



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

ALZINETE DA CONCEIÇÃO SOUSA AMORIM

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O BIOADSORVENTE (CAPIM-ELEFANTE) E
O CARVÃO ATIVADO COMERCIAL PARA REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS
EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

CAMPINA GRANDE – PB

2019

ALZINETE DA CONCEIÇÃO SOUSA AMORIM

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O BIOADSORVENTE (CAPIM-ELEFANTE) E
O CARVÃO ATIVADO COMERCIAL PARA REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS
EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como exigência parcial para obtenção do título de Engenheira Sanitarista e Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. FERNANDO FERNANDES VIEIRA

CAMPINA GRANDE – PB

2019

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A524e Amorim, Alzinete da Conceição Sousa.

Estudo comparativo entre o bioadsorvente (Capim-elefante) e o carvão ativado comercial para remoção de corantes têxteis em águas residuárias [manuscrito] / Alzinete da Conceicao Sousa Amorim. - 2019.

42 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2019.

"Orientação : Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira , Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Efluente têxtil. 2. Bioadsorvente. 3. Capim-elefante. 4. Carvão ativado. I. Título

21. ed. CDD 660.284 235

ALZINETE DA CONCEIÇÃO SOUSA AMORIM

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O BIOADSORVENTE (CAPIM-ELEFANTE) E
O CARVÃO ATIVADO COMERCIAL PARA REMOÇÃO DE CORANTES
TÊXTEIS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como exigência parcial para obtenção do título de Engenheira Sanitarista e Ambiental.

Aprovada em: 13/6/19
Nota: 10,0 (DEZ, ZERO)

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
Orientador – DESA/CCT/UEPB



Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima
Examinadora I – DESA/CCT/UEPB



Profa. Dra. Neyliane Costa de Souza
Examinadora II – DESA/CCT/UEPB

CAMPINA GRANDE – PB

2019

Às minhas irmãs, de sangue e de coração,
Alzira, Adelia, Mariana, Anna Clara, Milena e Janekelly,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos concedidas, por me fortalecer todos os dias e sempre me lembrar de que não estou só.

Aos meus pais, Samuel e Luzinete, por rezarem por mim e apoiarem as minhas escolhas. Obrigado por terem me guiado no caminho do bem. Vocês dois são meus maiores exemplos de Ser Humano.

Aos meus irmãos por estarem sempre comigo, em pensamento e oração. Especialmente às minhas irmãs: Alzira, Adelia, Mariana, Anna clara e Janekelly, essa conquista é mais de vocês do que minha.

Aos meus amigos da vida: Deoclecio, André, Milena, Evelyn, Anielly e Gabriela, por todo o apoio e suporte durante essa caminhada. Não sei se teria concluído o percurso sem vocês! Obrigado por me auxiliar nas análises laboratoriais, Evelyn, você foi essencial na realização desse trabalho.

Aos meus queridos amigos sobreviventes, Joyce Souza, Shayonara Sabino e Lucian Marinho, por estarem comigo desde o início, em todos os momentos felizes e difíceis. Amo muito vocês.

Ao professor Dr. Fernando Fernandes, por sua orientação, amizade e ética. O Senhor é um grande exemplo de profissional.

A todos os professores e funcionários que contribuíram na minha jornada acadêmica, em especial as professoras Lígia Ribeiro e Neyliane Costa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UEPB) pelo suporte computacional oferecido por meio do *software* STATISTICA.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho e conclusão do curso. Muito obrigado.

RESUMO

A presença de corantes nos efluentes têxteis é um dos problemas enfrentados por esse setor industrial, uma vez que tratamentos convencionais não são capazes de remover os corantes presentes nos efluentes, já que estes são compostos solúveis de difícil degradação. Uma alternativa para remover cor desses efluentes é a adsorção, que é um processo baseado na transferência de massa em que o material que adsorve (adsorvente) deve apresentar elevada área superficial porosa, e o material adsorvido (adsorvato) é o que se acumula na interface do material. Adsorventes que apresentam características adsorptivas semelhantes às do carvão ativado, mas que sejam menos custosos e oriundos de resíduos naturais, são cada vez mais estudados. Este trabalho investiga o uso potencial do capim elefante (*Pennisetum purpureum*) como adsorvente e o compara ao carvão ativado. A partir do bioadsorvente, foram realizados os estudos de cinética e de equilíbrio. Os resultados indicaram que a capacidade de adsorção ótima foi obtida quando se utilizou 0,2 g de adsorvente, concentração do adsorvato igual a 100 mg/L e tempo de agitação de 60 min. Os resultados experimentais indicam que o modelo de pseudo-segunda ordem é o mais apropriado para descrever a cinética de adsorção e para o estudo de equilíbrio, os dados se ajustaram melhor a isoterma de Lagmuir. A maior percentagem de remoção do corante ocorreu com o carvão ativado, sendo em torno de 94,16%. O capim elefante se mostrou eficiente removendo cerca de 66,8% do corante da solução, podendo ser indicado como uma alternativa viável para o tratamento de efluentes industriais têxteis, já que é uma matéria-prima renovável e de baixo custo.

Palavras-Chave: Efluente têxtil. Bioadsorvente. Capim elefante. Carvão ativado.

ABSTRACT

The presence of dyes in the textile effluents is one of the problems faced by this industrial sector, since conventional treatments are not able to remove the dyes present in the effluents, since these are soluble compounds of difficult degradation. An alternative to remove color from these effluents is the adsorption, which is a process based on the mass transfer in which the material that adsorb (adsorbent) must have high porous surface area, and the adsorbed material (adsorbate) is what accumulates in the interface of material. Adsorbents that have adsorptive characteristics similar to those of activated carbon, but which are less expensive and come from natural waste, are increasingly studied. This work investigates the potential use of elephantgrass (*Pennisetum purpureum*) as an adsorbent and compares it to activated charcoal. From the bioadsorbent, kinetic and equilibrium studies were performed. The results indicated that the optimum adsorption capacity was obtained when using 0.2 g of adsorbent, adsorbate concentration equal to 100 mg / L and agitation time of 60 min. The experimental results indicate that the pseudo-second order model is the most appropriate to describe the adsorption kinetics and for the equilibrium study, the data better fit the Lagmuir isotherm. The highest percentage of dye removal occurred with activated carbon, being around 94.16%. The elephant grass proved efficient removing about 66.8% of the dye from the solution and could be indicated as a viable alternative for the treatment of industrial textile effluents, since it is a renewable and low cost raw material.

Keywords: Textile effluent. Bioadsorbent. Elephant grass. Activated charcoal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de adsorção.....	16
Figura 2 - Etapas da cinética de adsorção.....	18
Figura 3 - Possíveis formas de comportamento de isothermas de adsorção.....	21
Figura 4 - Estrutura do Carvão Ativado	23
Figura 5 - Plantação de Capim Elefante	24
Figura 6 - Capim Elefante: seco e triturado (a) e peneirado (b).....	25
Figura 7 - Curva de absorvância para o corante vermelho Tupy	26
Figura 8 - Curva de calibração para o comprimento de onda de 500nm.....	27
Figura 9 - Carvão ativado pulverizado	30
Figura 10 - Gráfico de Pareto - Efeitos para quantidade adsorvida (Q_t).....	32
Figura 11 - Gráfico de Pareto - Efeitos para remoção do corante (%Rem).....	32
Figura 12 - Gráfico de contorno para quantidade adsorvida (Q_t)	34
Figura 13 - Gráfico de contorno para remoção do corante (%Rem)	34
Figura 14 - Ajuste dos modelos cinéticos.....	36
Figura 15 - Ajuste dos isothermas de adsorção.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores da absorvância para diferentes concentrações	27
Tabela 2 - Variáveis e níveis do planejamento fatorial 2^3	28
Tabela 3 - Matriz de planejamento fatorial	28
Tabela 4 - Resultados obtidos para as variáveis respostas (quantidade adsorvida (Q_t) e remoção do corante (%Rem))	31
Tabela 5 - ANOVA e coeficiente de determinação do planejamento fatorial	33
Tabela 6 - Valores dos parâmetros e ajuste dos modelos cinéticos	35
Tabela 7 - Valores dos parâmetros e ajuste aos isotermas de adsorção	36
Tabela 8 - Análise comparativa entre o bioadsorvente e o carvão ativado comercial .	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos.....	13
1.1.1.Objetivo geral.....	13
1.1.2.Objetivos específicos.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1. A indústria têxtil e os corantes.....	14
2.2. Tratamento de efluentes têxteis	15
2.3. Adsorção.....	16
2.3.1.Cinética de adsorção.....	18
2.3.1.1. Modelo de Pseudo-primeira ordem.....	19
2.3.1.2. Modelo de Pseudo-segunda ordem	19
2.3.2.Equilíbrio de adsorção.....	20
2.3.2.1. Isoterma de Langmuir	21
2.3.2.2. Isoterma de Freundlich.....	22
2.3.2.3. Isoterma de Sips.....	22
2.4. Adsorventes	23
2.4.1.Carvão Ativado	23
2.4.2.Capim Elefante.....	23
3. METODOLOGIA	25
3.1. Preparo do adsorvente	25
3.2. Preparo do adsorbato	26
3.3. Curva de Calibração	27
3.4. Planejamento Experimental	28
3.5. Estudo cinético e de equilíbrio.....	29
3.6. Carvão Ativado	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. Planejamento Experimental	31

4.2. Estudo Cinético	34
4.3. Estudo de Equilíbrio	36
4.4. Análise Comparativa	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a preocupação com a conservação dos recursos naturais tem aumentado significativamente. As indústrias, grandes vilãs da degradação ambiental, produzem elevada quantidade de efluentes, que antes de serem descartados devem ser tratados, para minimizar seus efeitos poluidores nos corpos hídricos. A ideia de tratar efluentes com o objetivo de apenas atender a legislação foi substituído pelo pensamento de lucratividade e sustentabilidade, no qual otimiza-se o processo produtivo, o efluente tratado é reutilizado em fins menos nobres, assegura-se um menor consumo de água de melhor qualidade e a imagem positiva da empresa perante os consumidores é garantida.

A indústria têxtil faz uso de grande volume de água e de insumos químicos em seu processo produtivo e, conseqüentemente, gera efluentes ricos em matéria orgânica e cor elevada devido ao uso de corantes na etapa de tingimento dos tecidos. A presença de corantes nos efluentes é facilmente perceptível, pois afeta a estética, a transparência da água e a solubilidade de gases nos corpos receptores, reduzindo a capacidade de regeneração dos corpos hídricos uma vez que dificulta a penetração de luz solar e conseqüentemente altera o processo de fotossíntese (GUARANTINI; ZANONI, 2000). Por este motivo, há na legislação exigências para que as indústrias reduzam a liberação destas substâncias no meio ambiente.

A Legislação Ambiental Brasileira, por meio da Resolução CONAMA 430/2011, que complementa e altera a resolução 357/2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e fixa limites para a cor como parâmetro de qualidade. De acordo com a Resolução, fica determinado que em corpos de águas doces, a cor verdadeira deve estar no nível de cor natural do corpo de água (Classe I) ou devem estar no limite de até 75 mg Pt/L (Classes II e III). Nas águas salinas, devem estar virtualmente ausentes os corantes de fontes antrópicas. E nas águas salobras, substâncias que produzem cor, odor e turbidez devem estar virtualmente ausentes.

A complexidade e diversidade dos efluentes têxteis perante às imposições das legislações, têm levado ao desenvolvimento de tecnologias de tratamento que busquem, de forma mais adequada, destruir ou imobilizar compostos tóxicos, considerando custo, tempo e eficiência (SILVA, 2015). Um dos mais satisfatórios processos de tratamento de efluentes aquosos é o processo adsorptivo, inclusive com baixo custo relativo e certa facilidade operacional.

A adsorção envolve a transferência de massa, em que constituintes de uma fase fluida se concentram na superfície de uma fase sólida, sendo que o material a ser adsorvido é o adsorvato e o material sólido onde ocorre a adsorção é o adsorvente (FARIAS, 2018). Os principais fatores que influenciam o processo de adsorção são: temperatura, área superficial, pH do meio, natureza do solvente e as propriedades do adsorvente e do adsorvato.

Uma vez que os componentes adsorvidos, concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, mais favorável será a adsorção (NASCIMENTO et al., 2014). O processo de adsorção faz o uso de materiais que possuem alta capacidade adsortiva, como o carvão ativado. O maior empecilho de uso desse adsorvente é o seu custo elevado que onera o tratamento, contudo, materiais alternativos que apresentem características adsortivas semelhantes ao carvão ativado, mas que tenham elevada disponibilidade e baixo custo têm sido descobertos.

Na literatura, adsorventes produzidos a partir do mesocarpo de coco verde, casca de abacaxi, sabugo de milho, casca de abacaxi e casca de banana foram avaliados como alternativas eficazes e viáveis (ALMEIDA et al, 2014; ANTUNES et al, 2018; SOUSA, 2015; XAVIER, 2017).

Considerando as vantagens e características do processo adsortivo, a busca por materiais adsorventes que substituam o carvão ativado e que sejam técnica e economicamente viáveis torna-se fundamental. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar e comparar a eficiência de uso do capim elefante e do carvão ativado comercial para remoção de corante comercial (cor vermelha) de efluentes têxteis.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Produzir e comparar a eficiência no processo de adsorção do corante comercial – cor vermelha, entre o bioadsorvente (produzido a partir do capim-elefante), e o carvão ativado comercial em pó.

1.1.2. Objetivos específicos

- Produzir o bioadsorvente a partir do capim elefante (*Pennisetum purpureum*);
- Aplicar planejamento fatorial experimental no estudo do processo de adsorção utilizando o bioadsorvente;
- Avaliar a capacidade de adsorção do bioadsorvente por meio do estudo da cinética e equilíbrio da adsorção;
- Comparar e avaliar a eficiência de adsorção dos dois adsorventes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A indústria têxtil e os corantes

A indústria têxtil caracteriza-se por fazer uso de inúmeras tecnologias e processos de fabricação, utilizar inúmeras matérias-primas, fibras de origem animal e vegetal, fibras sintéticas, corantes, pigmentos e produtos químicos. Destaca-se como uma atividade potencialmente poluidora por gerar grandes volumes de efluentes líquidos com elevado teor de corantes e compostos orgânicos que afetam diretamente a vida aquática, já que são estáveis à luz e ao calor e não se degradam biologicamente, o que dificulta sua remoção através dos tratamentos convencionais de efluentes (NAGEL-HASSEMER, 2012). Estes efluentes afetam o valor estético dos corpos hídricos e inibem o crescimento da biota aquática, já que interfere na penetração de luz no meio aquático, retardando a fotossíntese.

Na indústria têxtil, o processo de tingimento é um dos fatores fundamentais no preparo dos substratos e produz a maior quantidade de efluentes altamente corados. O que determina a quantidade de corante descarregado no efluente é o grau de fixação no substrato que varia em função do tipo de corante, da intensidade da cor, do tipo de fibra processada e do método de aplicação (FILHO et al., 2016).

De acordo com Guaratini e Zanoni (2000), as fibras têxteis podem ser naturais ou sintéticas e cada tipo exige corantes com características próprias e definidas. As fibras naturais são baseadas em celulose e proteína e se fazem presentes na lã, algodão, linho e seda. Já as fibras sintéticas são comercialmente encontradas como viscose, acetato de celulose, poliamida, poliéster e acrílico.

Os corantes são classificados em classes de acordo com o modo de fixação à fibra (afinidade com o substrato têxtil processado) ou com a sua composição química. Alguns dos grupos de corantes são descritos a seguir (GUARATINI; ZANONI, 2000):

- Corantes reativos: são compostos aniônicos muito solúveis em água, possuem baixa degradabilidade e são capazes de realizar ligações covalentes com os grupos hidroxila das fibras celulósicas quando em meio alcalino. Possui o grupo “azo” em sua estrutura e são aplicados principalmente em fibras naturais.
- Corantes diretos: também são compostos aniônicos e solúveis em água, porém sua união ocorre por interações de van der Waals. São aplicados em fibra de algodão, linho e sisal. Esta classe de corantes é constituída principalmente por corantes contendo mais de um grupo “azo” ou pré-transformados em complexos metálicos.

- Corantes ácidos: são utilizados para fibras de lã e nylon. São compostos solúveis em água e aniônicos e portam de um a três grupos sulfônicos. Podem possuir íons metálicos em sua estrutura, e também não se degradam durante o tingimento por serem muito estáveis.
- Corantes dispersos: são compostos insolúveis em água, aplicados em fibras hidrofóbicas e quase todas as fibras sintéticas através de uma fina suspensão aquosa.
- Corantes de enxofre: após a aplicação, se caracterizam por compostos macromoleculares com pontes de polissulfetos, os quais são insolúveis em água. Conferem cores como o preto, o verde oliva e o azul marinho.
- Corantes básicos: Compostos solúveis em água e catiônicos, que interagem principalmente com as fibras sintéticas, por interações eletrostáticas. Possuem grupos amino em sua estrutura química e podem apresentar toxicidade.

2.2. Tratamento de efluentes têxteis

Para tratamento de efluentes industriais, os processos mais comuns são biodegradação, filtração, técnicas de floculação e os processos de adsorção. Contudo, são processos caros e, em geral, ineficientes para remover cor devido ao fato de que uma vasta gama de corantes são estáveis aos agentes de biodegradação, fotodegradação e oxidação e apresentam estrutura aromática complexa (SOUSA, 2015). A necessidade de se adequar à legislação ambiental vigente impulsiona o desenvolvimento de tecnologias de tratamento que sejam eficientes e menos custosas.

Os tratamentos em geral fazem uso de métodos químicos, físicos e biológicos ou a combinação deles. Dentre os métodos químicos destacam-se os processos oxidativos, que podem utilizar reagente de Fenton ($\text{Fe (II)-H}_2\text{O}_2$), Ozônio (O_3), Hipoclorito de Sódio (NaOCl) e processos fotoquímicos. Dos métodos físicos destacam-se processos de coagulação/floculação, filtração por membrana, troca iônica, e remoção por adsorção. Já os métodos biológicos utilizam-se de microrganismos, através de processos aeróbios e anaeróbios.

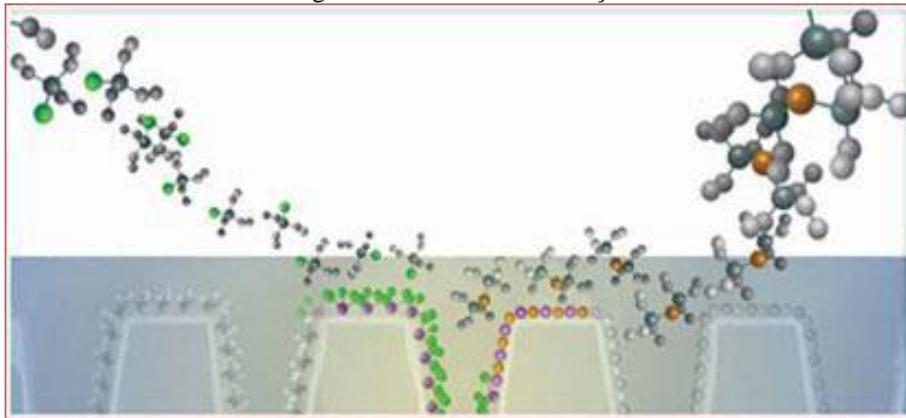
Um dos métodos que merece destaque é o de adsorção com adsorventes alternativos pois, apresenta baixo custo, uma vez que reaproveita biomassa. Processos adsorptivos são largamente utilizados para remoção de cor, odores ou gosto no tratamento e purificação de águas, óleos, produtos farmacêuticos e efluentes de processos industriais. Tal processo utiliza

adsorventes cuja superfície porosa interna é acessível para combinação seletiva com solutos em uma fase gasosa ou líquida (SILVA, 2015).

2.3. Adsorção

A adsorção é um processo físico-químico de transferência de um ou mais constituintes de uma fase fluida para a superfície de uma fase sólida, onde o material inicial a ser adsorvido é o adsorbato e o material sólido onde ocorre a adsorção é chamado de adsorvente (Figura 1). Uma vez que os componentes adsorvidos se concentram sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, mais favorável será a adsorção (NASCIMENTO, 2018).

Figura 1 - Processo de adsorção



Fonte: Silva (2017)

Devido a sua afinidade com o adsorvente, as moléculas presentes em uma solução podem se ligar em sua superfície e dessa forma serem separadas. De acordo com Nascimento et al (2014), os processos de separação por adsorção estão baseados em três mecanismos: o estérico, o de equilíbrio e o cinético. No mecanismo estérico, apenas determinadas moléculas são aceitas, pois os poros do material adsorvente possuem dimensões características. Para o mecanismo de equilíbrio, têm-se as habilidades dos diferentes sólidos para acomodar espécies de adsorbatos, que são adsorvidos, preferencialmente, a outros compostos. E o mecanismo cinético está baseado nas diferentes difusividades das diversas espécies nos poros adsorventes.

A fixação do corante às fibras têxteis envolve basicamente quatro tipos de interações: iônicas, covalentes, de hidrogênio e de Van de Waals. Dependendo das forças envolvidas, a adsorção pode ser classificada em 2 tipos: fisiossorção e quimiossorção. Contudo, não é fácil

diferenciar entre os dois tipos de adsorção em certos casos, os dois tipos podem ocorrer simultaneamente e pode se ter situações intermediárias. Nascimento et al (2014) explicam que na fisiossorção, as interações entre o adsorvente e o adsorbato são de tipo Van der Waals, ligações fracas e cujo processo é reversível. Já na quimiossorção, as interações entre adsorvente e adsorbato são ligações químicas mais fortes. A formação de ligações químicas durante o processo de adsorção faz com que este seja mais seletivo, dependendo da natureza das substâncias envolvidas.

O processo de adsorção não é influenciado pela toxicidade e degradabilidade do efluente. Depende principalmente da estrutura química da superfície do adsorvente e das propriedades do corante (SILVA, 2015). Existem ainda alguns fatores que podem influenciar a adsorção como: natureza do adsorvente, do adsorbato, tempo de contato, concentração da solução e condições operacionais, tais como temperatura do sistema e pH do meio (SOUSA, 2015).

A eficiência do processo adsorptivo será maior, quanto maior for a área superficial do material adsorvente onde o adsorbato está concentrado. Por isso, os adsorventes geralmente são sólidos com partículas porosas. O tamanho e o volume dos poros limitam as dimensões das moléculas, que podem ser adsorvidas enquanto que a área superficial disponível limita a quantidade de material que pode ser adsorvida (FARIAS, 2018).

O mecanismo de adsorção na superfície de macroporos não difere que em superfícies planas. A área superficial específica de sólidos macroporosos é muito pequena, por isso adsorção nesta superfície é geralmente negligenciada (DABROWSKI, 2005). A difusão intrapartícula do soluto parece controlar a taxa de adsorção, assim a taxa é parcialmente uma função da distribuição do tamanho do poro do adsorvente, do tamanho molecular e da configuração do soluto, e das propriedades eletrocinéticas relativas do adsorvente e do adsorbato (WEBER, 1963).

O emprego da adsorção tem sido considerado superior a outras técnicas para reuso de água em termos de custo inicial, flexibilidade, simplicidade de projetos e facilidade de operação. Sua eficiência está diretamente relacionada ao tipo de adsorvente utilizado.

Devido à procura de materiais que ofereçam um bom desempenho associado a um baixo custo e elevada disponibilidade, a busca de adsorventes está focada nas biomassas constituídas de resíduos naturais (OLIVEIRA, 2016).

Além do carvão ativado comercial, podem ser citados os produtos residuais agrícolas, como bagaço de cana e casca de frutas, a exemplo do mesocarpo de coco verde, casca de

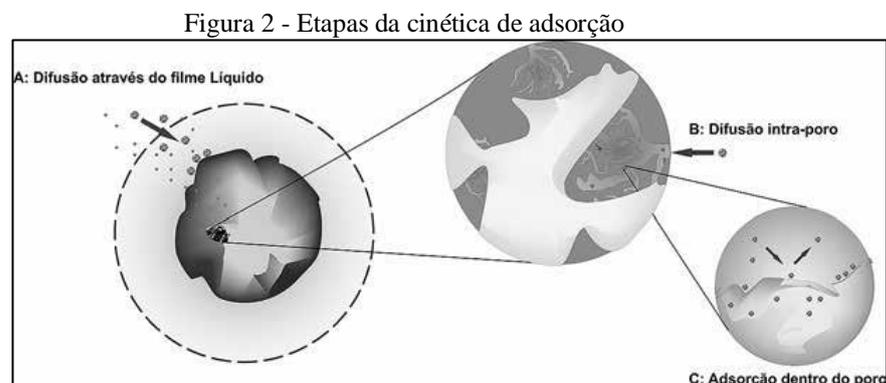
abacaxi, sabugo de milho, casca de abacaxi e casca de banana (XAVIER, 2017; ALMEIDA et. al, 2014; ANTUNES et. al , 2018; SOUSA, 2015).

A utilização de bioadsorventes reduz o impacto ambiental de duas formas: a biomassa residual, que é um poluente, é removida do local onde foi gerada ou depositada e efluentes contaminados podem ser tratados com este resíduo.

2.3.1. Cinética de adsorção

A cinética da adsorção descreve a velocidade de remoção do soluto sendo dependente das características físicas e químicas do adsorvato, adsorvente e sistema experimental. A partir dela determina-se o tempo em que as amostras atingirão o equilíbrio, além de determinar parâmetros como ordem da reação, constante de velocidade, energia de ativação e taxa de adsorção inicial (NASCIMENTO et al, 2014). O estudo cinético permite ainda determinar a quantidade de soluto que é retirada de uma solução com relação ao tempo, o que é de grande importância para tornar o processo mais rápido e eficiente, para economizar tempo e custos.

As etapas da cinética de adsorção estão descritas na Figura 2.



Fonte: Nascimento et. al, 2014

A primeira etapa no processo de adsorção refere-se à adsorção na superfície externa (mais rápida), enquanto na segunda etapa, a velocidade da difusão intrapartícula é controlada e a adsorção mais lenta; já a terceira etapa representa o estágio final de equilíbrio, no qual a difusão intrapartícula começa a diminuir lentamente devido às baixas concentrações do adsorvato na solução (CORDEIRO, 2017). Quanto menor a porosidade do material adsorvente mais rápida é a cinética de adsorção (SILVA, 2015).

Diversos modelos cinéticos podem ser utilizados para descrever a adsorção de um adsorvato sobre um adsorvente. Contudo, os modelos empregados frequentemente são os de pseudo-primeira ordem e de pseudo-segunda ordem (NASCIMENTO, 2014).

2.3.1.1. Modelo de Pseudo-primeira ordem

Em 1898, Lagergren propôs uma equação da velocidade a qual é um modelo de primeira ordem desenvolvido para a adsorção em sistemas líquidos – sólidos, baseando-se na capacidade de adsorção do sólido (HO, 2006). É expressa da seguinte forma:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

Equação (1)

Em que:

k_1 : constante da taxa de adsorção de pseudo-primeira ordem (min^{-1});

q_e : quantidade adsorvida de adsorvato no equilíbrio (mg/g);

q_t : quantidade adsorvida de adsorvato no tempo t (mg/g).

Após a integração da equação 1 e aplicando-se condições de contorno: $q_t = 0, t = 0$; quando $q_t = q_e, t = t$ obtém-se a Equação não-linear 2:

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t})$$

Equação (2)

2.3.1.2. Modelo de Pseudo-segunda ordem

A equação cinética de segunda ordem pode ser representada por: (HO, 2006).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

Equação (3)

Em que:

k_2 : constante da taxa de adsorção de pseudo-segunda ordem (min^{-1});

q_e : quantidade adsorvida de adsorvato no equilíbrio (mg/g);

q_t : quantidade adsorvida de adsorvato no tempo t (mg/g).

Após a integração da equação 3 e aplicando-se condições de contorno: $q_t = 0, t = 0$; quando $q_t = q_e, t = t$ obtém-se a equação não-linear 4:

$$q_t = \frac{k_2 * q_e^2 * t}{1 + q_e * k_2 * t}$$

Equação (4)

2.3.2. Equilíbrio de adsorção

De acordo com Nascimento et al (2014), quando uma determinada quantidade de adsorvente entra em contato com um dado volume de adsorbato, a adsorção ocorre até que o equilíbrio seja alcançado. Ou seja, as moléculas do adsorbato tendem a fluir para a superfície do adsorvente até que a concentração do soluto (C_e) permaneça constante.

As curvas (isotermas) de adsorção expressam a variação da concentração de equilíbrio em uma determinada temperatura e indicam como o adsorvente efetivamente adsorverá as impurezas presentes e se a purificação requerida pode ser obtida, bem como apresenta uma estimativa máxima da capacidade de adsorção. Dependem de vários fatores e expressam a propriedades da superfície e a afinidade da biomassa pelo adsorbato. O valor da máxima capacidade de adsorção é uma característica importante para conhecer o desempenho da biomassa a altas concentrações do adsorbato (OLIVEIRA, 2016).

As isotermas podem ser obtidas pela seguinte equação:

$$q_e = \frac{(C_i - C_{eq}) * V}{m}$$

Equação (5)

Em que:

q_e : quantidade adsorvida por massa de adsorvente (mg/g);

C_i : concentração inicial do adsorbato (mg/L);

C_{eq} : concentração do adsorbato no equilíbrio (mg/L);

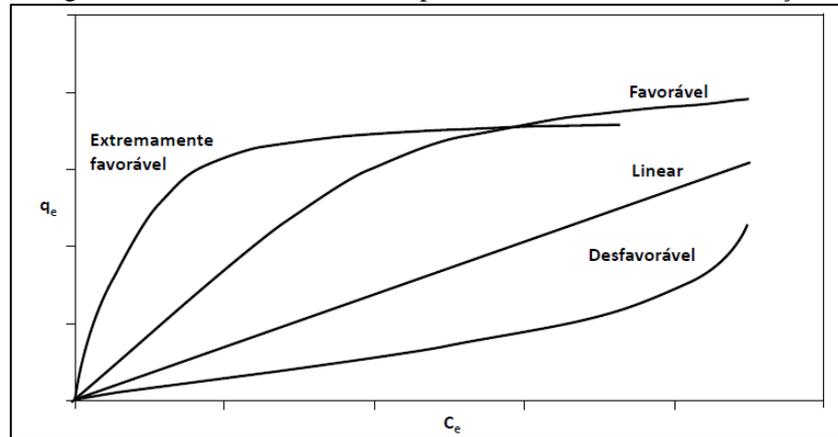
V : volume da solução empregado na adsorção (L);

m : massa do adsorvente (g).

A forma como se comporta o gráfico (Figura 3) fornece informações sobre o mecanismo envolvido no processo de adsorção. A isoterma linear explica que a quantidade adsorvida por massa de adsorvente é proporcional à concentração do adsorbato no equilíbrio. Já a isoterma favorável afirma que a quantidade adsorvida por massa de adsorvente é alta para uma baixa concentração do adsorbato no equilíbrio. A isoterma irreversível explica que a quantidade adsorvida por massa de adsorvente independe da concentração do adsorbato no

equilíbrio; e a isoterma desfavorável explica que a quantidade adsorvida por massa de adsorvente é baixa, mesmo para uma alta concentração do adsorvato no equilíbrio (NASCIMENTO, 2014).

Figura 3 - Possíveis formas de comportamento de isotermas de adsorção



Fonte: Nascimento (2014)

2.3.2.1. Isoterma de Langmuir

A isoterma de Langmuir considera que existe apenas interação entre a molécula adsorvida e o adsorvente. Assume também que a adsorção ocorre em uma única camada (monocamada) em uma superfície que contém um número fixo e definido de sítios, ou seja, é válida para processos de adsorção química, em que não há interação entre moléculas adsorvidas em sítios vizinhos. O modelo de Langmuir prediz que a adsorção ocorre de maneira uniforme sobre os sítios específicos do adsorvente, uma vez que um adsorvato ocupa um sítio e nenhuma outra adsorção pode ter lugar neste sítio, dessa forma um valor de saturação é atingido (OLIVEIRA, 2016).

$$q_e = \frac{q_m * k_l * C_e}{1 + k_l * C_e}$$

Equação (6)

Em que:

q_e : quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g);

q_m : capacidade máxima de adsorção (mg/g);

k_l : constante da equação de Langmuir (L/mg);

C_e : concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L).

2.3.2.2. Isoterma de Freundlich

A isoterma de Freundlich descreve o equilíbrio em superfícies heterogêneas, considerando a adsorção em multicamadas. Essa isoterma não considera as interações entre as moléculas, e é geralmente aplicada aos processos de adsorção física. Sugere que a concentração do adsorvato na superfície do adsorvente aumenta à medida que também aumenta a concentração do adsorvato na solução (OLIVEIRA, 2016).

$$q_e = k_f * C_e^{1/n}$$

Equação (7)

Em que:

q_e : quantidade de soluto adsorvido (mg/g);

C_e : concentração de equilíbrio em solução (mg/ L);

$1/n$: constante relacionada à heterogeneidade da superfície;

k_f : constante de capacidade de adsorção de Freundlich ((mg/g) (L/mg) $^{1/n}$).

2.3.2.3. Isoterma de Sips

A isoterma de Sips se comporta semelhante com a de Lagmuir para baixas concentrações e prevê uma capacidade de adsorção em monocamadas, como Freundlich, para altas concentrações, por isso, também pode ser denominada com Lagmuir-Freundlich. Sua equação é semelhante as isotermas em que é baseada:

$$q_e = Q_{\max} \frac{k_{eq} * C_e^{n_s}}{1 + k_{eq} * C_e^{n_s}}$$

Equação (8)

Em que:

q_e : quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g);

Q_{\max} : capacidade máxima de adsorção teórica (mg/g);

K_{eq} : constante de equilíbrio da reação de adsorção (L/mg);

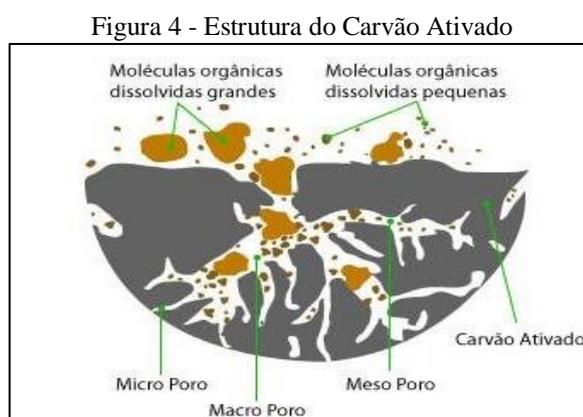
n_s : constante do modelo de Sips.

2.4. Adsorventes

A adsorção destaca-se por ser um processo de tratamento de efluentes têxteis eficiente, e que permite o uso de adsorventes de baixo custo e boa eficiência, a exemplo da casca de algumas frutas (ALMEIDA et al, 2014; SOUSA, 2015; XAVIER, 2017). Tais adsorventes alternativos, em geral, apresentam uma boa capacidade de degradar, imobilizar e/ou remover corantes além de estarem abundantemente disponíveis, uma vez que podem ser oriundos de resíduos de outros processos, contribuindo assim para a remoção de resíduos descartáveis.

2.4.1. Carvão Ativado

O adsorvente mais conhecido e que apresenta boa capacidade de adsorção é o carvão ativado. É um material que apresenta grande área superficial e estrutura microporosa (Figura 4), baixa reatividade térmica, resistência a grandes variações de pH no meio e capacidade de regeneração, porém ainda é considerado um produto caro.



Fonte: Da Silva (2017)

2.4.2. Capim Elefante

Uma alternativa de substituição ao carvão ativado é o capim elefante (*Pennisetum purpureum*), planta gramínea promissora na remoção de poluentes em água, devido ao fato de apresentar alta produtividade e ser de fácil obtenção (NASCIMENTO et. al., 2017).

Diversos autores já estudaram a capacidade de adsorção do capim elefante (Figura 5) para remover compostos de efluentes têxteis e farmacêuticos, apontando esse material como adsorvente eficiente (MAIA et. al., 2013; CORAL et. al., 2017; OLIVEIRA et. al., 2018).

Figura 5 - Plantação de Capim Elefante



Fonte: Embrapa (2016)

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campus I de Campina Grande.

O corante comercial têxtil utilizado nas análises de remoção por processo de adsorção foi o Tupy 15 – cor vermelho, classificado como corante direto de composição orgânica e de pH neutro. Por ser muito solúvel, esse corante é altamente resistente aos processos de tratamentos convencionais. O corante apresentou absorvância máxima no comprimento de onda de 500 nm, a medição foi realizada pelo método espectrofotométrico na região do visível, com a comparação da eficiência de remoção sobre condições variáveis de massa do adsorvente, tempo de agitação e concentração do adsorvato, entre o bioadsorvente e carvão ativado comercial.

3.1. Preparo do adsorvente

A biomassa utilizada para produção do adsorvente foi o capim elefante (*Pennisetum purpureum*), coletado na Zona Rural do município de Livramento na Paraíba. Inicialmente o capim foi triturado em uma máquina forrageira (TRF 400F 2CV - Marca: TRAPP) para remoção do volume. Posteriormente a biomassa foi seca em estufa bacteriológica de esterilização e secagem da marca Marconi, modelo MA032/1, a uma temperatura de 80 °C por um período de 24 horas para garantir uma eficiente remoção de umidade do produto.

Após a secagem, o material foi triturado e classificado (Figura 6a) através de uma peneira de análise granulométrica de 0,300 mm de abertura (Tyler 48) para uniformizar a granulometria, obtendo-se o pó (Figura 6b).

Figura 6 - Capim Elefante: seco e triturado (a) e peneirado (b)



Por apresentar uma coloração esverdeada, o material adsorvente foi submetido a lavagens com água destilada para exaurir a cor e assim evitar que ela influencie no processo de remoção do corante. Após a lavagem, o material foi seco novamente nas mesmas condições (80 °C e 24h) e armazenado em embalagem hermeticamente fechada para evitar absorção de umidade do meio.

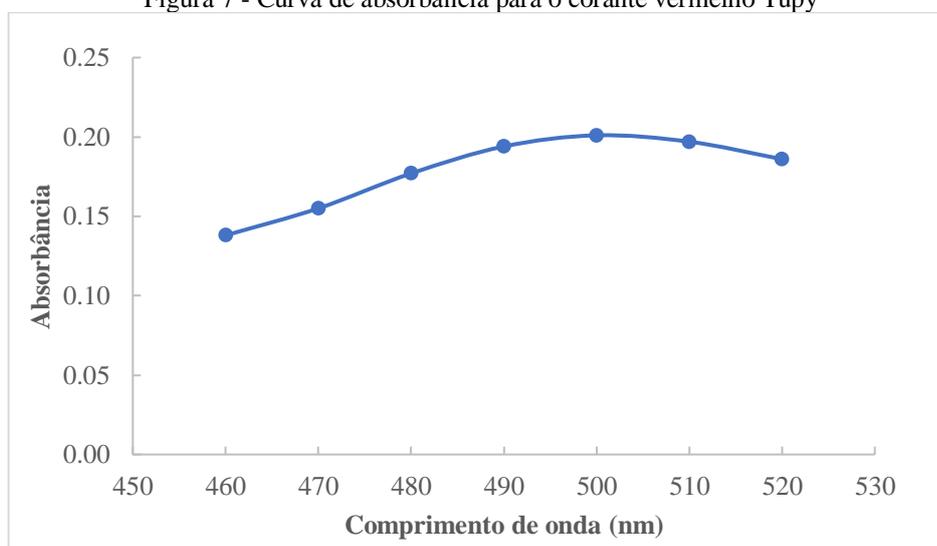
Para determinação da umidade, o método empregado foi o de secagem por radiação infravermelha que tem como base a perda de massa da amostra, por dessecação até peso constante. O equipamento utilizado foi a balança ID 200, da marca Marte, que fornece a leitura direta da percentagem de umidade por diferença de peso. A umidade média do capim-elefante foi de 88%.

3.2. Preparo do adsorbato

A seguir, foi preparada uma solução estoque com concentração de 1000 mg/L do corante comercial, cor vermelha. A partir dela, por diluição com água destilada, as demais soluções para uso nos experimentos foram preparadas.

Inicialmente, foi realizado o levantamento do comprimento de onda de absorção máxima de luz para o corante vermelho. Para tanto, foi feita uma varredura na faixa de 460 nm a 520 nm em uma amostra de concentração 100 mg/L a fim de encontrar qual seria o comprimento de onda que absorve o máximo de radiação. Diante disso, verificou-se que a absorbância máxima obtida foi no comprimento de onda de 500 nm (Figura 7).

Figura 7 - Curva de absorbância para o corante vermelho Tupy



3.3. Curva de Calibração

Conhecendo-se o comprimento de onda em que há maior absorção, foi construída a curva de calibração usando a solução de corante vermelho com concentrações variando de 10 a 100 mg/L (Tabela 1).

Tabela 1- Valores da absorbância para diferentes concentrações

CONCENTRAÇÃO (mg/L)	ABSORBÂNCIA
10	0,021
20	0,043
30	0,066
40	0,091
50	0,112
60	0,138
70	0,152
80	0,170
90	0,182
100	0,211

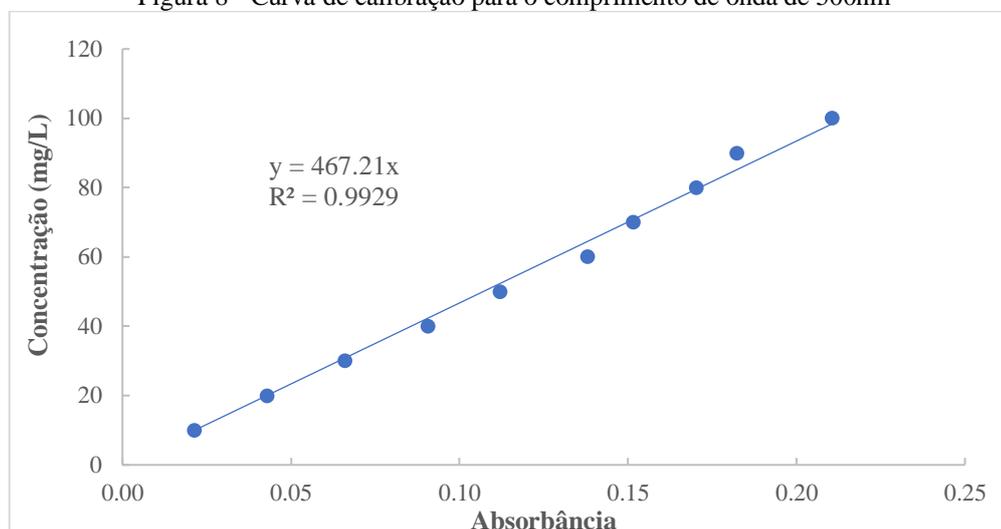
A partir da Tabela 1 foi construída a curva de calibração, Concentração *versus* Absorbância (Figura 8), em que é possível obter a equação da reta gerada pela curva, conforme Equação 9.

$$C_f = 467,21 * A$$

Equação (9)

Com C_f sendo a concentração final dada em mg/L.

Figura 8 - Curva de calibração para o comprimento de onda de 500nm



3.4. Planejamento Experimental

Para avaliar o processo de adsorção do bioadsorvente foi empregado o planejamento experimental, do tipo fatorial, com todas as possíveis combinações de níveis de fatores. Cada uma dessas análises realizadas foi submetida a um ensaio experimental diferente.

Os fatores de influência considerados foram: concentração do corante, massa do adsorvente e tempo de agitação. As respostas analisadas para o estudo de cinética e de equilíbrio foram: quantidade do adsorvente que foi removida (Qt: [mg do corante/g adsorvente]) e a capacidade de remoção na solução (%).

Foi realizado um planejamento fatorial completo 2^3 com dois níveis (Tabela 2), acrescido de um ponto central realizado em triplicata, o que totalizou onze experimentos (Tabela 3).

Tabela 2 - Variáveis e níveis do planejamento fatorial 2^3

Variáveis	Níveis		
	Inferior (-)	Central (0)	Superior (+)
Concentração do corante (mg/L)	50	75	100
Massa do adsorvente (g)	0,20	0,30	0,40
Tempo de agitação (min)	30	45	60

Todos os experimentos foram realizados a temperatura ambiente (25 °C) e em triplicata, logo, os valores usados na análise dos dados são valores médios.

Tabela 3 - Matriz de planejamento fatorial

Experimento	Concentração da Solução (mg/L)	Massa do Adsorvente (g)	Tempo de Agitação (min)
1	50	0,20	30
2	100	0,20	30
3	50	0,40	30
4	100	0,40	30
5	50	0,20	60
6	100	0,20	60
7	50	0,40	60
8	100	0,40	60
9	75	0,30	45
10	75	0,30	45
11	75	0,30	45

Os ensaios foram realizados colocando-se as amostras de condições definidas e variadas (Tabela 3) em uma mesa agitadora orbital modelo NT145-155 da marca Nova

Técnica sob a agitação de 120 rpm e, após determinados intervalos de tempo, retiradas uma a uma para leitura das concentrações finais. O volume das soluções usadas foi de 25 mL.

A leitura das amostras no espectrofotômetro foi realizada após sua filtração e centrifugação para remoção de resquícios que poderiam vir a interferir na leitura da absorvância feita pelo equipamento.

A quantidade de corante adsorvido por massa de adsorvente foi calculada por meio da Equação 10:

$$Q_t = \frac{(C_i - C_f) * V}{m}$$

Equação (10)

Em que:

Q_t : quantidade adsorvida por massa de adsorvente (mg/g);

C_i : concentração inicial do adsorbato (mg/L);

C_f : concentração do adsorbato no equilíbrio (mg/L);

V : volume da solução empregado na adsorção (L);

m : massa do adsorvente (g).

A porcentagem de remoção do corante (% Rem) foi obtida utilizando a equação 11:

$$\% Rem = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100$$

Equação (11)

As influências dos parâmetros em estudo, bem como os ajustes e análises estatísticas, foram analisadas utilizando o software STATISTICA, disponibilizado pelo Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UEPB).

3.5. Estudo cinético e de equilíbrio

A cinética de adsorção é importante para determinação do tempo em que as amostras atingirão o equilíbrio de adsorção. Permite analisar a velocidade do processo, a variação da concentração do adsorbato e o tempo de equilíbrio.

Os ensaios cinéticos foram realizados com 0,2 g do adsorvente e 25 mL de solução com concentração de 100 mg/L, e o tempo de agitação variou de 5 a 60 min, com intervalos de 5 min.

Para a obtenção das isotermas de adsorção, as soluções (25 mL) foram deixadas em contato com o material adsorvente (0,2 g), sob agitação mecânica, por um período de 180 minutos, em amostras de concentrações que variavam de 10 a 100 mg/L. Também foram realizados testes de adsorção utilizando o carvão ativado para fins de comparação.

3.6. Carvão Ativado

O carvão ativado pulverizado (Tipo CAK 600) utilizado nesse trabalho foi cedido pelo Laboratório de Referência em tecnologia de Águas – LARTECA, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Universidade Estadual da Paraíba.

A metodologia usada para o ensaio de adsorção com o carvão ativado foi a mesma utilizada para o capim elefante. A quantidade de corante adsorvido por massa de adsorvente e a percentagem de remoção foram calculadas por meio das equações 10 e 11, respectivamente.

Figura 9 - Carvão ativado pulverizado



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Planejamento Experimental

Os resultados referentes à quantidade de corante adsorvido por massa de adsorvente (mg/g), e remoção de corante após o processo de adsorção (%Rem), obtidos nos ensaios do planejamento experimental com o capim elefante encontra-se na Tabela 4.

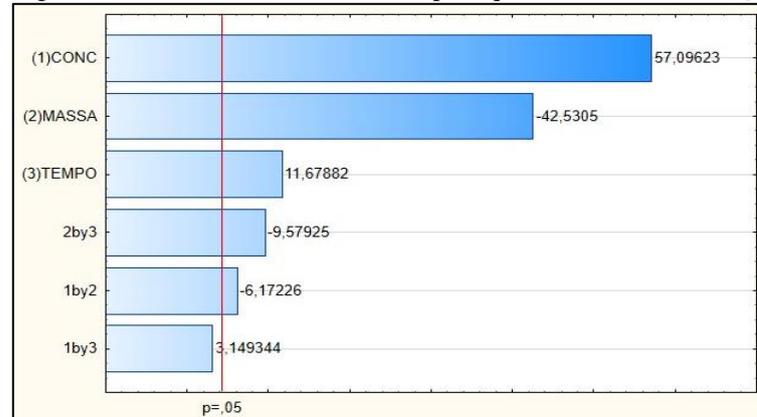
Tabela 4 - Resultados obtidos para as variáveis respostas (quantidade adsorvida (Qt) e remoção do corante (%Rem))

Experimento	Bioadsorvente			Qt (mg/g)	Rem (%)
	Concentração da solução (mg/L)	Massa do adsorvente (g)	Tempo de agitação (min)		
1	50	0,20	30	3,651	58,418
2	100	0,20	30	6,806	54,447
3	50	0,40	30	1,972	63,090
4	100	0,40	30	4,819	77,107
5	50	0,20	60	4,469	71,500
6	100	0,20	60	8,354	66,828
7	50	0,40	60	2,103	67,295
8	100	0,40	60	4,921	78,742
9	75	0,30	45	4,323	69,164
10	75	0,30	45	4,478	71,656
11	75	0,30	45	4,420	70,722

A partir dos resultados obtidos foi possível observar que as condições do experimento 6, massa do adsorvente de 0,2 g, concentração do corante de 100 mg/L e tempo de agitação de 60 min, foram as que removeram maior quantidade de corante por massa de adsorvente (8,354 mg/g).

Na Figura 10 pode ser observada a representação do gráfico de Pareto, que apresenta as influências das variáveis independentes (concentração do corante, massa do adsorvente e tempo de agitação) na variável resposta (quantidade adsorvida - Qt).

Figura 10 - Gráfico de Pareto - Efeitos para quantidade adsorvida (Qt)



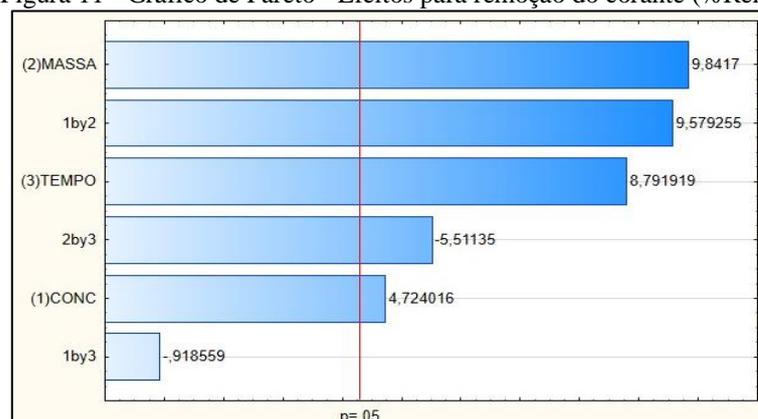
Os cálculos dos efeitos dos fatores e as interações entre eles demonstraram que, as variáveis independentes e os efeitos de interação (massa do adsorvente *versus* tempo de agitação e concentração do corante *versus* massa do adsorvente) são significativas nos níveis estudados.

O valor do efeito principal massa do adsorvente foi negativo, ou seja, elevando-se a massa do adsorvente de 0,2 a 0,4 g ocorrerá uma diminuição na quantidade adsorvida. Resultados semelhantes foram encontrados por Xavier (2017) no estudo do planejamento fatorial do mesocarpo de coco verde.

Os valores dos efeitos concentração da solução e tempo de agitação foram positivos, o que significa que a medida em que se aumenta a concentração de 50 mg/L para 100 mg/L, a resposta da quantidade adsorvida aumenta. O mesmo ocorre quando o tempo de agitação aumenta de 30 min para 60 min.

Na Figura 11, pode ser observada a representação do gráfico de Pareto apresentando as influências das variáveis independentes (concentração do corante, massa do adsorvente e tempo de agitação) na variável resposta (remoção do corante - %Rem).

Figura 11 - Gráfico de Pareto - Efeitos para remoção do corante (%Rem)



Para a variável resposta capacidade de remoção (%Rem), os cálculos dos efeitos dos fatores e as interações entre eles demonstram que, todos os efeitos principais e os efeitos de interação (concentração do corante *versus* massa do adsorvente e tempo de agitação *versus* massa do adsorvente), são significativos nos níveis estudados.

Por meio do *software* STATISTICA, foi obtido um modelo empírico (Equação 12) para os dados experimentais, capaz de prever a quantidade adsorvida (Qt) do capim elefante para o corante comercial, dentro do intervalo estudado.

$$Qt = 4,57416 + 1,58818 * C - 1,18303 * m + 0,32489 * t - 0,26646 * m * t - 0,17169 * C * m \quad \text{Equação (11)}$$

Em que:

Qt: quantidade adsorvida (mg/g);

C: concentração da solução do adsorvato (mg/L);

m: massa do adsorvente (g);

t: tempo de agitação (min).

Observa-se na Equação 11 que a quantidade de concentração do corante tem uma influencia positiva sobre a quantidade adsorvida, ou seja, à medida que aumenta a concentração de corante obtém-se um elevado valor de Qt. Esta constatação explica o fato de o trabalho ter sido desenvolvido dentro da faixa de condições ótimas.

A Análise de Variância (ANOVA) está representada na Tabela 5.

Tabela 5 - ANOVA e coeficiente de determinação do planejamento fatorial

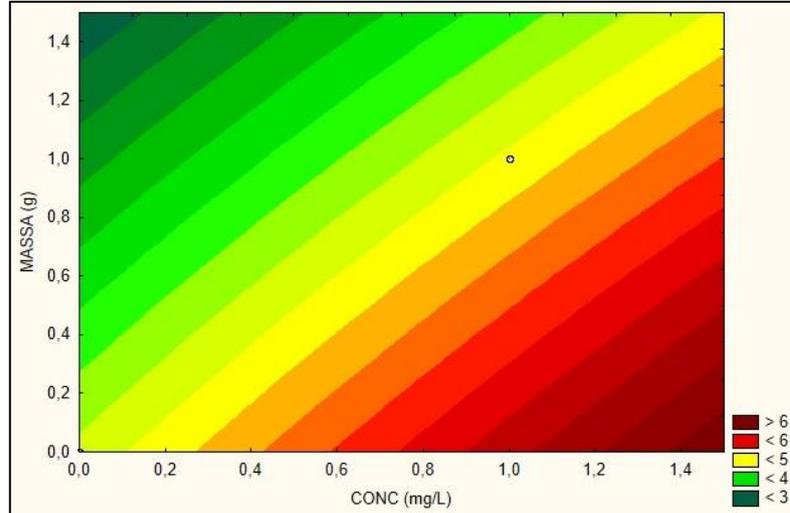
Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F calc (95%)	F tab (95%)	Fcal/Ftab	R ²
Regressão	33,08446	6	16,54223	663,247	4,102	161,656	0,99401
Residual	0,19953	4	0,02494125				
Total	33,28399	10					

A partir desta análise estatística, pode-se afirmar que o modelo da Equação 11 é significativo e preditivo em um nível de confiança de 95% já que o valor do teste F (razão entre F calculado e F tabelado) é maior que 10.

As Figuras 12 e 13 representam os gráficos de contorno, utilizados para facilitar o entendimento do processo e identificar como os parâmetros concentração do corante e massa

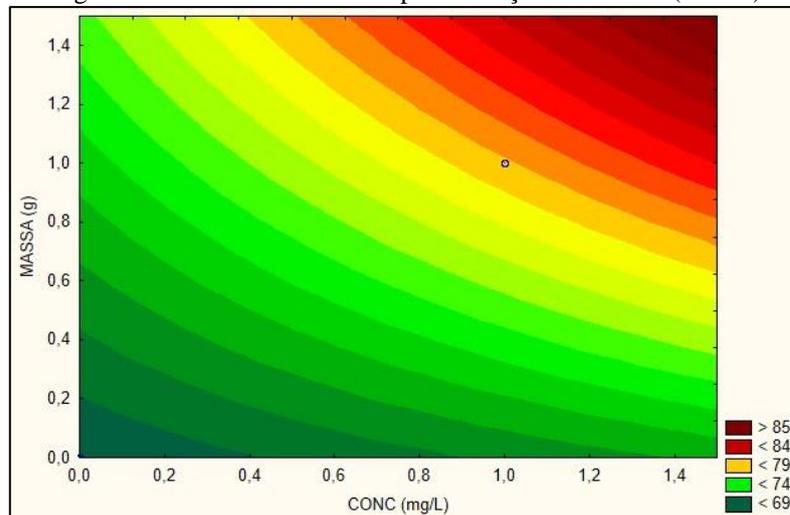
do adsorvente afetam a adsorção, nas variáveis de resposta quantidade adsorvida (Q_t) e capacidade de remoção (%Rem), respectivamente.

Figura 12 - Gráfico de contorno para quantidade adsorvida (Q_t)



O gráfico da Figura 12 nos permite constatar que a maior quantidade adsorvida (Q_t) é obtida para maior concentração do adsorvato na solução e menor quantidade de massa do adsorvente.

Figura 13 - Gráfico de contorno para remoção do corante (%Rem)



Na figura 13, verifica-se que a maior porcentagem de remoção do corante ocorre para maiores quantidades do adsorvente e maiores concentrações do adsorvato.

4.2. Estudo Cinético

Os resultados do ensaio cinético estão dispostos na Tabela 5. Para verificar o comportamento da adsorção ao longo do tempo, e também definir um modelo apropriado para

representar o processo, foram utilizados os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (Equação 2) e pseudo-segunda ordem (Equação 4).

Tabela 5: Resultados obtidos para o estudo cinético

Tempo (min)	Qt (mg/g)
5	3,389
10	4,071
15	4,869
20	5,161
25	5,570
30	6,056
35	6,329
40	6,621
45	7,049
50	7,361
55	7,400
60	7,750

A avaliação dos ajustes dos modelos cinéticos (Tabela 6) aos dados experimentais foi realizada com base no coeficiente de determinação obtido pela regressão linear (R^2) e no Teste F (F_{calc}/F_{tab}).

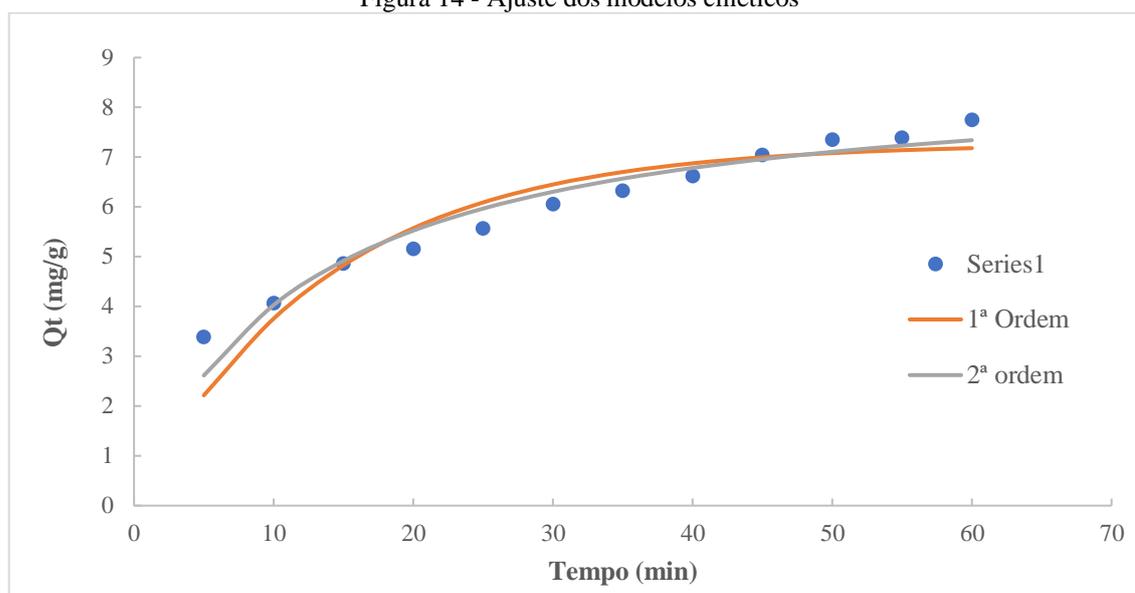
Tabela 6 - Valores dos parâmetros e ajuste dos modelos cinéticos

		Statística	F_{calc}/F_{tab}	R²
1^a ordem	q _e .	7,274	223,809	0,974
	k.	0,073		
2^a ordem	q ₂ .	8,783	472,028	0,988
	k ₂ .	0,010		

De acordo com a Tabela 6, o modelo que melhor se ajustou foi o de pseudo-segunda ordem, já que o coeficiente de determinação foi o maior obtido ($R^2 = 0,988$). A relação F_{calc}/F_{tab} foi igual a 472,028 o que explica que o modelo é estatisticamente significativo (maior que 1) e preditivo (maior que 10).

A diferença observada no ajuste dos modelos cinéticos está ilustrada na Figura 14, ratificando que o modelo de pseudo-segunda ordem se ajusta melhor aos dados obtidos.

Figura 14 - Ajuste dos modelos cinéticos



4.3. Estudo de Equilíbrio

Os dados experimentais, obtidos com o adsorvente alternativo, foram ajustadas as isotermas de Lagmuir, Freundlich e Sips. Os ajustes estão apresentados na Tabela 7 e nela pode ser observado que as três isotermas apresentam uma pequena diferença no seu ajuste, apresentando valores do coeficiente de determinação praticamente iguais.

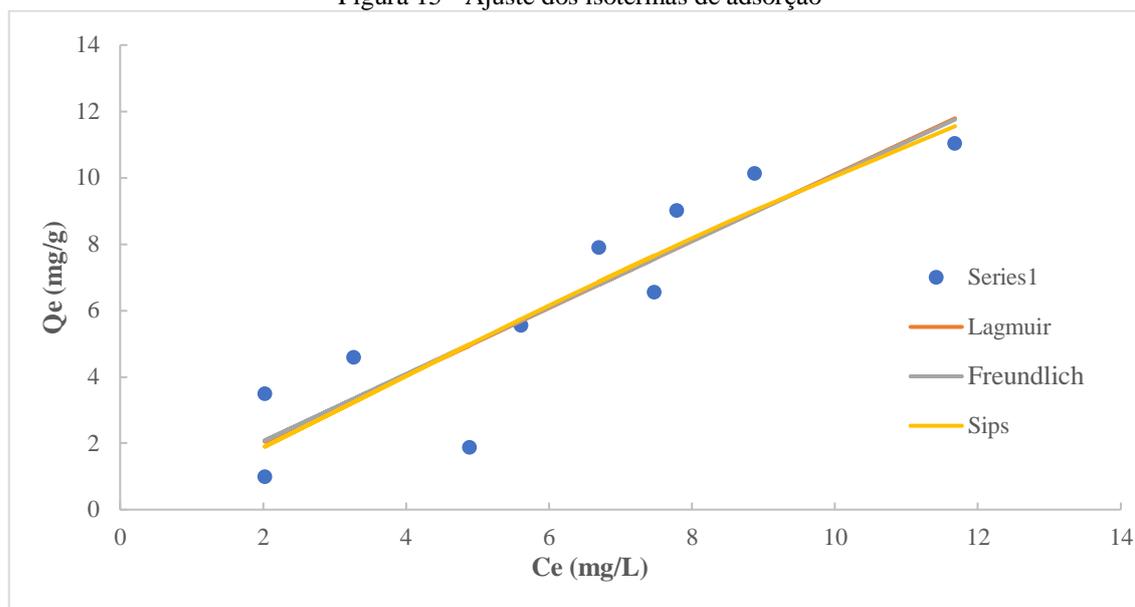
Tabela 7 - Valores dos parâmetros e ajuste aos isotermas de adsorção

		Statística	F _{calc} /F _{tab}	R ²
Lagmuir	q _{max.}	859,5025	20,9206	0,9019
	k.	0,0012		
Freundlich	K _{f.}	1,0374	20,9126	0,9019
	n.	1,0125		
Sips	k _{eq.}	0,1383	12,2380	0,9022
	ns.	1,1070		
	q _{mx.}	67,0809		

O parâmetro de escolha da isoterma que melhor descreve como o adsorvato interage com o adsorvente, foi o Teste F que se apresentou mais estatisticamente significativo e preditivo para a isoterma de Lagmuir.

Na Figura 15 pode ser observado como os ajustes às isotermas de Lagmuir, Freundlich e Sips se assemelham entre si.

Figura 15 - Ajuste dos isoterma de adsorção



4.4. Análise Comparativa

Após o estudo sobre o bioadsorvente produzido a partir do capim elefante, foi realizado ensaio em triplicata com o carvão ativado para comparar o potencial de adsorção dos dois adsorventes.

As condições operacionais para o ensaio com carvão ativado foram as que conseguiram remover a maior quantidade de corante com o bioadsorvente, sendo 0,2 g do adsorvente, concentração de 100 mg/L e tempo e agitação igual a 60 min. O volume das soluções usadas foi de 25 mL. Os resultados obtidos nesta análise comparativa estão na Tabela 4.

Tabela 8 - Análise comparativa entre o bioadsorvente e o carvão ativado comercial

	C. final	Qt	Rem (%)
Bioadsorvente	33,172	8,354	66,828
Carvão Ativado	5,840	11,770	94,160

Os resultados evidenciam que o carvão ativado é relativamente mais adequado do que o capim elefante, o que já era esperado. Contudo, o capim elefante pode ser considerado um adsorvente alternativo viável e eficiente já que, apenas com o tratamento de secagem, conseguiu remover 66,83% do corante na solução.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização do processo de secagem do capim elefante e de sua aplicação na remoção do corante comercial, verificamos que o pó do capim elefante é um adsorvente eficaz, com grande potencial de adsorção no tratamento de efluentes têxteis.

As melhores relações entre a remoção do corante e a capacidade adsortiva do capim elefante foram obtidas quando o valor da concentração do corante foi igual a 100 mg/L, o valor da massa do adsorvente igual a 0,2 g e o tempo de agitação de 60 min.

Diante dos resultados obtidos, é possível afirmar que o capim elefante é um adsorvente eficiente e potencial substituto do carvão ativado já que, apenas com o processo de secagem, removeu 66,8% do corante. Com o carvão ativado nas mesmas condições experimentais que o capim elefante, a percentagem de remoção alcançou 94,16%. Esse adsorvente alternativo pode ser indicado como opção economicamente e ambientalmente sustentável para remover corantes de efluentes industriais têxteis uma vez que apresenta alta produtividade, baixo custo e capacidade adsortiva semelhante ao carvão ativado.

REFERÊNCIAS

- AL-DEGS, Y. et al. Effect of Carbon Surface Chemistry on the Removal of Reactive Dyes from Textile Effluent. **Water Research**, v. 34, n. 3, p. 927-935, 2000.
- ALMEIDA, Ana Luísa de Souza e. **Tratamento de meios coloridos da adsorção sobre carvão ativado e argila virgem**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2016.
- ANTUNES, E. C. E. S. et al., Remoção de corante têxtil utilizando a casca do abacaxi como adsorvente natural. **Holos**, v. 03, 2018.
- BARROS, M. A. S.; ARROYO, P. A. **Métodos de Remoção de Cromo de Águas Residuais. Métodos de Adsorção**. Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá, PR, 2004.
- CARDOSO, N. F. et al., Remozal of remazol black B textile dye from aqueous solution by adsorption. **Desalination**, v. 269, p. 92-103, 2011.
- COELHO, Gustavo Ferreira. et al., Uso de técnicas de adsorção utilizando resíduos agroindustriais na remoção de contaminantes em águas. **Journal of Agronomic Science**, v. 3, p. 291–317, 2014.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementam e alteram a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2005>>. Acesso em: 6 de maio de 2019.
- CORDEIRO, Gustavo Santiago Eulálio Cordeiro. **Estudo da cinética e equilíbrio do mesocarpo do coco verde com adsorvente para remoção de corantes têxteis**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2017.
- DĄBROWSKI, A. Adsorption—from theory to practice. **Advances in colloid and interface science**, v. 93, n. 1-3, p. 135-224, 2001.
- DO NASCIMENTO, K. K. R. **Avaliação da remoção de corante têxtil presente em solução aquoso utilizando casca de laranja como adsorvente natural**. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018.
- DOS SANTOS, Lara Bianca Lima et al. **Utilização De Carvão Ativo De Casca De Laranja Na Adsorção De Efluentes Contaminados Com Bário (II)**. Semana de Pesquisa da Universidade Tiradentes-SEMPESq, n. 19, 2018.
- EMBRAPA. Nova cultivar de capim-elefante apresenta produtividade 30% maior. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17002039/nova-cultivar-de-capim-elefante-apresenta-produtividade-30-maior> . Acesso em: 18 de maio de 2019.

- FARIAS, Cíntia Kelly de Lima. **Avaliação da casca de laranja (*Citrus sinensis L. osbeck*) como adsorvente de íons cobre (Cu^{2+}) em águas residuárias industriais**. 2018, 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2018.
- FERNANDES, R. **Adsorventes Alternativos para Remoção de Fenol em Solução Aquosa**. 2005, 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
- FERREIRA, A. C. et al., Características químicas e fermentativas do capim-elefante ensilado com níveis crescentes de subproduto da agroindústria do caju. **Ciência Animal Brasileira**, v. 8, n. 4, p. 723-731. 2007.
- FILHO, I. J. C.; et al., Otimização do processo de remoção do corante Remazol Black B por uso de biomassa mista de *Aspergillus niger* e capim elefante (*Pennisetum purpureum Schum*). **Congrebio**, Anais, 2016. Disponível em: <<http://congresso.rebibio.net/congrebio2016/trabalhos/pdf/congrebio2016-et-09-016.pdf>>. Acesso em: 16 de maio de 2019.
- GARG, V. K.; et al., Basic dye (methylene blue) removal from simulated wastewater by adsorption using Indian Rosewood sawdust: a timber industry waste. **Elsevier**, 2004, p. 243-250. 2004
- GREGG, S. J.; SING, K. S. W. **Adsorption, Surface Area and Porosity**. 2 ed. London: Academic Press, 1982. P. 40-48.
- GUARANTINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes Têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 71-78, 2000.
- HIEMENZ, P. C. Principles of colloid and surface chemistry. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1986.
- HO, Y. S. Review of second-order models for adsorption systems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 136, p. 681-689, 2006.
- KO, D. C. K. et al. Applications of Multipore Model for the Mechanism Identification During the Adsorption of Dye on Activated Carbon and Bagasse Pith. **Langmuir**, v. 19, p. 722-730, 2003.
- KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, n. 25, p. 78-82, 2002.
- LAGERGREN, S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, v. 24, p. 1-39, 1898.
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. **J. Am. Chem. Soc.**, v. 40, p. 1361-1403, 1918.
- MAIA, L. F. O.; PEREIRA, D. B.; FRANCO, L. R. **Remoção Do Corante Direct Red 80 Em Fibras De Capim Elefante**. 53º CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA. Rio de

Janeiro-RJ, 2013. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/5/3426-17141.html>. Acesso em: 12 de março de 2019.

NAGEL-HASSEMER, M. E.; CORAL, L. A.; LAPOLLI, F. R.; AMORIM, M. T. S. de. Processo UV/H₂O₂ como Pós-Tratamento para Remoção de Cor e Polimento Final em Efluentes Têxteis. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 900-904, 2012.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Uso de bioadsorventes lignocelulósicos na remoção de poluentes de efluentes aquosos**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NASCIMENTO, Ketyla Karla Rodrigues do. **Avaliação da remoção de corante têxtil presente em solução aquosa utilizando casca de laranja como adsorvente natural**. 2018, 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018.

OLIVEIRA, Fabiano Mendonça. **Resíduos agroindustriais como adsorventes para remoção de azul de metileno em meio aquoso**. 2016, 162 p. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Física e Química, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Química, Catalão, 2016.

PAIVA, T. M. N. et al., Estudo comparativo de adsorção de corante têxtil utilizando carvão ativado e conchas de ostras *crassostrea rhizophorae*. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis, SC. 2014.

PEREIRA, M. F., et al. Remoção da cor em efluentes da indústria têxtil por adsorção em carvões ativado modificados. In: **Adsorbentes para problemas Ambientales – CYTED**, Cap. 5. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. 2004.

SANTOS, Flávia Danielle dos. **Avaliação do potencial de baixo custo para purificação de biodiesel etílico e estabelecimento das condições operacionais por metodologia de superfície de resposta**. 2015, 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na Área de Processos Catalíticos e Biocatalíticos). Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Lorena, 2015.

SANTOS, Graziely Cristina dos. **Análise comparativa da capacidade de remoção do corante direct blue 71 em solução pelos fungos *Phanerochaete chrysosporium* e *Aspergillus oryzae***. 2011. 116 f. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94994>>. Acesso em: 31 de março de 2019

SCHIMMEL, D. **Adsorção dos corantes reativos azul 5G e azul turquesa QG em carvão ativado comercial**. 2008. 99f. Dissertação (Mestre em Engenharia Química). Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Toledo – PR, 2008.

SCHNEIDER, E. L., **Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado**. Mestrado em Engenharia Química. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, PR, 2008.

SILVA, Naiana Pommering da. **Utilização de diferentes materiais como adsorventes na remoção de nitrogênio amoniacal.** 2015, 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.

SILVA, Déborah Fernanda Mamedes. **Produção de adsorvente a partir da casca de batata para a remoção do corante Direct Black 22 de efluentes industriais sintéticos.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário Tabosa de Almeida, ASCES-UNITA, Caruaru, PE, 2017.

SOUSA, Dennis Dantas de. **Produção E Avaliação Da Farinha Da Casca De Banana Como Bioadsorvente Na Remoção De Corantes Têxteis Em Águas Residuárias.** 2015, 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2015.

VASQUES, Andressa Regina. **Caracterização e Aplicação de Adsorvente para Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis em Batelada e Colunas de Leito Fixo.** 2008, 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

WEBER, Walter J.; MORRIS, J. Carrell. Kinetics of adsorption on carbon from solution. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 89, n. 2, p. 31-60, 1963.

YAGUB, Mustafa T. et al. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. **Advances in colloid and interface science**, v. 209, p. 172-184, 2014.

XAVIER, Cinthia Sany França. **Aplicação do planejamento experimental na avaliação do mesocarpo de coco verde para a remoção de corantes têxteis presentes em águas residuárias.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2017.