6.

$$EF = \frac{(V.C_0 - V.C_e)}{V.C_0} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

EF: Eficiência da adsorção (%)

V: Volume da solução (mL)

C_0 : Concentração inicial da solução (mg.L^{-1})

C_e : Concentração final da solução (mg.L^{-1})

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos carvões ativados obtidos

4.1.1 Rendimento

As amostras de carvões ativados (CA) obtidas utilizando a casca do eucalipto branco como material precursor e ativação por hidróxido de sódio (NaOH) e cloreto de zinco (ZnCl_2), são mostradas na Figura 9, observando também sua diferença quanto a coloração e quantidade.

Figura 9 - Amostras obtidas de carvão ativado com ativação por ZnCl_2 (a) e NaOH (b)



(a)

(b)

Fonte: Do autor (2021).

O rendimento obtido para o carvão ativado com NaOH a partir do resíduo da casca de eucalipto branco foi de 12,95%. O rendimento encontrado é semelhante ao obtido por Vargas (2010), ao produzir um carvão ativado a partir de vagens de Flamboyant (*Delonix regia*) através da ativação química com NaOH em condições ótimas de ativação; o autor obteve um rendimento de 10,8%. Ao avaliar o rendimento do carvão ativado na proporção NaOH/carvão de 1:1 ele obteve 27,8%.

Asimbaya, Rosas, Endara e Guerrero (2015) avaliaram a influência do tamanho de partícula na obtenção de carvão ativado com ativação química por ácido fosfórico (H_3PO_4), a partir da serragem de canela, louro e eucalipto. O rendimento observado para a serragem de eucalipto foi de 20,2 % para um carvão ativado com tamanho de partícula de 150 – 75 μm e 28,2 % para um carvão ativado com menos de 2 mm.

Ao estudar a utilização de novos sais alcalinos na produção de carvões ativados mesoporosos, Gao, Yuen, Xu e Gao (2015) destacaram que um dos fatores que podem influenciar o rendimento é o agente ativante escolhido, quanto maior for o potencial de desidratação e despolimerização da matriz carbonácea, maiores serão as perdas de massa do material precursor. Desta maneira, o NaOH utilizado neste estudo sendo uma das bases mais fortes conhecidas, promoveu uma desidratação muito grande no material, resultando em um rendimento inferior se comparado a outros agente ativantes que podem ser utilizados.

O uso de uma base forte como agente ativante também foi avaliada por Boligon (2015), ao produzir um carvão ativado a partir da borra de café solúvel, com ativação por hidróxido de potássio (KOH), carbonato de potássio (K_2CO_3) e uma mistura de cloreto de ferro ($FeCl_3$) com cloreto de zinco ($ZnCl_2$). Foi obtido um rendimento médio de 13,63 % sendo que menor rendimento foi obtido nas etapas de ativação e tratamento térmico ao utilizar o hidróxido de potássio, resultando em um carvão ativado com maior área superficial, volume total de poros e microporos; além de uma maior eficiência nos ensaios de adsorção do iodo e azul de metileno.

A composição química do material lignocelulósico utilizado e a distribuição de alguns componentes no material, principalmente os polímeros lignina, celulose e hemicelulose; influenciam nas características físico-químicas do carvão ativado produzido, como a porosidade, área superficial e o rendimento do processo. Para a produção de carvão ativado é preferível materiais precursores com alto teor de lignina concedendo maior dureza, e durabilidade ao produto; pois esta possui uma maior

estabilidade durante a etapa de carbonização, com uma degradação em temperaturas mais elevadas entre 280 a 500°C diferentemente da celulose e hemicelulose que se degradam entre 200 a 350°C. Materiais precursores com grandes teores de hemicelulose não apresentam importância na produção de carvões ativados e materiais ricos em celulose tendem a gerar carvões com grande área superficial (SANTOS, 2018).

A quantidade de lignina, celulose e hemicelulose para o eucalipto branco foi determinada quimicamente por Mori, Mendes, Truguilho e Cardoso (2003) como sendo 25,88% para lignina, e 69,18% para holocelulose (celulose + hemicelulose). Morais et al. (2015) obtiveram 20,69% de rendimento gravimétrico para um carvão ativado obtido através do endocarpo de coco que possui 33% de lignina de acordo com a literatura. Já França (2019) encontrou um teor de lignina na casca de soja para uma granulometria de 35 mesh de 7,86%, constatando que quanto maior a quantidade de lignina na biomassa maior é o rendimento do carvão ativado; o rendimento obtido para o carvão ativado de casca de soja foi de 60,6%.

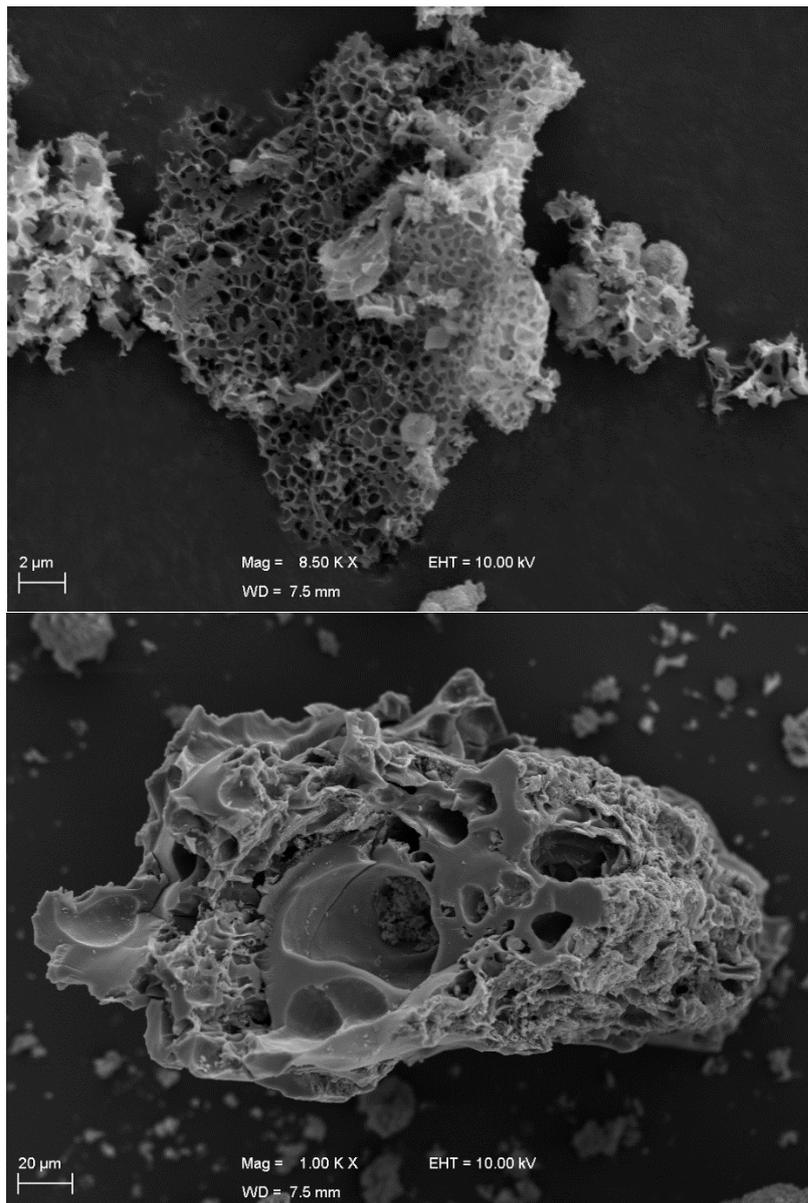
O carvão ativado com $ZnCl_2$ apresentou um rendimento de 35%, este rendimento alto pode estar relacionado ao fato de a etapa de lavagem não ter sido executada com êxito, restando ainda muito do material ativante no carvão ativado obtido. A cor com tonalidade cinza indica que há a presença do sal ativante no produto final, este não foi removido totalmente no processo de lavagem por alguma falha no controle da temperatura, tempo, ou ainda na quantidade e estágios de troca da água de lavagem. O rendimento para carvões obtidos através do cloreto de zinco é relativamente alto ao comparar com materiais ativados com agentes desidratantes fortes como o KOH e NaOH, ficando acima dos 25% (HEYLMANN, 2015).

Heylmann (2015) obteve 25,96% de rendimento ao produzir um carvão ativado a partir de caroço de pêssigo com ativação por $ZnCl_2$, já Boligon (2015) verificou que o rendimento na etapa de carbonização com este agente ativante apresentou um rendimento de 89,25%, e obteve uma variação do rendimento total de 11,37 a 16,11%. O rendimento na produção de um carvão ativado está relacionado com a escolha do material ativante, sua razão ativante/carvão, a natureza do material precursor escolhido, e também; dos parâmetros de processos, como a temperatura em cada uma das etapas, tempo de carbonização e ativação, fluxo do gás inerte e controle da etapa de pirólise (VARGAS, 2010; BOLIGON, 2015).

4.1.2 Microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 10 a seguir, são mostradas as micrografias obtidas por MEV, realizadas nos carvões ativados (CA) obtidos com os dois agentes ativantes, com ampliação de 8,5 K vezes e 1 K vezes para o CA com NaOH e ZnCl₂ respectivamente.

Figura 10 - Micrografias do carvão ativado com NaOH (A) e ZnCl₂ (B)



Fonte: Do autor (2021).

A partir da análise das micrografias apresentadas na Figura 10, pode-se verificar que há uma grande diferença na morfologia de cada uma das amostras de carvão ativado obtido. O carvão ativado produzido através da ativação com NaOH

apresentou uma estrutura totalmente formada por poros, com formatos levemente irregulares mas com tamanhos semelhantes entre si, com poucas áreas de superfície lisa; enquanto o carvão ativado com ZnCl_2 apresentou uma baixa quantidade de poros, sendo estes de tamanhos e formatos irregulares com muitas obstruções em seus poros, também pode ser observado formatos cristalinos na estrutura do material. Esta variação na morfologia dos materiais pode estar associada aos ativantes escolhidos, além dos métodos utilizados e falhas durante o processo de síntese do carvão ativado.

A ativação com NaOH facilita a decomposição do material precursor, por se tratar de uma base forte com um potencial desidratante muito forte, o que faz com que reações de desidratação e de eliminação causem o rompimento de ligações C-O-C e C-C. Quanto maior for a decomposição do material precursor, maior será o volume de poros e menor será o rendimento do carvão ativado obtido (VARGAS, 2010). O ZnCl_2 também é considerado um agente desidratante, durante a decomposição pirolítica do material na mufla, ele bloqueia a formação de piche na entrada dos poros; formando um material com uma boa estrutura porosa e um ataque desidratante mais baixo (DE SALES; BERTOLI; PINTO; MAGRIOTIS, 2015).

Ao relacionar os rendimentos com o volume de poros, o carvão ativado com NaOH apresentou alto volume de poros e baixo rendimento, além de uma baixa heterogeneidade na estrutura após a carbonização. Estes resultados vão de encontro aos obtidos por Martini (2017), que observou que há um aumento da homogeneidade após ativação, que pode estar relacionada com as impurezas contidas no precursor que reagem com o NaOH e são removidas posteriormente na lavagem. Já o carvão ativado com ZnCl_2 apresentou baixo volume de poros e alto rendimento, com maior predominância de macroporos. Da mesma forma que Moraes, Santana, Lelis e Paes (2014) obtiveram ao produzir um carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía, ele verificou um baixo desenvolvimento de meso e microporos que não interferiram na eficiência do carvão. Esta provável diferença entre morfologia e rendimento dos dois carvões obtidos está relacionada com o agente ativante escolhido e com a lavagem ineficiente do carvão ativado com ZnCl_2 que é evidenciada pelo preenchimento dos poros com resquícios do sal ativante, além de cristais que pertencem ao ativante empregado.

Nobre, Motta, Castro e Bianchi (2015) avaliaram a morfologia de um carvão ativado de resíduo madeireiro da região Amazônica, eles constataram a formação de

várias fibras que promoveram um aumento da capacidade de adsorção através de ranhuras entre elas; ainda salientam que a intensa eliminação de voláteis pode ser um fator determinante para a formação da estrutura porosa. Franciski (2018) caracterizou um carvão produzido com bagaço de malte, e observou uma superfície irregular formada por sobreposições de camadas das cascas do malte, com a formação de canais de múltiplas formas originados das fibras das cascas do malte.

Castro (2009) analisou uma diferença muito grande na estrutura morfológica do CA após a pirólise e ativação em comparação com o material precursor, além disso observou que a morfologia do CA comercial é bem diferente dos carvões produzidos em seu trabalho com borra de café. Moletta (2011) observou que o tamanho e a quantidade de poros de um CA está atrelada ao material de origem e as condições aplicadas a ele. O autor constatou que os macroporos não estão ligados diretamente ao processo de adsorção, mas são fundamentais ao adsorvente como também observado por Castro (2009), por servirem como canais de transporte dos adsorvatos, pelos meso e microporos. Rovani (2015) produziu e caracterizou carvões ativados para remoção de estrogênios, e observou partículas de diferentes formas e tamanhos em suas amostras, as micrografias apresentaram superfícies pouco rugosas e desprovidas de poros superficiais.

Linhares, Marcílio e Melo (2016) analisaram a morfologia de um CA produzido com cascas de acácia negra e ativados fisicamente, e quimicamente com H_3PO_4 ; foi observado um carvão com superfície irregular e heterogênea, e; porosidade bem definida. As amostras tratadas fisicamente apresentaram uma superfície com baixa presença de fendas e macroporos, mas com uma formação mais achatada com cumes e poros fechados possivelmente por carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que pode ser detectado por uma análise de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).

Bugiereck *et al.* (2014) analisaram a morfologia de um carvão ativado produzido com casca de banana, e verificaram um aumento da densidade dos poros após a ativação, e também uma produção de poros menores e bem espalhados por toda a superfície do carvão, devido à agressividade do ácido fosfórico utilizado para ativação. Moraes, Santana, Lelis e Paes (2014) observaram tamanhos e formas dos poros semelhantes em carvão ativado produzido a partir do endocarpo de coco. Vargas (2010) evidenciou um processo eficiente de lavagem, em CA produzido com vagens

de Flamboyant, de acordo com o autor durante a ativação química podem ser formadas pequenas partículas na superfície dos CA em virtude da produção de resíduos de sais, a ausência destes resíduos sugere que o processo de lavagem ocorreu com total êxito.

O diâmetro médio dos poros dos carvões ativados obtidos também foi analisado, e é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Diâmetro médio dos poros dos carvões ativados obtidos

Carvão ativado com NaOH	Carvão ativado com ZnCl₂
412 ± 115 nm	254.544 ± 60.521 nm

Fonte: Do autor (2021).

Através das microscopias obtidas, pode-se verificar que o carvão ativado com NaOH possui um volume de poros que cobre quase toda a superfície do carvão obtido, e ainda; estes poros possuem diâmetros relativamente pequenos e com certa regularidade nos tamanhos. Já o carvão ativado com ZnCl₂, apresentou poros eventualmente dispersos pela superfície do carvão, com diâmetros grandes e ampla variação de tamanhos entre si, além de apresentarem obstruções parciais e também completas por partículas que podem ser resquícios do material ativante utilizado. Esta variação que ocorre entre a porosidade dos dois carvões ativados obtidos pode ser atribuída aos diferentes tipos de ativação empregados, fica evidenciado um melhor resultado para porosidade no carvão ativado com NaOH em relação a ativação com ZnCl₂, levando em conta volume, regularidade e clareza dos poros.

A morfologia dos poros é considerada a principal característica física de um carvão ativado. De acordo com a IUPAC, existem três classes de diâmetros de poros que podem ser relacionados aos CA; os macroporos ($\Phi > 50$ nm), mesoporos ($2 < \Phi < 50$ nm) e microporos ($\Phi < 2$ nm). Os meso e macroporos possuem um papel muito importante no processo de adsorção, ainda que não interajam diretamente, eles são responsáveis pelo transporte do adsorvato até os microporos, que geralmente estão dispostos no interior do carvão ativado e é onde ocorre a maior parte do processo de adsorção (CASTRO, 2009; FRANSCISKI, 2018).

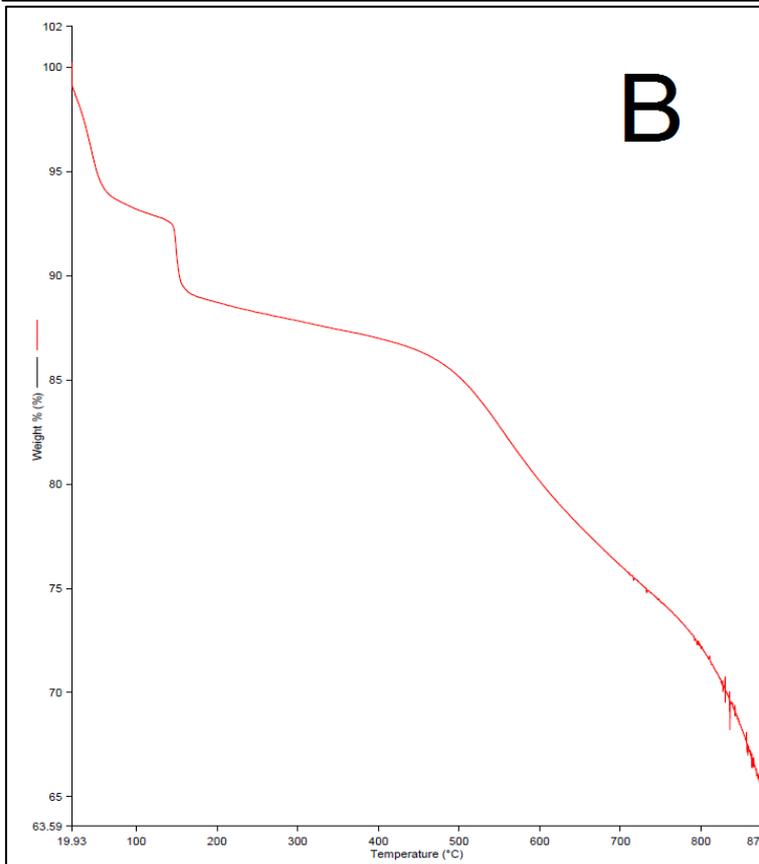
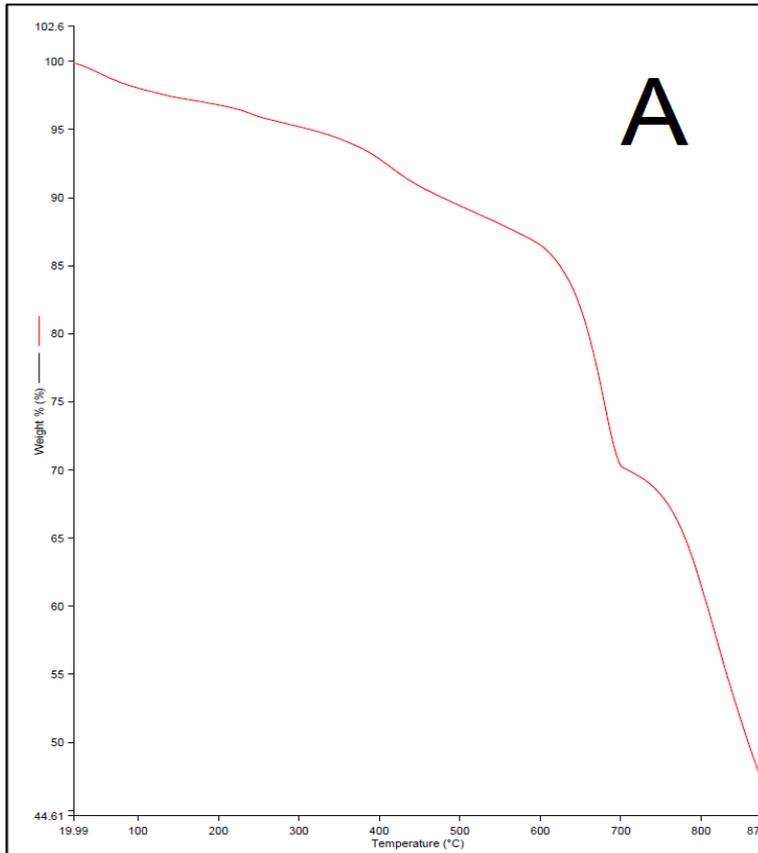
Morais (2015) analisou o diâmetro médio dos poros em um carvão ativado obtido do mesocarpo do coco-da-baía, com impregnação por H_3PO_4 , CH_3COONa e KOH , com resultados que ficaram acima da faixa dos mesoporos entre 2470 e 14200 nm, onde o adsorvente não apresentou bom desenvolvimento para meso e microporos, progredindo para a formação de uma estrutura macroporos. Santos (2018) verificou um diâmetro médio de poros de $4,73 \pm 0,57$ nm ao avaliar a influência e as propriedades de materiais precursores de carvões ativados, na imobilização de pepsina por adsorção e ligação covalente; ele observou que em materiais com a relação celulose/lignina > 3 produzem CA com maior diâmetro de poros e área superficial, materiais com relação ≤ 1 geram CA com alto rendimento e volume de poros.

Ao estudar a ativação de carvões ativados com diferentes sais alcalinos, Gao, Yuen, Xu e Gao (2015) obtiveram diâmetros de poros que variam entre 2.976 a 4.538 nm, o autor verificou que entre os seis sais utilizados no estudo, os carvões ativados com K_2CO_3 , K_2SiO_3 e $Na_2Al_2O_4$ foram os que apresentaram uma mesoporosidade mais desenvolvida. Carvalho (2013) caracterizou carvões ativados produzidos com osso, dendê, casca de coco e babaçu; obtendo diâmetros de poros respectivamente de 9,776 - 3,166 – 2,991 e 3,079 nm.

Carvões ativados com diâmetro de poros menores que 2 nm foram obtidos em vários trabalhos (SCHETINO et al., 2007; BRUM et al., 2008; LIMA, 2010; NOBRE; MOTTA; CASTRO; BIANCHI, 2015; SCHNEIDER, 2017; GOMES; CECHINEL, 2018; MORAIS et al., 2019). De acordo com Heylmann (2015) os microporos são os que fornecem uma alta capacidade de adsorção para moléculas pequenas como gases e solventes de baixo peso molecular; contribuindo com grande parte da área superficial específica do material.

4.1.3 Análise termogravimétrica

A estabilidade térmica dos carvões ativados obtidos foi analisada por análise termogravimétrica (ATG) em um intervalo de 20 a 900°C, as curvas de ATG são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 – Curvas ATG dos carvões ativados com NaOH (A) e ZnCl₂ (B)

Fonte: Do autor (2021).

De acordo com as curvas de ATG, pode-se observar que ambas as amostras obtidas apresentaram uma boa estabilidade térmica, com pequenas perdas de massa, entre 35 e 52,5% em massa. A amostra ativada com NaOH apresenta três pontos de perda de massa bem definidos, sendo que estas ocorrem de uma forma contínua proporcional ao aumento da temperatura, indicando que a presença de contaminantes ou compostos específicos é inexistente, visto que não há quedas bruscas na análise. Nas curvas de ATG do carvão ativado com $ZnCl_2$ verifica-se que há quatro perdas de massa bem definidas, e que estas ocorrem de forma brusca na maioria dos pontos, o que pode estar relacionado a contaminantes presentes na estrutura da amostra que se degradam em temperaturas específicas. Nesse carvão; é observada também uma perda menor em massa em comparação ao carvão ativado com NaOH, o que reforça mais ainda a ideia de que houve a presença de compostos indesejáveis no carvão ativado obtido.

O primeiro evento térmico da amostra ocorre até a temperatura de 100°C e se sucede suavemente até por volta dos 300°C, que está relacionada com a perda de umidade e alguns compostos voláteis de baixo peso molecular como dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de carbono (CO_2), gás hidrogênio (H_2) e dióxido de enxofre (SO_2), resultando numa perda de 12% em massa. O declive em 450°C pode estar associado a oxidação da matriz carbonácea, visto que há pouca resistência à oxidação e o declive segue de forma uniforme até 600°C (MARCKMANN *et al.*, 2015). O segundo evento térmico é observado em 600°C logo acima da temperatura de pirólise empregada na síntese do adsorvente que é de 550°C. De acordo com Moletta (2011), essa queda considerável de massa pode estar relacionada com a decomposição de grupos fenólicos, ou seja, a decomposição do carbono estrutural e corresponde a 17,5% em massa. Ainda pode ser associada conforme Boligon (2015), à decomposição de 20% restante da hemicelulose que se degrada totalmente até 900°C. O terceiro evento térmico ocorre em uma temperatura aproximada de 670°C com uma perda de massa em torno de 22,5%; esta pode ser associada a decomposição de compostos orgânicos do carvão ativado.

O carvão ativado com $ZnCl_2$ também apresentou o primeiro evento térmico relacionado a umidade até os 100°C de 7% em massa, porém; ele apresenta um segundo declive bem acentuado em aproximadamente 115°C. Que corresponde a uma perda aproximada em massa de 8%, e pode estar relacionada à contaminantes

indesejáveis na amostra, assim como compostos voláteis e óxidos ligados ao Cl e ao Zn, visto que a etapa de lavagem não foi realizada com sucesso. A terceira perda em massa é mais uniforme e caracteriza um percentual em massa de 2%, ela ocorre entre 130 e 500°C podendo indicar a decomposição completa da celulose e lignina (ARAÚJO; GUIOTOKU, 2010; BOLIGON, 2015; ROVANI, 2015). O quarto evento térmico é observado em 500°C, e pode ser associado a decomposição de compostos orgânicos do carvão ativado conforme verificado anteriormente, ela corresponde a 22,5%.

Carvões ativados com uma boa estabilidade térmica foram encontrados também por outros autores (LINHARES; MARCÍLIO; MELO, 2016; MARTINI, 2017; MORAIS *et al.*, 2019). Pode-se verificar que praticamente todos carvões ativados possuem uma estabilidade térmica maior que seu material precursor, mas não são todos os carvões ativados produzidos a partir de resíduos que possuem estabilidade térmica confiável para uma determinada finalidade em que será utilizado, como separações de gases ou ainda processos de catálise.

4.1.4.1 Análise elementar de carbono orgânico total (TOC)

A análise elementar proporciona informações importantes sobre a pirólise e os elementos químicos presentes na superfície e no interior do carvão ativado. Foi realizada a análise de carbono orgânico total (TOC) para avaliar a qualidade da pirólise, assim como a quantidade de possíveis funções orgânicas no carvão ativado, os resultados de TOC são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da análise de carbono orgânico total nos carvões ativados obtidos

	Carvão ativado com NaOH	Carvão ativado com ZnCl₂
Carbono em %	80,61 ± 0,13	64,67 ± 0,20

Fonte: Do autor (2021).

Ambas as amostras apresentaram uma quantidade alta de carbono orgânico, o carvão obtido por ativação com NaOH foi o que apresentou maior quantidade; que pode estar associada a alta porosidade causada pelo efeito de desidratação forte do NaOH, que faz com que aja um maior ingresso de oxigênio na matriz carbonácea. Este oxigênio é responsável pela formação de grupos funcionais que são encontrados na superfície dos carvões produzidos a partir de precursores lignocelulósicos, juntamente com compostos inorgânicos. Na base destas estruturas são encontrados carbonos insaturados, com pares de elétrons sobrando que exercem uma forte atração por átomos de oxigênio que é muito eletronegativo, influenciando na superfície do carvão ativado através da formação de grupos que atuam diretamente na capacidade de adsorção do carvão. Os grupos podem estar dispostos nas mais diversas formas, como: grupos carboxílicos, fenólicos, anidridos carboxílicos, éteres, cetonas, carbonilas, lactonas, quinonas, aldeídos, entre outros (SCHETINO *et al.*, 2007; LIMA, 2010; CARVALHO, 2013; MORAIS; SANTANA; LELIS; PAES, 2014; ROVANI, 2015).

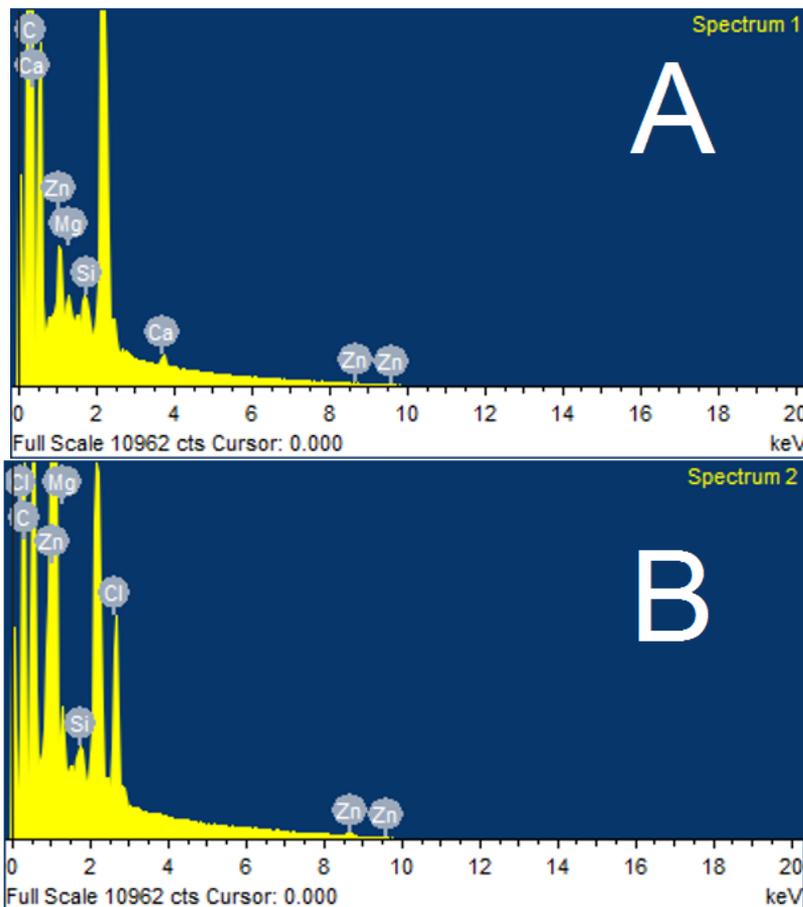
O carvão ativado com $ZnCl_2$ apresentou menor quantidade de carbono orgânico, podendo indicar que houve uma pirólise incompleta do carvão, para Castro (2009) a liberação de compostos voláteis durante a pirólise, faz com que se obtenha um aumento no teor de carbono e conseqüentemente uma diminuição de oxigênio e hidrogênio. Este resultado também pode ser associado a uma grande quantidade de material inorgânico presente no carvão, como por exemplo o agente ativante utilizado que pode não ter sido removido totalmente durante o processo de lavagem. Brum *et al.* (2008) produziram e caracterizaram um carvão ativado com $ZnCl_2$, a partir de resíduos de beneficiamento de café; eles observaram um aumento no teor de carbono do material pirolisado em comparação com o precursor, devido a eliminação de hidrogênio e oxigênio durante a pirólise.

4.1.4.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)

A análise de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) foi realizada nos carvões ativados obtidos, ela é aplicada em certos pontos aleatórios da amostra, e determina a composição elementar do carvão produzido. Os carvões ativados possuem entre 87 e 97% de carbono, mas podem conter ainda outros

elementos como oxigênio, enxofre, nitrogênio e fósforo; visto que é um material adsorvente, podem estar presentes compostos orgânicos e inorgânicos (LINHARES, 2013). Os espectros das análises de EDS das amostras de carvão ativado são apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Espectros de energia dispersiva em raios X para o carvão ativado com NaOH (A) e ZnCl₂ (B)



Fonte: Do autor (2021).

Através do espectro de EDS pode-se verificar a composição elementar dos carvões ativados obtidos. Entre os principais elementos encontrados estão o carbono (C), Zinco (Zn), Cloro (Cl), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Silício (Si), conforme são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição elementar das amostras de carvões obtidas por EDS

Elemento	Carvão ativado com NaOH	Carvão ativado com ZnCl₂
C (%)	90,67 ± 6,17	28,17 ± 4,34
Zn (%)	5,08 ± 3,12	59,34 ± 3,51
Cl (%)	-	11,49 ± 4,11
Ca (%)	3,67 ± 3,12	-
Mg (%)	0,45 ± 0,03	0,81 ± 1,07
Si (%)	0,13 ± 0,11	0,19 ± 0,33

Fonte: Do autor (2021).

De acordo com a análise aplicada ao carvão ativado com NaOH, pode-se verificar que o material apresentou uma quantidade adequada de carbono para carvões ativados, indicando o sucesso da etapa de pirólise; além de impurezas como Zn, Ca, Mg e Si que constituíam o material precursor; Lima (2010) também encontrou impurezas em carvão produzido a partir da lixívia da cinza da casca do arroz, sendo eles Si, Ca, K e Mg, destaca-se a ausência do sódio (Na) que também foi constatada neste trabalho, indicando que houve um processo de lavagem com êxito, tendo solubilizado todo o silicato de sódio formado, assim verifica-se que o silício encontrado na análise de EDS provém do material precursor.

A análise de EDS aplicada ao carvão ativado com ZnCl₂ comprovou que o processo de lavagem do material não ocorreu com êxito, visto que o maior componente em massa do carvão obtido é o Zn, proveniente do material ativante empregado. Ainda que possam ocorrer erros devido aos pontos aleatórios escolhidos para a EDS, as análises de MEV e TGA realizadas também indicaram uma possível falha na lavagem do adsorvente obtido.

Linhares, Marcílio e Melo (2016), avaliaram os elementos presentes em um carvão ativado a partir da casca da acácia negra com ativação química por ácido fosfórico (H₃PO₄), obtendo 59% de C, 24,3% de O, 10,2% de P e 7,2% de Au; sendo este último identificado na análise devido o processo de metalização das amostras. Ramos (2014) produziu carvões ativados a partir de resíduos industriais e agrícolas, através do espectro de EDS ele identificou 73,5% de C, 10% de O e 8,5% de K além

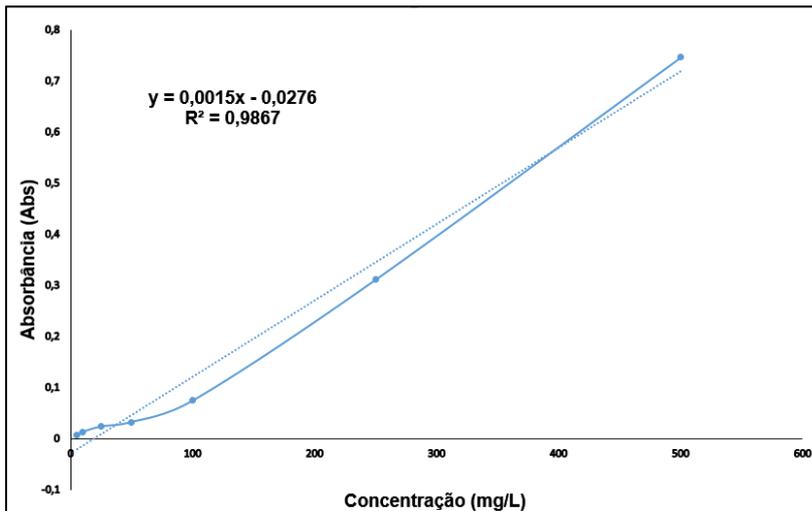
de Na, Mg e Cl; o autor observou que os teores de C, O e K aumentaram após a carbonização/ativação devido a eliminação de compostos oxigenados como monóxido e dióxido de carbono e água. Nobre, Motta, Castro e Bianchi (2015) avaliaram a composição elementar CHNS-O de carvão ativado de resíduo madeireiro da região Amazônica, eles obtiveram 85,38% de C, 1,60% de H, 1,72% de N, 0,03% de S e por diferença 11,25% de O. Martini (2017) produziu carvões ativados a partir de cinzas de caldeira impregnados com NaOH, e encontrou um teor de C abaixo do encontrado neste trabalho, sendo 65,93% no carvão produzido na proporção 1:1 carvão/NaOH e 69,52% na proporção 1:3; também estavam presentes os elementos O, Na, Mg, Al, Si, P, Ca e Fe.

Castro (2009) produziu carvões a partir da borra de café e os ativou com carbonato de potássio (K_2CO_3), dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), obtendo respectivamente 81, 71 e 59% de C nas amostras, sendo o resultado do carvão ativado com K_2CO_3 levemente menor que o encontrado neste trabalho para ativação com NaOH (90,67%) e o carvão ativado comercial (90%). Schneider (2017) produziu carvão ativado a partir da casca de arroz, obtendo 93,84% de C, 5,81% de O, 0,24% de Si, 0,17% de K, e 0,13% de Ca. Gomes e Cechinel (2018) verificaram que a natureza da matéria prima utilizada, interfere na composição elementar do carvão ativado; eles estudaram a remoção de nitrogênio amoniacal por carvão ativado de ossos bovinos, obtendo em massa 23,32% de C, 24,06% de O, 0,43% de Mg, 12,65% de P e 39,55% de Ca.

4.1.4.3 Análise de adsorção das amostras por espectroscopia UV/VIS

Foi obtida a curva de calibração para o corante azul de metileno utilizando as concentrações de 5, 10, 25, 50, 100, 250 e 500 $mg.L^{-1}$, através do comprimento de onda de 665 nm, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 – Curva de calibração para o azul de metileno



Fonte: Do autor (2021).

O coeficiente de correlação (R^2) da equação obtido, foi de 0,9867 onde pode-se observar que há uma pequena margem de erro, porém; o valor está bem próximo de 1, indicando que há uma boa linearidade dos dados.

As isotermas são diagramas que servem para relacionar a concentração de equilíbrio de uma solução, em função da quantidade adsorvida em uma temperatura constante. Geralmente são utilizadas para avaliar a capacidade de adsorção de moléculas específicas por carvões ativados, também é possível determinar a área superficial do material, volume de poros, calor de adsorção e a distribuição estatística. Em processos experimentais torna-se possível avaliar a capacidade de adsorção do adsorvente, adequando corretamente o tipo e as quantidades necessárias do material (HEYLMANN, 2015).

Os parâmetros obtidos das isotermas de Langmuir e Freundlich para a adsorção estão apresentados na Tabela 10. Os dados foram obtidos através das Equações 1, 2 e 4 utilizando o azul de metileno como adsorbato para os carvões ativados com NaOH e ZnCl₂, além do carvão ativado comercial.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos das isotermas de Langmuir e Freundlich para a adsorção do corante azul de metileno

	Modelo	R ²	Constantes	
CA com NaOH	Langmuir	1	$K_L = 8,05 \cdot 10^{-5}$	$q_{\text{máx}} = 5,94 \cdot 10^3$
	Freundlich	0,8986	$K_F = 0,06$	$1/n = 5,26$
CA com ZnCl₂	Langmuir	1	$K_L = 6,81 \cdot 10^{-5}$	$q_{\text{máx}} = 3,93 \cdot 10^3$
	Freundlich	0,7196	$K_F = 0,03$	$1/n = 6,25$
CA Comercial	Langmuir	1	$K_L = 1,8 \cdot 10^{-4}$	$q_{\text{máx}} = 2,37 \cdot 10^3$
	Freundlich	0,9327	$K_F = 0,05$	$1/n = 7,69$

Fonte: Do autor (2021).

O modelo de Langmuir pressupõe a adsorção como um fenômeno químico, ele considera um número de sítios homogêneos, bem definidos e localizados na estrutura; sugerindo um processo em monocamadas, em que o adsorvente está ligado à superfície em sítios diferentes. O K_L está relacionado com a intensidade de interação do fluido com o adsorvente (ALFREDO, 2013).

A isoterma de Freundlich sugere que o processo de adsorção ocorra em camada heterogênea, onde a constante K_F está relacionada com a capacidade de adsorção, a constante $1/n$ quando <1 a adsorção é favorável, quando >1 a adsorção é desfavorável e se for igual a 1 então a isoterma de Freundlich se assemelha a de Langmuir (CASTRO, 2009; HEYLMANN, 2015).

Através da Tabela 10, pode-se observar que os valores de R^2 do modelo de Langmuir para os três carvões ativados ficou em 1, indicando que o processo de adsorção ocorra em monocamada com um melhor ajuste de dados para este modelo. Para o modelo de Freundlich o valor de R^2 também se aproximou de 1 no carvão ativado com NaOH e para o carvão ativado comercial sugerindo uma adsorção em multicamadas; já o carvão ativado com $ZnCl_2$ apresentou baixo coeficiente de correlação, indicando baixa aplicabilidade do modelo de Freundlich para a adsorção do carvão.

Com relação ao parâmetro $1/n$ da isoterma de Freundlich, que está relacionado com a intensidade da interação entre adsorvente e adsorvato; todos os materiais obtidos apresentaram valores de $1/n <1$, indicando um processo químico de adsorção

que ocorre em monocamada, os valores obtidos foram de 5,26 para o CA com NaOH, 6,25 para o CA com ZnCl₂ e 7,69 para o CA comercial.

O parâmetro $q_{\text{máx}}$ indica a capacidade máxima de adsorção em monocamada, sendo obtido neste trabalho os valores de 5944 mg.g⁻¹ para o carvão ativado com NaOH, 3929 mg.g⁻¹ para o carvão ativado com ZnCl₂ e 2372 mg.g⁻¹ para o carvão ativado comercial. O fator K de ambos os modelos utilizados indica a capacidade de adsorção do material, quanto maior a capacidade de adsorção maior deve ser o valor deste parâmetro. Os três carvões ativados analisados apresentaram melhores resultados para a isoterma de Freundlich. Pode-se observar que o CA obtido que teve comportamento mais próximo do CA comercial foi aquele ativado com NaOH.

Bugiereck *et al.* (2014) avaliaram a adsorção do corante azul de metileno por carvão ativado de casca de banana, com ativação química por H₃PO₄ e somente carbonização, obtendo um melhor ajuste de dados para o modelo de Freundlich com 6,89 mg.g⁻¹ para amostra ativada e 8,36 mg.g⁻¹ para a amostra apenas carbonizada. Gonçalves *et al.* (2007) analisaram a capacidade adsorptiva de um carvão produzido a partir de resíduo de erva-mate carbonizados a 500°C por 2 h, obtendo um $q_{\text{máx}}$ de 230 mg.g⁻¹. De Sales, Bertoli, Pinto, Magriotis (2015) produziram um carvão ativado a partir de sabugo de milho impregnado com ZnCl₂, os autores observaram um melhor ajuste dos dados para o modelo de Sips com uma capacidade de adsorção de 124 mg.g⁻¹. Morais *et al.* (2015) produziram um carvão ativado a partir do endocarpo de coco com ativação física por vapor d'água, obtendo uma capacidade máxima de adsorção de 203,04 mg.g⁻¹ com um melhor ajuste dos dados para o modelo de Freundlich. Brum *et al.* (2008) analisaram a adsorção de um carvão ativado obtido do resíduo de beneficiamento do café e impregnado com ZnCl₂, e obtiveram uma capacidade de adsorção de 188,7 mg.g⁻¹ para o azul de metileno. Franciski (2018) produziu carvão ativado a partir do bagaço de malte ativado com CO₂, observando um maior ajuste dos dados para o modelo de Langmuir com capacidade máxima de adsorção de 161 mg.g⁻¹.

A eficácia da remoção do corante azul de metileno após o processo de adsorção também foi avaliada e é apresentada na Tabela 11, em que foi observado a concentração final de corante na solução para os tempos de 6 e 20 minutos de adsorção.

Tabela 11 – Eficiência do processo de adsorção dos carvões ativados

Adsorvente	Tempo (min)	Eficiência (%)
CA com NaOH	6	75,73 ± 17,27
	20	80,89 ± 18,05
CA com ZnCl ₂	6	53,49 ± 41,39
	20	77,02 ± 19,91
CA comercial	6	75,74 ± 21,22
	20	80,89 ± 16,43

Fonte: Do autor (2021).

De acordo com a Tabela 11, pode-se observar que em 6 minutos de adsorção mais de 75% do corante foi removido com o CA com NaOH e com o CA comercial; após 20 minutos mais de 80% do corante foi retirado da solução pelos adsorventes, indicando uma boa eficácia na remoção do azul de metileno. O CA com ZnCl₂ apresentou uma baixa eficiência em 6 minutos com um alto desvio padrão, indicando que a adsorção em concentrações diferentes ocorre em velocidades distintas, e após 20 minutos apresentou uma eficiência inferior aos outros carvões analisados. As características morfológicas e físico-químicas dos carvões, são os principais fatores que influenciam na diferença de remoção do corante.

Patias *et al* (2015) avaliaram a remoção do corante azul de metileno através de um carvão ativado produzido a partir da casca de pequi, obtendo uma eficiência de 68% na remoção do corante. Resultado próximo ao encontrado por Gouveia (2014) ao estudar a remoção de corantes utilizando lodo de estação de tratamento de água e carvão ativado granular, sendo obtido 61% de remoção do azul de metileno, com carvão ativado granular em pH 9,5. A remoção do azul de metileno também foi avaliada por Moraes (2014), que obteve um intervalo de eficiência entre 88,54 e 97,73% utilizando um carvão produzido a partir do mesocarpo do coco-da-baía ativado com H₃PO₄, CH₃COONa e KOH. Heylmann (2015) avaliou a remoção do azul de metileno através de um carvão ativado produzido com caroço de pêssego, carbonizado em temperaturas de 500, 700 e 900°C, obtendo eficiência de remoção do corante superior a 93% para a amostra carbonizada em 700°C. Gonçalves; Nakamura; Veit (2014) produziram um carvão ativado a partir de resíduos da indústria cervejeira

e avaliaram a eficiência da remoção do azul de metileno; obtendo 93,92% de remoção do corante.

5 CONCLUSÃO

O carvão ativado obtido através da ativação com NaOH apresentou um grande potencial de utilização, com boas características morfológicas, térmicas, de superfície e remoção eficaz do corante azul de metileno, indicando que é possível produzir carvão ativado a partir do resíduo de casca de eucalipto branco. Foi observado que o carvão ativado obtido através da ativação com $ZnCl_2$ apresentou morfologia inferior, e eficiência mais baixa na remoção do corante azul de metileno que o carvão ativado com NaOH e o carvão ativado comercial; sugerindo que o melhor processo de ativação ocorra com o NaOH.

A classificação granulométrica foi realizada com sucesso, obtendo um tamanho de partículas de 34 mesh para os carvões ativados obtidos.

Os resultados da análise elementar foram satisfatórios para o carvão ativado com NaOH, indicando que o carvão obtido possui um alto teor de carbono como se espera para este tipo de material, com uma baixa quantidade de impurezas representados por outros elementos. Na amostra obtida por ativação com $ZnCl_2$, a análise elementar revelou um baixo teor de carbono e alta quantidade de impurezas, resultantes do processo de lavagem ineficaz do material.

A análise termogravimétrica demonstrou um bom resultado para estabilidade térmica dos carvões ativados. A análise de MEV apresentou estruturas muito porosas que é o ideal para carvões ativados; indicando também uma obstrução nos poros do carvão ativado com $ZnCl_2$, causado pela etapa de lavagem ineficiente.

A eficiência no processo de remoção do corante foi satisfatória para o CA com NaOH, ficando acima de 70% após 6 minutos de adsorção e acima de 80% após 20

minutos, valores que quase se igualam ao CA comercial. O carvão ativado com ZnCl_2 apresentou resultados inferiores, sugerindo que sejam feitas alterações na metodologia e nos procedimentos de sua obtenção.

Os três CA analisados apresentaram melhores ajustes de dados para a isoterma de Langmuir, indicando um processo de adsorção em monocamada.

Pode-se concluir que o resíduo da casca de eucalipto branco pode ser utilizado como um potencial precursor para a produção de carvões ativados, que podem ser empregados na adsorção de corantes industriais. Sendo observado uma boa eficiência na remoção, além de ser uma fonte renovável e um resíduo sem grandes aproveitamentos pela agroindústria, tornando-se assim uma alternativa mais barata para a produção do carvão ativado além de contribuir para a sustentabilidade e destinação final adequada de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

ABRAF. Associação Brasileira de Florestas Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF**. Ano base 2015. Brasília, DF, ABRAF, 2016. 60p. relatório. Disponível em: <<http://www.abaf.org.br/wp-content/uploads/2016/04/anuario-de-silvicultura-2016.pdf>>. Acesso em: 7 set. 2020.

ALFREDO, Ana Priscila Cristine. **Adsorção de azul de metileno em casca de batata utilizando sistema em batelada e coluna de leito fixo**. 2013. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, PR, 2013. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3689>. Acesso em: 27 set. 2020.

ALFREDO, Ana Priscila Cristine. Adsorção de azul de metileno em casca de batata utilizando sistemas em batelada e coluna de leito fixo. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v.7, n.6, 20 jul. 2015. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3689>. Acesso em: 06 mai. 2021.

ANGIN, Dilek. Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride. **Fuel**, Derby, UK, v.115, p.804-811, jan. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623611300361X>. Acesso em: 17 jun. 2021.

ARAÚJO, L. F.; GUIOTOKU, M. **Produção de carvão ativado a partir de resíduo de Erva-Mate**. XVIII Encontro de Química da Região Sul, Curitiba, PR, 11 nov. 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/877781/1/2010MarcelaEQRS1.pd>. Acesso em: 04 set. 2020.

ARAÚJO, Larissa Sene; COUTINHO, Aparecido dos Reis; ALVAREZ-MENDEZ, Manoel Orlando; MORUZZI, Rodrigo Braga; CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. Caracterização e avaliação de fatores que determinam a remoção de microcistina-LR em carvão ativado granular produzido a partir de diferentes matérias-primas. **Engenharia Sanitária Ambiental**. Rio de Janeiro, RJ, v.23, n.6, p.1131-1142, nov./dez. 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522018005005105&script=sci_arttext. Acesso em: 07 jun. 2021.

ARRUDA, Enoque L. de; ANDRADE, Azarias M. de; JÚNIOR, Ananias F. D. Produção e ativação do carvão vegetal de três espécies florestais. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v.47, n.3, p.323–332, jul. / set. 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/54063>. Acesso em: 07 abr. 2021.

ASIMBAYA Christopher; ROSAS, Nelly; ENDARA, Diana; GUERRERO, Vitor Hugo. Obtención de carbón activado a partir de residuos lignocelulósicos de Canelo, Laurel y Eucalipto. **Revista Politécnica**, Salvador, BA, v. 36, n. 3, p. 1-6, set. 2015. Disponível em: http://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/537. Acesso em: 11 mai. 2021.

BOLIGON, J. **Produção e caracterização de carvão ativado a partir da borra de café solúvel**. 2015, 87f. Dissertação - (Mestrado em Profissional em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, PR, 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1386>. Acesso em: 06 set. 2020.

BRASIL - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Relatório anual (ano base 2018). Brasília: Empresa de Pesquisa Energética. 2019**. 303 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 09 set. 2020.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 que institui a política nacional de resíduos sólidos**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 02 ago. 2020.

BRUM, Sarah Silvia; BIANCHI, Maria Lucia; SILVA, Vanésia Liane da; Maraísa; GONÇALVES, Mário; GUERREIRO, César; OLIVEIRA, Luiz Carlos Alves de. Preparação e caracterização do carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Revista Química Nova**, São Paulo, SP, v.31, n.5, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422008000500019&script=sci_arttext. Acesso em: 06 mai. 2021.

BUGIERECK, A. M.; BEHLING, S. M.; FIORI, M. A.; MELLO, J. M. M. de; COLPANI, G. L.; MAGRO, J. D. **Adsorção de corante catiônico por carvão ativado em casca de banana**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, Florianópolis, SC, 19 out. 2014. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/adsoro-de-corante-catinico-por-carvo-ativado-de-casca-de-banana-17667>. Acesso em: 05 abr. 2021.

CARVALHO, Dayane S. de. **Estudo da dessorção seletiva do corante reativo em carvão ativado**. 2013, 121 f. Dissertação - (Mestrado de desenvolvimento de Processos) - Universidade Estadual de Maringá, Paraná, PR, 2013. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3741>. Acesso em: 24 set. 2020.

CASTRO, C. de. **Preparação de carvão ativado a partir de borra de café: uso como adsorvente e como suporte catalítico para a remoção de poluentes**

orgânicos em meio aquoso. 2009, 105f. Dissertação - (Pós-Graduação em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, MG, 2009. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/6739>. Acesso em: 06 jun. 2021.

CAVALCANTE, Valmir Rocha. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos de coco, banana e laranja.** 2015, 105 f.. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, PE, 2015. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/642>. Acesso em: 05 mar. 2021.

CERQUEIRA, Pedro Henrique Alcântara; VIEIRA, Giovanni Correia; BARBERENA, Lara Magalhães; MELO, Lara Clímaco; FREITAS, Luís Carlos de Freitas . Análise dos Resíduos Madeireiros Gerados Pelas Serrarias do Município de Eunápolis-BA. **Floresta e ambiente**, Seropédica, RJ, v.19, n.4, p.506-510, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-80872012000400013&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 13 mai. 2021.

CITADIN, Thais F.; CECHINEL, Maria A. P. **Dessorção de corante Remazol Azul RR de bagaço de uva: recuperação do corante e reuso do bioissorvente.** 2018, 9f. Monografia (Graduação Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/6788>. Acesso em: 29 abr. 2021.

COSTA FILHO, D. V.; SILVA, A. J.; SILVA, P. A. P.; SOUSA, F. C. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais na elaboração de subprodutos.** II Congresso internacional das ciências agrárias COINTER – PDVAGRO 2017. João Pessoa, 2017. Disponível em: <https://cointer-pdvagro.com.br/wp-content/uploads/2018/02/APROVEITAMENTO-DE-RES%C3%84DUOS-AGROINDUSTRIAIS-NA-ELABORA%C3%87%C3%83O-DE-SUBPRODUTOS.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2021.

DE ALMEIDA, Estela S. C. e Silva; PINTO, Bruna Cristina; LIMA, Athos Silva; OLIVEIRA, Magno André de; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; FERREIRA, Thainá Stefanie; RODRIGUES, Christianne Garcia, MACHADO, Alan Rodrigues Teixeira. Equilíbrio de adsorção do corante rodamina B em carvão ativado obtido dos resíduos do coco verde. **The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC**, Novi Sad, Servia. v.03, n.08, 20 dez. 2017. INSS 2527-1075. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/2402>. Acesso em: 06 jun. 2021.

DE SALES, Priscila. F.; BERTOLI, Alexandre C.; PINTO, Felipe M.; MAGRIOTIS, Zuy Maria. Produção, caracterização e aplicação do carvão ativado obtido a partir do sabugo de milho: a busca pelo reaproveitamento de um resíduo agroindustrial. **Revista Virtual de Química**, Niterói, RJ, v.7, n.4, 21 jan. 2015. ISSN 1984-6835. Disponível em: <http://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/831>. Acesso em: 05 mai. 2021.

ELOY, Elder; CARON, Braulio Otomar; SCHMIDT, Denise; BEHLING, Alexandre; SCHWERS, Luciano; ELLI, Elvis Felipe. Avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando parâmetros morfológicos. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v.43, n.3, p.373 - 384, jul. / set. 2013. Disponível em:

<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/26809>. Acesso em: 7 abr. 2021.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Produção mundial de carvão vegetal**. 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/home/en/>. Acesso em: 27 set. 2020.

FERREIRA, Regiane C.; LIMA, Hugo Henrique Carline de; COUTO JUNIOR, Osório Moreira; ARROYO, Pedro Augusto; CARVALHO, Karina Querne de; BARROS, Maria Angélica Simões Dornellas de. Utilização de carvão ativado de dendê *in natura* e funcionalizado em meio ácido na adsorção de paracetamol, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, RJ, v.23, n.1, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762018000100423&script=sci_arttext. Acesso em: 06 jun. 2021.

FILHO, Wilson B. do N; FRANCO, Carlos R. Avaliação do potencial dos resíduos produzidos através do processamento agroindustrial no Brasil. **Revista Virtual Química**, Niterói, RJ, v.7, n.6, 3 jul. 2015. ISSN 1984-6835. Disponível em: <http://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/880>. Acesso em: 07 set. 2020.

FRANÇA, Cristina Morgana; ROCHA, Juízo Cláudio Gumane Frabisco; KLITZKE, Márcio Pereira da; SILVA, Ricardo Jorge; CONTI JUNIOR, José Reinaldo Moreira da; BASSA, José Luiz Ferraresso; CARVALHO, Ana Gabriela Monnerat. Qualidade da tora e da madeira de clones de Eucalyptus para utilização na indústria de madeira serrada. **Ciência da Madeira**, Pelotas, RS, v.10, n. 1, p. 8-17, 2019. Disponível em: <http://177.105.2.222/handle/1/40637>. Acesso em: 05 mar. 2021.

FRANCISKI, Mauro A. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir de bagaço de malte oriundo de cervejarias para utilização como adsorvente do corante azul de metileno**. 2018, 77f.. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15884>. Acesso em: 06 set. 2020.

GAO, Y.; YUEN, Q.; XU, S.; GAO, B. Activated carbons with well-developed mesoporosity prepared y activation with different alkali salts. **Materials Letters**, Amsterdam, v.146, p.34-36, 2015. Disponível em: <https://sci-hub.tw/10.1016/j.matlet.2015.01.161>. Acesso em: 29 mai. 2021.

GILES, C. H.; MACEWAN, T. H.; NAKHWA, S. N.; SMITH, D. Studies in adsorption, 11. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. **Journal Chemical Society London**. Londres, p. 3973-3993, 1960.

GOMES, David Vieira; CECHINEL, Maria Alice P. **Remoção do nitrogênio amoniacal de efluentes de indústria de pescado por processo adsorativo utilizando carvão ativado**. 2018, 11f. Artigo (Graduação em Engenharia Química) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, Criciúma, SC, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/6775/1/Davi%20Vieira%20Gomes.pdf>Acesso em: 15 jun. 2021.

GONÇALVES, G. C.; NAKAMURA, P. K.; VEIT, M. T. **Produção e caracterização de carvão ativado obtido a partir dos resíduos da indústria cervejeira**. X Encontro Brasileiro sobre Adsorção, Guarujá, 27 abr. 2014. Disponível em: http://www2.unifesp.br/home_diadema/eba2014/br/resumos/R0062-3.PDF. Acesso em: 06 set. 2020.

GONÇALVES, Maraísa; GUERREIRO, Mário César; BIANCHI, Maria Lúcia; OLIVEIRA, Luiz Carlos Alves; PEREIRA, Elaine Inácio; DALLAGO, Rogério Marcos. Produção de carvão a partir do resíduo de erva-mate para a remoção de contaminantes orgânicos de meio aquoso. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, SP, v.31, n.5, set./out. 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-70542007000500017&script=sci_arttext. Acesso em: 05 jun. 2021.

GOUVEIA, Andreia de F. **Remoção de azul de metileno e vermelho remazol por adsorção utilizando lodo de estação de tratamento de água e carvão ativado granular**. 2014. 91f. Monografia (Graduação Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5824>. Acesso em: 24 set. 2020.

HEYLMANN, K. K. A. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssigo no tratamento de efluente têxtil**. 2015, 74f. Monografia (Graduação) - Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/esa/files/2016/03/TCC-Kelly-Heylmann-1.pdf>. Acesso em: 06 set. 2020.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2019**. São Paulo. 2019. 80 p. relatório. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2019-final.pdf>. Acesso em: 07 set. 2020.

ISLAM, Azharul S.; SABAR, B.; BENHOURIA, A.; KHANDAYA, W. A.; ASIF, M.; HAMEED, H. Nanoporous activated carbon prepared from karanj (*Pongamia pinnata*) fruit hulls for methylene blue adsorption. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Derby, UK, v.74, p. 96-104, mai. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107017300299?casa_token=t3AxQ6ADHFQAAAAA:qob4dysGm_VzPSYYkBT6DB5zR62H0p0-3CPcijlYLpsUEbU_Fs-6tVW4dOUvWnm4vSaPfbGfLE4P Acesso em: 16 jun. 2021.

LESSA, Raquel Studart de Farias. **Remoção de corantes azos aniônicos por adsorção em sílica gel funcionalizada com 3-aminopropiltriétoxisilano**. 2018, 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2018. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/34464/5/2018_tese_rsfllessa.pdf Acesso em: 16 jun. 2021.

LIMA, R. B. **Processo para a produção de carvão ativado a partir do subproduto resultante da lixívia alcalina da cinza da casca de arroz**. 2010, 11f.. Dissertação (Mestrado Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94292>. Acesso em: 29 ago. 2020.

LINHARES, B. C. **Preparação do carvão ativado a partir de resíduos de erva-mate e seu uso como adsorvente na remoção de poluente orgânico em solução aquosa.** 2013. 39f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Processos) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7974>. Acesso em: 05 set. 2020.

LINHARES, F. de A.; MARCÍLIO, N. R.; MELO, P. J. Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca de acácia negra com e sem ativação química, **Scientia Cum Industria**, Caxias do Sul, RS, v.4, n.2, p.74-79, 2016. Disponível em: <http://ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/4467>. Acesso em: 06 set. 2020.

MA, Liyan; LI, Jianing; MA, Xiaojun. Preparation and Adsorption of CO₂ and H₂ by Activated Carbon Hollows Fibers from Rubber Wood (*Hevea brasiliensis*). **BioResources**, Raleigh, NC , v.14, n.4, p. 9755-9765, 2019. Disponível em: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_4_9755_Ma_Adsoption_Activated_Carbon_Fibers/7248 Acesso em: 16 jun. 2021.

MARCKMANN, Karina; SILVA, Maria Isabel Pais da Silva;. PETKOWICZ, Diogo; FICKLER, Diana; OLIVEIRA, Antônio Roberto Martins Barboza de. **Caracterização de carvão ativado proveniente da cinza da casca do arroz para uso em tratamento de água e efluentes.** II Encontro Nacional de Tecnologia Urbana, Passo Fundo, 11 nov. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Antonio_Roberto_Oliveira/publication/313793174_Caracterizacao_de_Carvao_Ativado_proveniente_da_cinza_da_casca_de_arroz_para_uso_em_tratamento_de_agua_e_de_efluentes/links/58a5eddaa6fdcc0e077375bb/Caracterizacao-de-Carvao-Ativado-proveniente-da-cinza-da-casca-de-arroz-para-uso-em-tratamento-de-agua-e-de-efluentes.pdf. Acesso em: 29 jun. 2021.

MARTINI, B. K. **Adsorção de amarelo tartrazina e alaranjado de metila em carvão ativo preparado a partir de cinzas de caldeira: cinética, isoterma e caracterização do material.** 2017, 84f. Dissertação (Mestrado Química) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, fev. 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/1377>. Acesso em: 08 set. 2020.

MARTINS, Wanessa Alves; OLIVEIRA, Andréa Maria Brandão Mendes de; MORAIS, Carlos Eduardo Pereira de Moraes; COELHO, Luiz Fernando de Oliveira; MEDEIROS, Jeanne Freire de. Reaproveitamento de resíduos agroindustriais de casca banana para tratamento de efluentes. **Revista Verde**, Pombal, PB, v.10, n.1, p.96 - 102, Pombal-PB, jan-mar, 2015. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7300922>. Acesso em: 07 mar. 2021.

MIORANZA, Daniel T. **Remoção de gasolina sintética de corpos hídricos utilizando carvão ativado como adsorvente.** 2015, 84f. Dissertação (Mestrado Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/159431>. Acesso em: 28 abr. 2021.

MOLETTA, N. R. **Caracterização e aplicação de carvão ativado produzido a partir de biomassa amilácea.** 2011, 62f. Dissertação (Graduação de Tecnologia em

Processos Ambientais do Departamento Acadêmico de Química e Biologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2011. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/252>. Acesso em: 06 mai. 2021.

MORAIS, E. D. de. **Produção do carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-de-baía (cocosnuciferalinn) utilizando H₃PO₄, CH₃COONa e KOH como ativantes**. 2014. 70f. Dissertação (Mestrado Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, jun. 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/22732>. Acesso em: 30 mai. 2021.

MORAIS, Rayssa de Medeiros; SANTANA, Gregório Mateus; LELIS, Roberto Carlos Costa; PAES, Juarez Benigno. Produção de carvão ativado microporoso com vapor d'água preparado a partir do endocarpo de coco (*Cocos nucifera*). **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.6, n.3, p.699-703, set. 2015. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/6717>. Acesso em: 19 mai. 2021.

MORI, Fabio Akira; MENDES, Lourival Marin; TRUGUILHO, Paulo Fernando; CARDOSO, Maria das Graças. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciênc. Tecnol. Alimento.**, Campinas, SP, v. 23, n. 3, p. 396-400, set-dez. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cta/v23n3/18845.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2021.

NOBRE, João Rodrigues Coimbra; MOTTA, Javan; CASTRO, Jonnys Paz; BIANCHI, Maria. Produção de carvão ativado de resíduo madeireiro da região Amazônica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 43, n. 108, p. 895-906, dez. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Trugilho/publication/301584390_Activate_d_carbon_production_of_the_wood_residue_of_the_Amazonian_area/links/571dfc9b08aead26e71a781b/Activated-carbon-production-of-the-wood-residue-of-the-Amazonian-area.pdf. Acesso em: 07 jun. 2021.

ODY, Daniel A. **Remoção de corantes têxteis de efluentes por adsorção com carvão ativado**. 2014, 38f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, dez. 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/109711>. Acesso em: 24 set. 2020.

PATIAS, Samira Gabrielli Oliveira; SÁVIO, Juliana.; COSTELLI, Murilo Cesar; SILVA, Adriano da, CANCELIER, Adriano; LOPES, Toni Jefferson. Obtenção de carvão adsorvente oriundo da casca de pequi (*Caryocar brasiliense*) e sua aplicação no tratamento de efluentes da indústria têxtil através do processo de adsorção. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, RS, v.19, n.2, p.1482-1492, mai./ago. 2015. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/270299681.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2021.

PIMENTEL, J. G.; MACIEL, W. L. S.; SILVA, N. M. da; ARAÚJO, R. V.; VELOSO, C. M.; BONOMO, R. C. F. **Estudo adsorptivo do corante alaranjado de metila em carvões ativados obtidos a partir de resíduos da agroindústria**. XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Carlos, SP, 18 a 21 de out. 2015. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east->

1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/enemp2015/PS-677.pdf.
Acesso em: 07 out. 2020.

PREILIPPER, Udimara E. M.; DALFOVO, Wylmor Constantino Tives; ZAPPAROLI, Irene Domenes; MAROUBO, Lucas Alves; MAINARDES, Eriton Luiz. Aproveitamento do resíduo madeireiro na produção de energia termoelétrica no município de Marcelândia-MT. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, PR, v. 36, p.411-428, abr. 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/39802/27923>. Acesso em: 13 fev. 2021.

RAMOS, M. de S. **Obtenção de Carvões ativados a partir de Resíduos Industriais e Agrícolas**. 2014. 158f. Dissertação (Pós-graduação Química) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/19173>. Acesso em: 02 set. 2020.

REIS, A. da S.; SILVA, N. da; NEVES, U. M. Produção de carvão ativado a partir da casca de arroz. **Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, Tocantins, v.2, n. especial, p. 89-103, 2015. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/1551>. Acesso em: 30 ago. 2020.

ROCHA, Martha Susana Rodrigues Dos Santos; ALMEIDA, Renata Maria Rosas Garcia; CRUZ, Antonio José Gonçalves da. Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras. **Engevista (UFF)**, Rio de Janeiro, RJ, v.19, p.217-235, 2017. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9098/6571>. Acesso em: 12 mai. 2021.

ROCHA, Welca Duarte; LUZ, José Aurélio Medeiros da; LENA, Jorge Carvalho de; BRUÑA-ROMERO, Oscar. Adsorção de cobre por carvões ativados de endocarpo de noz macadâmia e de semente de goiaba. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, MG, v.59, n.4, p.409-414, out./dez. 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672006000400010&script=sci_arttext&tIng=pt. Acesso em: 05 abr. 2021.

RODRIGUES, Patrícia V. **Aplicação de Palygorskita na adsorção de glifosato em efluente aquoso**. 2018, 75f. Monografia (Graduação em Química com Atribuições Tecnológicas,) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/5653>. Acesso em 23 set. 2020.

ROVANI, Suzimara. **Preparo e caracterização de carvão e carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais e aplicação na remoção de estrogênios**. 2015, 153f. Tese (Doutorado) – Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, ago. 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/131683/000981338.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 jun. 2021.

SANTANA, Gregório Mateus; TRUGUILHO, Paulo Fernando; BORGES, Willian Miguel da Silva; BIANCHI, Maria Lúcia; PAES, Juarez Benigno; NOBRE, João Rodrigo Coimbra; MORAIS, Rayssa de Medeiros. Carvão ativado a partir de resíduos de bambu (*Bambusa vulgaris*) utilizando CO₂ como agente ativante para

adsorção de azul de metileno e fenol. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 29, n. 2, p. 769-778, abr./jun. 2019. ISSN 1980-5098. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cflo/v29n2/1980-5098-cflo-29-02-769.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2021.

SANTOS, Mateus P. F. **Carvão ativado: influência das características químicas do precursor de carbono nas suas propriedades e aplicação na imobilização da pepsina**. 2018, 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, Itapetinga, BA, fev. 2018. Disponível em: <http://www2.uesb.br/ppg/ppgecal/wp-content/uploads/2018/04/MATEUS-PEREIRA-FLORES-SANTOS.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2021.

SCHETTINO Jr., Miguel A. FREITAS, Jair C. C.; CUNHA, Alfredo G.; EMMERICH, Francisco G.; SOARES, Ana B.; SILVA, Paulo R. N. Preparação e caracterização de carvão ativado quimicamente a partir da casca de arroz. *Química Nova*, São Paulo, SP, v.30, n.7, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000700031&script=sci_arttext. Acesso em: 30 mai. 2021.

SCHNEIDER, Eduardo L. **Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado**. 2008, 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2008. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1869/1/Eduardo%20Luiz%20Schneider.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2021.

SCHNEIDER, L. T. **Casca de arroz como agente adsorvente no tratamento de óleo residual**. 2017, 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2017. Disponível em: <http://131.255.84.103/bitstream/tede/2997/5/Lara%20Talita%20Schnider.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2021.

SILVA, E. S. de A.; PINTO, B. C.; LIMA, A. S.; OLIVEIRA, M. A.; BEZERRA, A. C. Da Silva; SOUZA, A. S. F.; RODRIGUES, C. G.; MACHADO A. R. T. Equilíbrio de adsorção do corante rodamina B em carvão ativado obtido dos resíduos do coco verde. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Novi Sad, Servia, v.3, n.8, p.1051-1058, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/2402/1727>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SILVA, G. S. P. ; DE LIMA, L. S.; QUINÉIA, S. P. Remoção dos compostos MIB e Geosmina de água de abastecimento usando carvão ativado de carroço de pêssego. **Revista Virtual Química**, Niterói, RJ, v.11, n.3, p.673-685, maio/jun. 2019. INSS 1984-6835. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v11n3a09.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2021.

SILVA, Marcela Gomes da; NUMAZAWA, Sueo; ARAUJO, Maristela Machado; NAGAISHI, Thais Yuri Rodrigues; GALVÃO, Gilvana Rodrigues. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amaz.** Manaus, MA, v.37, n.1, p.61-70, 2007. Disponível

em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672007000100007&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 05 mar. 2021.

STOPPE, A. C. FAIAD, J. C.; CUNHA, L. M. P.; VIEIRA NETO, J. L.; SANTOS, K. G. **Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em carvão de coco verde e carvão ativado**. XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Belém, Pará, 27 a 30 out. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Kassia_Santos3/publication/339146204_REMOCAO_DO_CORANTE_AZUL_DE_METILENO_NO_TRATAMENTO_DE_EFLUENTE_S_POR_ADSORCAO_EM_CARVAO_DE_COCO_VERDE_E_CARVAO_ATIVADO/links/5e415cee299bf1cdb91da0ff/REMOCAO-DO-CORANTE-AZUL-DE-METILENO-NO-TRATAMENTO-DE-EFLUENTES-POR-ADSORCAO-EM-CARVAO-DE-COCO-VERDE-E-CARVAO-ATIVADO.pdf Acesso em: 06 mar. 2021.

VARGAS, A. M. M. **Preparação e caracterização de carvões ativados obtidos a partir de vagens de Flamboyant (*Delonix regia*) mediante ativação química com NaOH**. 2010, 88f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2010. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3900/1/000183931.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2021.

VIANA, L. G.; CRUZ, P. S. Reaproveitamento de Resíduos Agroindustriais. In. IV CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – IVCOBESA. Cruz das Almas, BA. **Anais...** IV Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental – 2016. Cruz das Almas, Bahia, BA, 13 a 16 de jul. 2016. Disponível em: <http://cobesa.com.br/2016/download/cobesa-2016/IVCOBESA-133.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2021.

WERLANG, Eliana Betina; SCHNEIDER, Rosana de Cássia de Souza; RODRIGUEZ, Adriane Lawisch; NIEDERSBERG, Carolina. Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. **Revista Jovens Pesquisadores**, Santa Cruz do Sul, RS, v.3, n.1, p.156 -167, 2013. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/jovenspesquisadores/article/view/3600>. Acesso em: 05 set. 2020.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09