



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**

**VANESSA DE FARIAS NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ADSORÇÃO EM LEITO  
DIFERENCIAL, UTILIZANDO CASCA DE PALMA FORRAGEIRA  
(*Opuntia stricta*) COMO BIOSORVENTE, NA REMOÇÃO DE  
CONTAMINANTES ORGÂNICOS EM CORPOS D'ÁGUA**

**SUMÉ - PB**

**2018**

**VANESSA DE FARIAS NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL,  
UTILIZANDO CASCA DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia stricta*) COMO  
BIOSSORVENTE, NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS EM  
CORPOS D'ÁGUA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

**Orientadora: Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima.**

**SUMÉ-PB**

**2018**

N244a Nascimento, Vanessa de Farias.

Avaliação da eficiência da adsorção em leito diferencial, utilizando casca de palma forrageira (*Opuntia stricta*) como bioissorvente, na remoção de contaminantes orgânicos em corpos d'água. / Vanessa de Farias Nascimento. - Sumé - PB: [s.n], 2018.

38 f.

Orientadora: Professora Dr<sup>a</sup> Lenilde Mérgia Ribeiro Lima.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

1. Adsorção em leito diferencial. 2. Palma forrageira – *Opuntia stricta*. 3. Bioissorvente. 4. Contaminantes orgânicos – remoção. I. Título.

CDU: 66.081.312(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa  
Bibliotecário-Documentalista  
CRB-15/626

**VANESSA DE FARIAS NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL,  
UTILIZANDO CASCA DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia stricta*) COMO  
BIOSSORVENTE, NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS EM  
CORPOS D'ÁGUA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima  
Orientadora - UAEB/CDSA/UFCG



---

Prof. Dr. Bruno Rafael Nunes  
Examinador interno- UAEB/CDSA/UFCG



---

Prof. Dr. George do Nascimento Ribeiro  
Examinador interno- UAEB/CDSA/UFCG



---

Profa. Dra. Adriana de Fátima Meira Vital  
Examinadora externa- UATEC/CDSA/UFCG

**Aprovado em: 17 de dezembro de 2018.**

**À minha avó Alzira (*in memoriam*),  
que durante muitos anos viveu esse sonho comigo.**

**Tudo isso dedico à senhora!**

## AGRADECIMENTOS

Quando almejamos algo na vida, fazemos dela nosso ponto de partida para alcançarmos o mundo. Faz-se necessário acreditar, acreditar que todos os seus esforços serão válidos e fazer disso o combustível para sempre ir além. Minha fé e minha vontade de querer sempre mais, foram meu combustível para trilhar o meu caminho e seguir em busca dos meus sonhos, e hoje subo mais um degrau na minha caminhada, conclui-se um ciclo, e eu agradeço a **Deus**, pois nEle tenho a certeza que tudo posso.

Aos meus pais, minha base, **Sueni e Expedito**, por sonharem este sonho comigo, estarem sempre presentes em todo o percurso da minha caminhada, nos momentos de tribulações e até mesmo quando pensei em desistir vocês estiveram ali, me sustentando, sendo sempre meu alicerce. Foram tantas renúncias para tornarem meu sonho possível. Obrigada!

À minha irmã **Jéssica** e à minha sobrinha **Júlia**. Eu sei que poderei contar sempre com a ajuda de vocês, por me incentivarem a ser uma pessoa melhor.

Aos meus familiares, minhas avós, tios, primos, obrigada por acreditarem em mim e por compartilharem todo esse sonho.

Aos meus pilares que sempre estão ao meu lado, dando apoio, caminhando comigo em busca dos meus sonhos, agradeço à minha Elite (**Cássio, Geiza e Mércia**), **Tâmara, Talena e Thaizy**, vocês são a extensão de Deus em minha vida.

A todas as pessoas que contribuíram na minha trajetória, cada um que sonhou comigo esse sonho. Agradeço a **Rainy, Laedson, Milena e Talena** que contribuíram e ajudaram durante a consolidação desse trabalho.

Ao CDSA, à “FAMÍLIA BIOTEC”, aos professores e colegas de curso, cada aprendizado adquirido, o crescimento acadêmico e pessoal.

À professora Dra. **Adriana de Fátima Meira Vital**, coordenadora do LASOL (Laboratório de solos) do CDSA, pelo espaço cedido para a realização dos experimentos e enriquecimento científico.

Ao técnico **Danilson Correia da Silva**, do LASOL, pela ajuda concedida durante todo o trabalho experimental.

À banca examinadora, pela disponibilidade e por aceitarem gentilmente contribuir com esse trabalho.

Ao Prof. Dr. **Bruno Nunes** pelo auxílio com o modelo matemático do equilíbrio de adsorção.

À minha querida orientadora, Profa. Dra. **Lenilde Mérgia Ribeiro Lima**, pela paciência, pela contribuição acadêmica, por toda confiança em mim depositada e por todo o ensinamento.

E meu mais intenso agradecimento é à minha filha **Laura**, pois tudo isso foi vivido pensando nela, por todas as vezes que achava que não iria conseguir, mas nela encontro forças para continuar. Essa conquista é sua, filha! OBRIGADA!

*“Inteligência é a habilidade de  
se adaptar às mudanças.”*

*Stephen Hawking*

## RESUMO

Existem inúmeros fatores que contribuem para a poluição ambiental, dentre eles se destacam as indústrias petrolíferas, que são consideradas mundialmente como um dos setores que mais proporciona a contaminação do meio ambiente. Ao longo do seu processo de produção, essas indústrias são responsáveis por gerar enormes quantidades de resíduos, prejudicando diretamente a sobrevivência de vida no planeta. Dentre os processos utilizados para a descontaminação destes efluentes, encontra-se o processo de adsorção, que utiliza biomassas como adsorventes e tem se mostrado bastante eficiente. O presente trabalho propôs uma alternativa para remoção da gasolina de efluentes por meio de processos adsorptivos, utilizando como adsorvente a casca de palma forrageira (*Opuntia stricta*), espécie típica do semiárido nordestino. Na metodologia utilizada, foi obtida a biomassa na forma particulada, após a etapa de secagem. Seguiu-se com o estudo da cinética de adsorção, em que foram avaliados os tempos de 5 a 60 minutos (com intervalos de 5 minutos) e o equilíbrio, cujas concentrações de contaminante variaram de 5 a 60% (com taxa de variação de 5%). Para o leito diferencial, utilizaram-se concentrações de 10%, 15% e 20%. Como resultado observou-se que a cinética de adsorção foi rápida, com a eficiência adsorptiva sendo maior nos primeiros minutos do experimento, e a máxima capacidade adsorvida de 7,36 g.g<sup>-1</sup>. No equilíbrio, a capacidade máxima de adsorção foi de 11,11 g.g<sup>-1</sup>. Para o estudo no sistema de leito diferencial, o percentual de adsorção para concentração de contaminante igual a 10% foi o mais elevado (volume residual de 6,64 mL), com a eficiência de adsorção crescendo com o aumento do tempo de contato biomassa/solução contaminada. Para as demais concentrações (15 e 20%), seguiu-se o mesmo perfil de adsorção, apesar da capacidade adsorptiva ter diminuído. Com isso, é válido confirmar a eficiência adsorptiva da biomassa da casca da palma forrageira (*Opuntia stricta*), caracterizando assim uma fonte alternativa, econômica e sustentável para remoção de efluentes contaminados por gasolina.

**Palavras-chave:** Descontaminação das águas. Adsorção. Unidade de volume. Biomassa

## ABSTRACT

There are many factors that contribute to environmental pollution, among them petroleum industries, which are considered worldwide as one of sectors that provides most contamination of the environment. Throughout their production process, these industries are responsible for generating huge amounts of solid, directly damaging survival of life on the planet. Among the processes used for decontamination of these effluents, is adsorption process, which uses biomass as adsorbents and has been shown to be quite efficient. Present work proposed an alternative for removal of gasoline from effluents by means of adsorptive processes, using as adsorbent cactus pear forage peel (*Opuntia stricta*), a typical species of northeastern semi-arid. On methodology used, biomass in particulate form was obtained after drying step. This was followed by adsorption kinetics study, in which times from 5 to 60 minutes (at 5-minute intervals) and equilibrium, whose contaminant concentrations ranged from 5 to 60% (with a rate of change of 5 %). For differential bed, concentrations of 10%, 15% and 20% were used. As a result, adsorption kinetics were observed to be rapid, with adsorption efficiency being higher in the first minutes of experiment, and maximum adsorbed capacity of 7.36 g.g<sup>-1</sup>. At equilibrium, maximum adsorption capacity was 11.11 g.g<sup>-1</sup>. For study in differential bed system, percentage of adsorption for contaminant concentration equal to 10% was highest (residual volume of 6.64 mL), with adsorption efficiency increasing with increase of contact time biomass/contaminated solution. For other concentrations (15 and 20%), the same adsorption profile was followed, although adsorptive capacity decreased. Thus, it is valid to confirm adsorptive efficiency of biomass of cactus pear forage peel (*Opuntia stricta*), thus characterizing an alternative, economical and sustainable source for removal of effluents contaminated by gasoline.

**Keywords:** Water decontamination. Adsorption. Volume unit. Biomass

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos hidrocarbonetos monoaromáticos BTEX.....	19
Figura 2 - Processo de adsorção: (1) Difusão para a superfície do adsorvente; (2) Migração para o interior dos poros do adsorvente; (3) Formação da monocamada de adsorbato.....	20
Figura 3 - Modelo do Sistema de Leito Diferencial.....	24
Figura 4 - Plantio de palma forrageira orelha de elefante na cidade de Ouro Velho-PB.....	26
Figura 5 - Metodologia desenvolvida para a coleta de dados.....	27
Figura 6 - Casca da palma cortada para etapa de secagem.....	28
Figura 7 - (a) Moinho de facas; (b) Biomassa na forma particulada.....	28
Figura 8 - Análise volumétrica do volume de gasolina na mistura gasolina/água.....	29
Figura 9 - Frascos Erlenmeyer contendo a mistura água/gasolina/biomassa na mesa agitadora, sob agitação de 130,0 rpm.....	30
Figura 10 - (a) Recipiente contendo a mistura água/gasolina; (b) Biomassa particulada adicionada em tela de alumínio.....	31
Figura 11 - Tela de alumínio sobreposta ao recipiente contendo a mistura água/gasolina.....	31
Figura 12 - Análise volumétrica da quantidade de contaminante não adsorvido.....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BTEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno
CDSA	Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido
MJ	Megajoule
mg	Miligrama
g	Gramma
L	Litro
mm	Milímetro
mL	Mililitro
PB	Paraíba
rpm	Rotação por minuto
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
3.1 CONTAMINAÇÃO HÍDRICA POR HIDROCARBONETOS .....	18
3.2 HIDROCARBONETOS .....	19
<b>3.2.1 Gasolina .....</b>	<b>19</b>
3.3 ADSORÇÃO .....	20
<b>3.3.1 Fatores que influenciam o processo de adsorção .....</b>	<b>21</b>
3.3.1.1 Área superficial.....	22
3.3.1.1 Propriedades do adsorvente.....	22
3.3.1.1 Propriedades do adsorbato.....	22
3.3.1.1 Velocidade de agitação.....	22
<b>3.3.2 Isotermas de Adsorção .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.3 Modelo de Langmuir .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.4 Modelo de Freundlich .....</b>	<b>23</b>
3.4 LEITO DIFERENCIAL .....	24
3.5 SECAGEM .....	25
3.6 BIOMASSA .....	25
<b>3.6.1 Palma Forrageira .....</b>	<b>26</b>
<b>4 MATERIAIS E METODOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
4.1 MATERIAIS .....	27
4.2 METODOLOGIA .....	27
<b>4.2.1 Obtenção da biomassa seca .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.2 Obtenção da biomassa na forma particulada .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.3 Cinética de adsorção .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.4 Equilíbrio na adsorção .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.5 Sistema de adsorção em Leito Diferencial .....</b>	<b>30</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
5.1 CINÉTICA DE ADSORÇÃO .....	33
5.2 EQUILÍBRIO NA ADSORÇÃO .....	34

5.3 ADSORÇÃO EM SISTEMA DE LEITO DIFERENCIAL .....	34
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento tecnológico tem impulsionado a expansão das atividades ,agroindustriais, refletindo em maior captação e consumo de recursos hídricos, tendo como consequência o aporte do volume de águas residuais. Estas águas possuem expressivas quantidades de substâncias tóxicas e podem contaminar rios, lagos e águas costeiras, de modo a comprometer os ecossistemas (SHAK; WU, 2017).

Nas últimas décadas, a preocupação de toda sociedade com a disponibilidade e qualidade de água decorre do fato de que, por mais abundante que pareça este recurso, não é rara também sua escassez, ora pela ocorrência de períodos prolongados de seca ora pela alta carga poluidora a que é submetida (ESPINDULA, 2005).

O Brasil é um país que possui grandes recursos hídricos superficiais de água doce; entretanto, são vários os poluentes descartados neste sistema, tais como os óleos, pesticidas, corantes, metais pesados ou outros materiais agressivos, os quais têm acarretado enorme impacto na qualidade do solo, das águas subterrâneas e dos ecossistemas associados (YALLOUZ; CALIXTO, 2002).

O que se tem notado, nas duas últimas décadas, é que a poluição causada por petróleo e seus derivados tem sido um dos principais problemas ao meio ambiente. Quando ocorre o derramamento de gasolina em solos, por exemplo, uma das preocupações é a contaminação das águas subterrâneas, que também podem contaminar os aquíferos que são usados como fontes de abastecimento de água para o consumo humano (CUSTANCE *et al.*, 1992).

Os estudos relativos à remediação de áreas atingidas por hidrocarbonetos são realizados com a finalidade de restaurar a qualidade dos solos e das águas subterrâneas (superficiais) contaminadas.

Diante deste cenário, os processos de adsorção surgem como uma importante alternativa para o pré-tratamento de efluentes provenientes destas indústrias, demonstrando eficiência nos processos de purificação e separação nas áreas petrolíferas da química fina e da biotecnologia (SOUZA; LIMA; SILVA, 2011).

O processo de adsorção destaca-se como uma técnica alternativa de grande potencial para o tratamento de efluentes, principalmente pela utilização de produtos naturais que podem ser obtidos de subprodutos da indústria e da agricultura. Muitos estudos têm comprovado a eficiência destes adsorventes para o tratamento de águas contaminadas por óleo, metais pesados e outras substâncias tóxicas (CURBELO, 2002).

O fenômeno de adsorção consiste na adesão de um soluto na superfície de um sólido adsorvente, fundamentado na tensão superficial das soluções. Tal processo compreende a difusão do soluto através de uma película estagnada que envolve partículas do adsorvente, a difusão dentro dos poros do suporte sólido, seguido finalmente da etapa de purificação que pode ser de natureza física ou química (PESSOA; KILIKIAN, 2005).

Dentre as alternativas propostas está o estudo da adsorção em leito diferencial, projetado em escala de bancada com o propósito de simular o corpo d'água real contaminado. A nomenclatura leito diferencial refere-se à consideração adotada para avaliar a dinâmica da adsorção na forma de um volume de controle (valores geométricos inferiores ao plano real) com o objetivo de minimizar a complexidade na obtenção dos dados da pesquisa, para futuramente utilizar esses resultados em escala ampliada (real) (LIMA *et al.*, 2018).

Atualmente, diversas fontes de adsorventes vêm sendo investigadas com a finalidade de serem utilizados para tratamento de água. No entanto, alguns dos adsorventes são de difícil desenvolvimento e elevado custo, o que inviabiliza sua utilização em grande escala (OLADOJA *et al.*, 2017).

Os cactos da espécie *Opuntia stricta* constituem-se importante matéria-prima para obtenção de diversos produtos em diferentes segmentos como, por exemplo, na fabricação de cosméticos e fármacos, além de seu emprego na nutrição animal. Além disso, a comunidade científica vem investigando o potencial de polissacarídeos derivados desta espécie para tratamento de águas contaminadas (JAYALAKSHMI; SARITHA; DWARAPUREDDI, 2017).

Por ser de fácil obtenção na região do semiárido nordestino, além de resistente aos períodos de estiagem, a utilização da palma torna-se atrativa para aplicação na descontaminação de águas, sendo seu estudo como adsorvente de substâncias orgânicas presentes em águas de descarte de extrema importância para as comunidades do cariri paraibano, no que diz respeito ao desenvolvimento tecnológico e humano da região (LIMA *et al.*, 2014).

O presente trabalho propôs uma alternativa para remoção da gasolina de efluentes por meio de processos adsortivos, utilizando como biomassa a casca de palma forrageira (*Opuntia stricta*), espécie típica do semiárido nordestino, como adsorvente.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência do processo de adsorção em leito diferencial, utilizando como biomassa a casca de palma forrageira (*Opuntia stricta*), espécie típica do semiárido nordestino, como adsorvente para remoção de gasolina em corpos d'água.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar a biomassa casca e palma forrageira (*Opuntia stricta*) na forma particulada.
- Obter as curvas cinéticas para a caracterização da dinâmica da adsorção da gasolina em contato com a palma.
- Estudar o poder adsortivo da palma quando colocada em contato com a gasolina, por meio das isotermas obtidas pela análise de equilíbrio.
- Submeter a mistura gasolina/água, em três diferentes concentrações, juntamente com a biomassa palma forrageira ao processo de adsorção em leito diferencial, para posterior avaliação da capacidade adsortiva da biomassa.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste início do século XXI, a humanidade vem se defrontando com uma série de problemas globais — ambientais, financeiros, econômicos, sociais e de mercado. Neste quadro, as preocupações com o ambiente, em geral, e com a água, em particular, adquirem especial importância, pois as demandas estão se tornando cada vez maiores, sob o impacto do crescimento acelerado da população e do maior uso da água, imposto pelos padrões de conforto e bem-estar da vida moderna. Entretanto, a qualidade das águas da Terra — rios, lagos naturais e represas, em particular — dos ecossistemas e da vida, em geral, vem sendo degradada de uma maneira alarmante, e esse processo pode ser irreversível, sobretudo nas áreas mais densamente povoadas dos países emergentes, como o Brasil (REBOUÇAS;BRAGA; TUNDISI, 2002).

#### 3.1 CONTAMINAÇÃO HÍDRICA POR HIDROCARBONETOS

A contaminação de águas subterrâneas por derivados de petróleo tem merecido atenção cada vez mais intensa nos meios acadêmicos e empresariais no Brasil, após ter-se revelado um dos mais graves problemas ambientais em países mais industrializados, tais como Alemanha, Inglaterra e, principalmente, Estados Unidos. O assunto já vem sendo tratado extensivamente na literatura internacional, na qual muitos pesquisadores têm procurado descrever os processos de transporte de contaminantes não-aquosos no solo (MACKAY; CHERRY, 1989, HILLEL, 1988, ABRIOLA, 1988, HUNT; SITAR; UDELL, 1988, DOMENICO; SHWARTZ, 1990, LITTLE; DAISEY; NAZAROFF, 1992).

Para atenuar essa problemática, causada principalmente por vazamentos de combustíveis, têm sido realizadas inúmeras pesquisas de remediação de sítios contaminados por hidrocarbonetos, com destaque para as técnicas de biorremediação, por serem consideradas mais seguras, menos onerosas e menos agressivas ao meio ambiente (MARCHAL *et al.*, 2003, MARIANO *et al.*, 2008, BESKOSKI *et al.*, 2011, RODRIGUES *et al.*, 2015, BALDAN *et al.*, 2015).

Os maiores problemas de contaminação por vazamento de combustível são atribuídos aos hidrocarbonetos monoaromáticos, benzeno, tolueno e xilenos (orto-, meta-; para-), denominados de BTEX (SILVA *et al.*, 2002), pois são os constituintes que têm maior

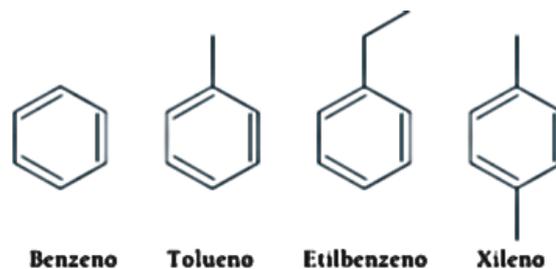
solubilidade e mobilidade em água e, portanto, atingirão mais facilmente o lençol freático (MARIANO, 2008).

### 3.2 HIDROCARBONETOS

Hidrocarbonetos são compostos orgânicos que contêm basicamente os elementos carbono e hidrogênio, podendo ser classificados em alifáticos e aromáticos. Compostos aromáticos são o benzeno e os compostos que se assemelham ao benzeno em comportamento químico. Os hidrocarbonetos aromáticos se caracterizam por uma tendência para sofrer substituição heterolítica. Estas reações de substituição são características dos anéis aromáticos onde quer que eles apareçam, independentemente de outros grupos funcionais que a molécula possa conter (MORRISON; BOYD, 1996).

Os hidrocarbonetos conhecidos como BTEX são compostos monoaromáticos formados pelas substâncias orgânicas voláteis benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, conforme mostrado na Figura 1.

**Figura 1** – Representação dos hidrocarbonetos monoaromáticos BTEX.



Fonte: [www.universechemistry.blogspot.com](http://www.universechemistry.blogspot.com), 2018.

#### 3.2.1 Gasolina

A gasolina é constituída de uma mistura de hidrocarbonetos voláteis, cujos componentes principais são cadeias ramificadas de parafinas, cicloparafinas e compostos aromáticos, incluindo constituintes como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, os quais representam os compostos mais voláteis e móveis encontrados na gasolina (FINOTTI *et al.*, 2009).

A gasolina é líquida, volátil, inflamável e constituída quimicamente por uma mistura complexa de mais de 400 hidrocarbonetos alifáticos, ou seja, de carbonos e hidrogênios em cadeias. Além dos hidrocarbonetos e dos oxigenados, a gasolina também pode conter compostos de enxofre e compostos contendo nitrogênio. A faixa de destilação da gasolina

automotiva varia de 40 a 175 °C e cada litro queimado oferece o valor energético de 32,18MJ (PORTO, 2014).

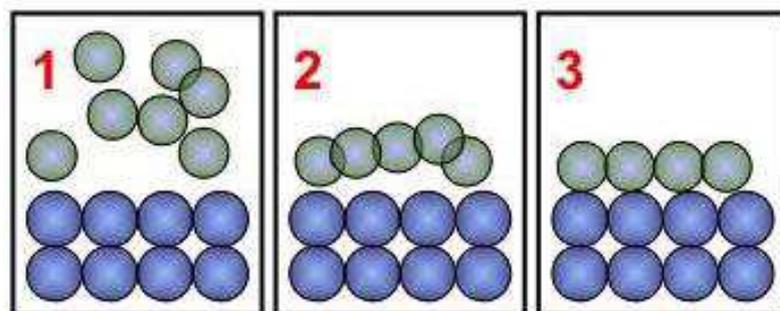
Por ser um composto de fácil escoamento, a gasolina tem a capacidade de alcançar longas distâncias quando entra em contato com o solo, podendo atingir regiões próximas como cisternas, garagens, o subsolo e o lençol freático, ocasionando uma série de problemas para a sociedade e o meio ambiente devido à ingestão de água contaminada e o aumento de toxicidade, além de causar explosões e incêndios (JÚNIOR; PASQUALETTO, 2008).

### 3.3 ADSORÇÃO

A adsorção é uma operação de transferência de massa, a qual estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos. Uma vez que os componentes adsorvidos concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a adsorção. Por isso, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas. A espécie que se acumula na interface do material é normalmente denominada de adsorvato ou adsorbato; e a superfície sólida na qual o adsorbato se acumula, de adsorvente ou adsorbente (RUTHVEN, 1984).

De acordo com Braga (2008), o fenômeno da adsorção, ilustrado na Figura 2, está intimamente ligado à tensão superficial das soluções e a sua intensidade depende da temperatura, da natureza e da concentração da substância adsorvida (o adsorbato), da natureza e estado de agregação do adsorvente (o sólido finamente dividido) e do fluido em contato com o adsorvente. O fluido, a superfície e os componentes retidos pela superfície são os principais elementos da adsorção.

**Figura 2** – Processo de adsorção: (1) Difusão para a superfície do adsorvente; (2) Migração para o interior dos poros do adsorvente; (3) Formação da monocamada de adsorbato.



O processo de adsorção tem sido destaque devido à sua metodologia simples e viabilidade econômica, ganhando importância como um processo de separação e purificação nas últimas décadas, sendo também um dos métodos mais eficientes empregados na remoção de cor, odor, óleos e poluentes orgânicos (RAFATULLAH *et al.*, 2010).

Os adsorventes mais utilizados em escala industrial são o carvão ativado, a sílica-gel, a alumina ativada e as peneiras moleculares. Entretanto, biomassas alternativas vêm sendo estudadas devido ao elevado valor de alguns adsorventes (SANTOS *et al.*, 2005).

O processo de adsorção pode ser classificado como adsorção química e adsorção física, dependendo da natureza das forças superficiais. A posição dos grupos funcionais sobre a superfície do adsorvente determina o tipo de interação que ocorre entre adsorbato/adsorvente e, portanto, define se o processo é de adsorção física ou química (HO; MCKAY, 1999).

A cinética de adsorção descreve a velocidade de remoção do soluto, sendo dependente das características físicas e químicas do adsorbato, adsorvente e do sistema experimental. Os parâmetros a serem avaliados incluem: pH, temperatura, concentração do adsorbato, tamanho dos poros do adsorvente, tipo de adsorbato e natureza da etapa limitante de velocidade de adsorção (FERNANDES, 2005).

Uma nova abordagem para a contaminação de solos e águas subterrâneas, chamada de remediação natural vem, recentemente, ganhando aceitação principalmente em locais contaminados por derramamento de derivados de petróleo, como o que acontece em postos de gasolina. A remediação natural é uma estratégia de gerenciamento que baseia-se em mecanismos naturais de atenuação para remediar contaminantes dissolvidos na água. A atenuação natural refere-se aos processos físicos, químicos e biológicos que facilitam a remediação natural (WIEDMEIR *et al.*, 1996).

### **3.3.1 Fatores que influenciam o processo de adsorção**

Os fenômenos de adsorção são resultado de uma combinação entre os tipos de forças envolvidas na adsorção física e química. Desta forma, os fatores que influenciam o processo de adsorção são área superficial, propriedades do adsorvente e do adsorbato, temperatura do sistema, natureza do solvente e pH do meio.

### *3.3.1.1 Área Superficial*

A intensidade da adsorção é proporcional à área superficial específica, visto que a adsorção é um fenômeno de superfície. Para partículas maiores, a resistência à difusão é menor e grande parte da superfície interna da partícula não é disponibilizada para adsorção (SEKAR; SAKTHI; RENGARAJ, 2004).

### *3.3.1.2 Propriedades do Adsorvente*

A natureza físico-química do adsorvente é fator determinante, pois a capacidade e a taxa de adsorção dependem da área superficial específica, porosidade, volume específico de poros, distribuição do tamanho de poros, dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e da natureza do material precursor (DOMINGUES, 2005).

### *3.3.1.3 Propriedades do adsorbato*

O tamanho da espécie é sempre importante quando a taxa de adsorção é dependente do transporte intraparticular. Outra característica de forte influência é a polaridade do adsorbato, uma vez que uma espécie polar terá mais afinidade para o solvente ou para o adsorvente, conforme a polaridade.

### *3.3.1.4 Velocidade de agitação*

A velocidade de agitação do sistema solução/adsorvente pode influenciar a adsorção devido à redução da resistência da camada periférica ao redor da partícula do adsorvente. Quando agitadas, as partículas do adsorvente e as moléculas do adsorbato adquirem movimentação na solução, resultando em uma chance ainda maior de ocorrer a adsorção (DOMINGUES, 2005).

## **3.3.2 Isotermas de Adsorção**

As isotermas de adsorção indicam a forma como o adsorvente efetivamente adsorverá o soluto, ou seja, se a purificação requerida pode ser obtida. Elas expressam a relação entre a

quantidade que é adsorvida por unidade de massa do bioissorvente e a concentração em solução no equilíbrio a uma determinada temperatura constante (COELHO *et al.*, 2014).

Volesky (2003) afirma que as isotermas podem ser representadas por equações simples que relacionam diretamente a capacidade de adsorção e a concentração final do adsorbato na solução.

### 3.3.3 Modelo de Langmuir

A equação modelo de Langmuir é uma das mais utilizadas para representação de processos de adsorção. Essa, por sua vez, apresenta os seguintes pressupostos:

- Existe um número definido de sítios.
- Os sítios têm energia equivalente e as moléculas adsorvidas não interagem umas com as outras.
- A adsorção ocorre em uma monocamada.
- Cada sítio pode comportar apenas uma molécula adsorvida (FOO; HAMEED, 2009; NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A Equação 1 representa a isoterma de Langmuir:

$$q_e = \frac{q_m K_a C_e}{1 + K_a C_e} \quad (1)$$

Em que:

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

$C_e$  = concentração do adsorbato no equilíbrio ( $\text{mg.L}^{-1}$ )

$q_m$  = capacidade de adsorção máxima ( $\text{mg.g}^{-1}$ )

$K_a$  = constante da isoterma de Langmuir ( $\text{L.mg}^{-1}$ )

### 3.3.4 Modelo de Freundlich

A equação de Freundlich é muito usada para descrever dados de ensaios de adsorção. É um modelo aplicável a superfícies altamente heterogêneas e que apresenta bem os dados experimentais de equilíbrio de adsorção em soluções de concentrações altas. Apesar de ser aplicado a dados de soluções em altas concentrações, pode haver pequeno ajuste ao modelo para dados de soluções com baixas concentrações (MARSOLLA, 2015).

O modelo assume que a adsorção ocorre em multicamadas, podendo ocorrer adsorção de mais de uma molécula do adsorbato em um sítio, sendo que esses sítios possuem diferentes energias de adsorção (FONSECA, 2013).

A isoterma de Freundlich é expressa pela Equação 2 (DOTTO *et al.*, 2011):

$$q = k_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

Em que:

$q$  = quantidade adsorvida no equilíbrio ( $\text{mg.g}^{-1}$ )

$k_F$  = constante de Freundlich [ $(\text{mg.g}^{-1})(\text{L.mg}^{-1})^{1/n}$ ]

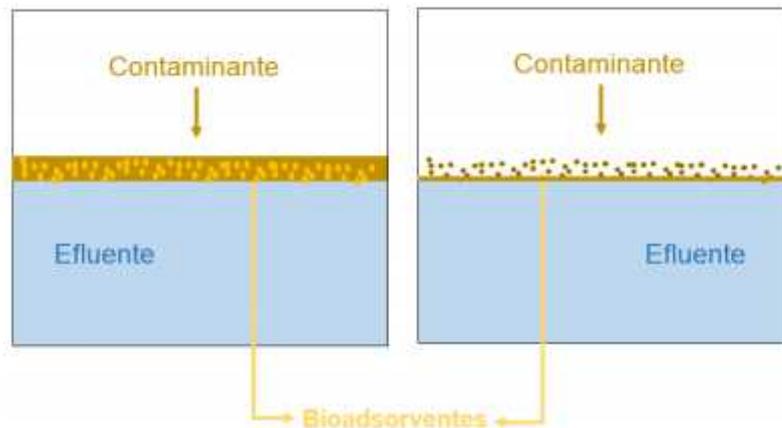
$C_e$  = concentração do adsorbato no equilíbrio ( $\text{mg.L}^{-1}$ )

$1/n$  = fator de heterogeneidade

### 3.4 LEITO DIFERENCIAL

O sistema de adsorção em leito diferencial é uma técnica nova, que consiste em remover contaminantes de um efluente por meio de uma camada fina de bioadsorventes em contato com esse efluente, proposto por Souza, Lima e Silva (2011), apresentado na Figura 3.

**Figura 3** – Modelo do Sistema de Leito Diferencial.



Fonte: SOUZA; LIMA; SILVA, 2011.

O método de remoção de contaminantes por meio da adsorção com palma forrageira como biomassa tem sido estudado em pequena escala em laboratórios (LIMA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018). Para expandir a escala, pode-se usar o leito diferencial que utiliza-se de maior quantidade de material para o estudo, podendo retratar de forma mais fiel os efeitos da presença do contaminante em volumes maiores.

### 3.5 SECAGEM

A secagem é o tratamento de remoção da água ‘livre’ (ligada ‘fisicamente’, ‘fracamente’) a uma substância (não estão compreendidos na secagem os processos de remoção da água por meios mecânicos do tipo centrifugação ou prensagem; estes são melhor descritos pela expressão deságue). A secagem é uma operação unitária que envolve reduzir o teor de líquido em sólidos.

De acordo com Geankoplis (1998), a secagem é a retirada de pequenas quantidades de água em um período relativamente pequeno de certo sólido, enquanto para remover grandes quantidades de água ou outro solvente tem-se a evaporação. A água ou o líquido em estudo é removido na forma de vapor com relação ao seu ponto de ebulição. Na secagem, a água quase sempre é removida como vapor de água. A água também pode ser removida de sólidos mecanicamente por prensagem, centrifugação ou vaporização.

A secagem natural consiste em expor a matéria-prima por longos períodos à radiação solar e sob condições climáticas de temperaturas relativamente altas, ventos com intensidade moderada e baixas umidades relativas.

### 3.6 BIOMASSA

O conceito de biomassa compreende todas as matérias orgânicas utilizadas como fontes de energia. Os resíduos agrícolas, madeira e plantas — tais como a cana de açúcar, o eucalipto e a beterraba, colhidos com o objetivo de produzir energia, sendo utilizado para processos de adsorção — são os exemplos mais comuns da biomassa.

A preparação de um biossorvente é feita por meio de tratamentos físicos de baixo custo, tais como lavagem, secagem, trituração e peneiramento. Esses procedimentos geram um material granuloso que pode ser empregado como adsorvente (VAGHETTI, 2009). A técnica de adsorção usando biomassa como adsorvente vem sendo uma alternativa potencialmente atrativa e econômica para o tratamento de diversos tipos de efluentes. Dentre a vegetação da região do semiárido paraibano, a palma forrageira vem se destacando como biomassa para remoção de compostos orgânicos em corpos d’água, conforme estudos já realizados (LIMA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018).

### 3.6.1 Palma Forrageira (*Opuntia stricta*)

Originária do México, a palma forrageira é uma cultura bem adaptada às condições adversas do semiárido. A espécie destaca-se como uma alternativa primordial para estas regiões, visto que é uma cultura que apresenta aspecto fisiológico especial quanto à absorção, aproveitamento e perda de água, sendo bem adaptada às condições adversas do cenário em questão (NUNES, 2011).

A palma (*Opuntia stricta*) é uma das principais alternativas para alimentação de caprinos, ovinos e bovinos no Semiárido brasileiro.

No Brasil, a palma forrageira é muito utilizada para alimentação animal e pouco se tem conhecimento sobre seus benefícios na dieta humana. Um estudo mais aprofundado dessa planta pode induzir ao seu maior aproveitamento e conseqüentemente gerar renda às famílias do semiárido brasileiro, com a criação de novos produtos.

A palma forrageira (Figura 4) é um cacto bem adaptado ao semiárido nordestino, que possui condições climáticas de poucas chuvas e solos pedregosos ou arenosos, com pouca matéria orgânica, porém ricos em minerais solúveis e pH próximo de sete (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

**Figura 4** – Plantio de palma forrageira orelha de elefante na cidade de Ouro Velho-PB.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

## 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 4.1 MATERIAIS

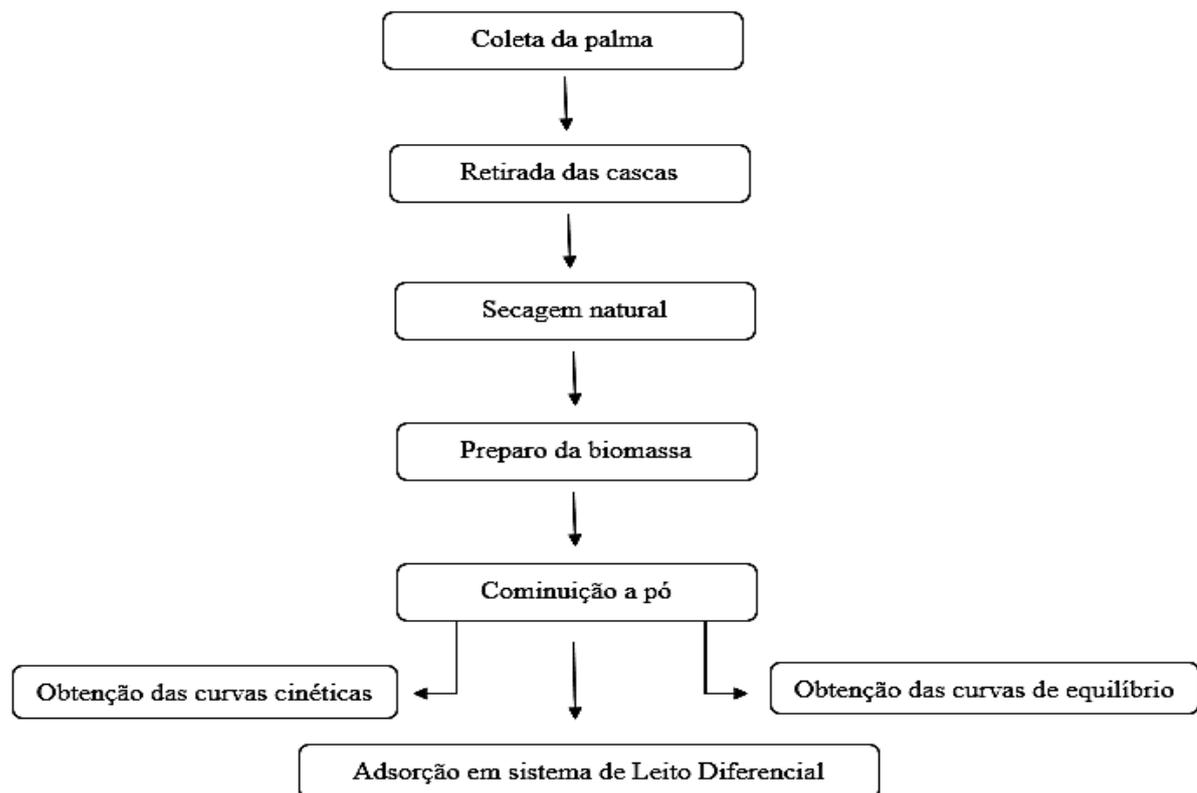
O contaminante orgânico foi a gasolina, obtida nos postos de combustíveis do município de Sumé-PB, localizada no Cariri Paraibano. Foi utilizada uma mistura gasolina/água para simular o efluente contaminado. O adsorvente usado foi a casca da palma forrageira (*Opuntia stricta*), em sua forma particulada.

### 4.2 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Solos (LASOL) da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Campus Sumé. A metodologia utilizada foi baseada em Lima *et al.* (2014), que utilizou o mandacaru como biomassa na adsorção de gasolina em água.

Na Figura 5, o fluxograma representa todas as etapas da metodologia desenvolvida, desde a coleta da palma até a obtenção das curvas cinéticas, isotermas de equilíbrio e utilização do sistema de leito diferencial.

**Figura 5** – Metodologia desenvolvida para a coleta de dados.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

#### 4.2.1 Obtenção da biomassa seca

A palma forrageira foi coletada na zona rural da Cidade de Ouro Velho-PB. Retirou-se toda a casca da palma forrageira (Figura 6), com subsequente submissão à secagem natural durante 10 dias, onde foi utilizado 100 raquetes da palma. O que restou após a retirada da casca serviu para alimentação bovina.

**Figura 6** – Casca da palma cortada para etapa de secagem.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

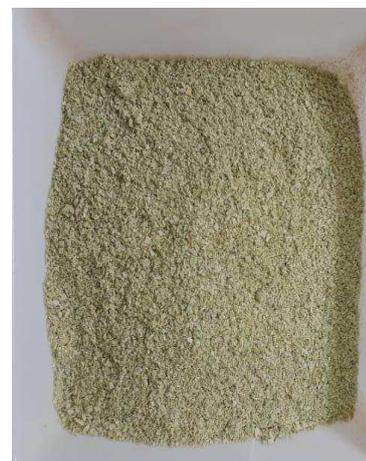
#### 4.2.2 Obtenção da biomassa na forma particulada

Para obtenção da sua forma particulada, as cascas secas foram submetidas à cominuição em moinho de facas (Figura 7a), para a obtenção de partículas com diâmetro na faixa de 1 a 2 mm (Figura 7b).

**Figura 7** – (a) Moinho de facas; (b) Biomassa na forma particulada.



(a)



(b)

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

### 4.2.3 Cinética de adsorção

Para obtenção das curvas cinéticas foram preparados 12 frascos Erlenmeyer, contendo quantidades fixas de água (40 mL) e gasolina (12 mL) e colocados em uma mesa vibratória, sob agitação de 130,0 rpm, com variação de tempo de 5 a 60 minutos, sendo adicionada a biomassa palma na sua forma particulada (1,2 g) em todos os frascos Erlenmeyers, com intervalo de 5 minutos para cada frasco. Ao término da agitação, as amostras foram submetidas à filtração em peneira comum. Em seguida, com o auxílio de provetas de 50 e 100 mL, foi realizada a aferição volumétrica das amostras (Figura 8) ao final do tempo de contato entre o adsorbato e o adsorvente. Assim, determinaram-se o volume de gasolina adsorvida e a massa da biomassa com o auxílio da balança analítica.

**Figura 8** – Análise volumétrica do volume de gasolina na mistura gasolina/água.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

### 4.2.4 Equilíbrio na adsorção

No estudo do equilíbrio, foram utilizados frascos Erlenmeyer, aos quais foram adicionadas quantidades fixas de biomassa (1,2 g) e uma solução de água e gasolina, com a concentração de gasolina variando de 5 a 60%, com variação de 5% para cada frasco, resultando um total de 52mL da mistura heterogênea água/gasolina (Tabela 1). Após o preparo, os Erlenmeyers foram submetidos à mesa vibratória (Figura 9), sob rotação de 130,0 rpm. Ao final do tempo de agitação, as amostras foram filtradas com auxílio de uma peneira comum. Utilizando provetas, seus volumes foram aferidos, e suas massas determinadas com o auxílio de balança analítica.

**Tabela 1** – Valores das concentrações água e gasolina no estudo de equilíbrio de adsorção.

Concentração de gasolina (%)	Volume de Gasolina (mL)	Volume de Água (mL)
5	2,6	49,4
10	5,2	46,8
15	7,8	44,2
20	10,4	41,6
25	13,0	39,0
30	15,6	36,4
32	18,2	33,8
40	20,8	31,2
45	23,4	28,6
50	26,0	26,0
55	28,6	23,4
60	31,2	20,8

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

**Figura 9** – Fracos Erlenmeyer contendo a mistura água/gasolina/biomassa na mesa agitadora, sob agitação de 130,0 rpm.

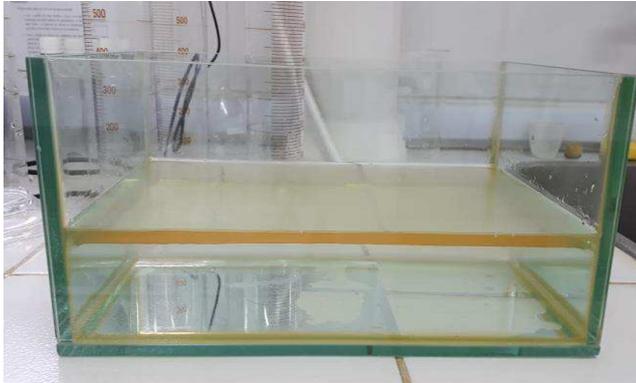
Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

#### 4.2.5 Sistema de adsorção em Leito Diferencial

O processo de adsorção em sistema de leito diferencial baseou-se na metodologia desenvolvida por LIMA *et al.* (2014) e consistiu em adicionar 400mL de uma mistura heterogênea água/gasolina (Figura 10a) a um recipiente retangular de vidro. Posteriormente foi

adicionada a biomassa (Figura 10b) em sua forma particulada à tela de alumínio formando uma camada de 3mm de espessura (medição com paquímetro digital).

**Figura 10** – (a) Recipiente contendo a mistura água/gasolina; (b) Biomassa particulada adicionada em tela de alumínio.



(a)

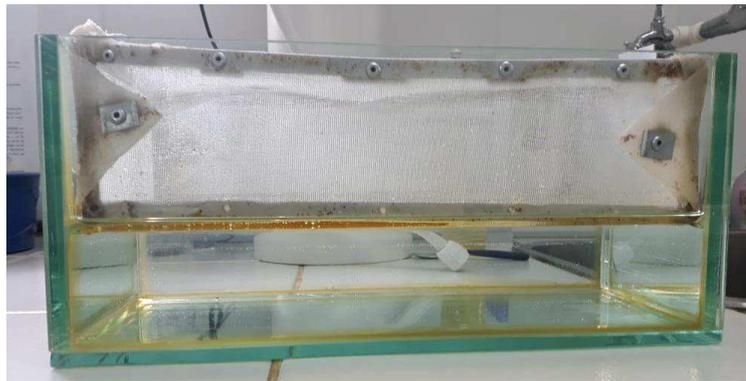


(b)

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Por fim, a tela de alumínio com a camada da biomassa foi sobreposta ao recipiente retangular de vidro contendo a mistura água/gasolina para que ficassem em contato físico direto por tempo determinado (Figura 11).

**Figura 11** – Tela de alumínio sobreposta ao recipiente contendo a mistura água/gasolina.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

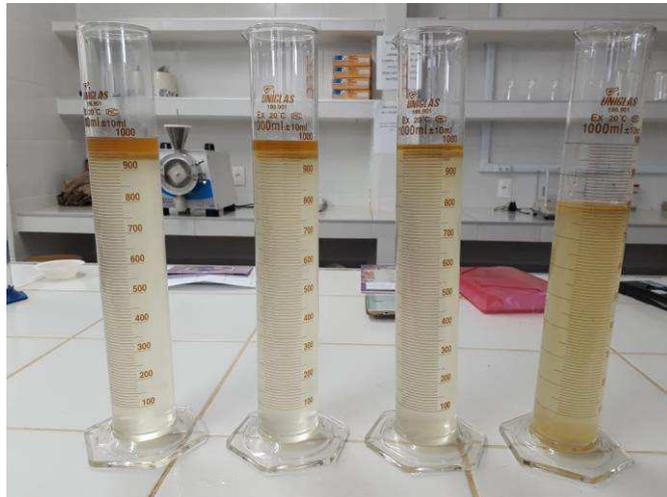
Os experimentos foram realizados em triplicata, com percentuais de gasolina de 10%, 15% e 20% em relação ao volume total da mistura água/gasolina (Tabela 2).

**Tabela 2** – Percentuais de concentração de gasolina no sistema de leito diferencial.

Concentração de gasolina (%)	Volume de Gasolina (mL)	Volume de Água (mL)
10	400	3600
15	600	3400
20	800	3200

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Estimou-se o tempo de 15 a 35 minutos, com intervalos de 5 minutos para análise volumétrica (Figura 12), para mensurar a quantidade adsorvida do adsorbato gasolina em relação ao adsorvente biomassa da casca de palma forrageira.

**Figura 12** – Análise volumétrica da quantidade de contaminante não adsorvido.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

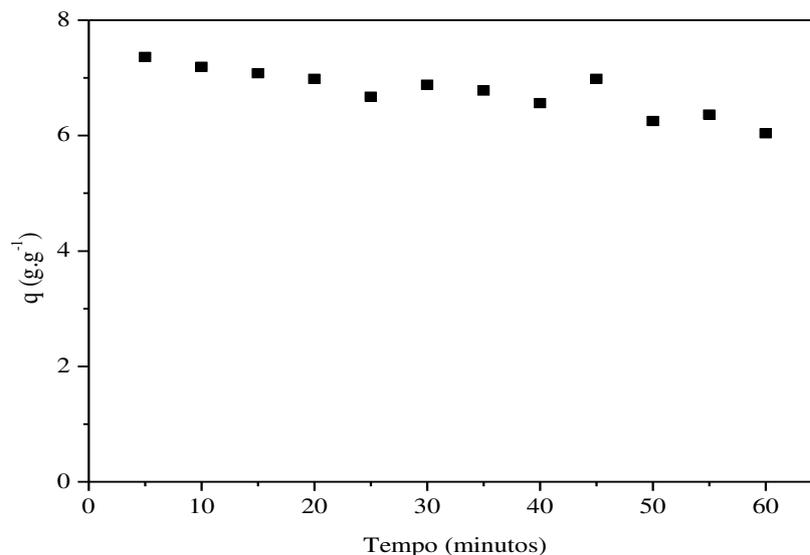
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados coletados nos experimentos, foram obtidos os seguintes resultados.

### 5.1 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

No Gráfico 1 estão apresentados os resultados referentes à cinética de adsorção para o sistema estudado.

**Gráfico 1** – Cinética de adsorção para o sistema palma forrageira/gasolina/água.



Fonte: Construído com os dados da pesquisa.

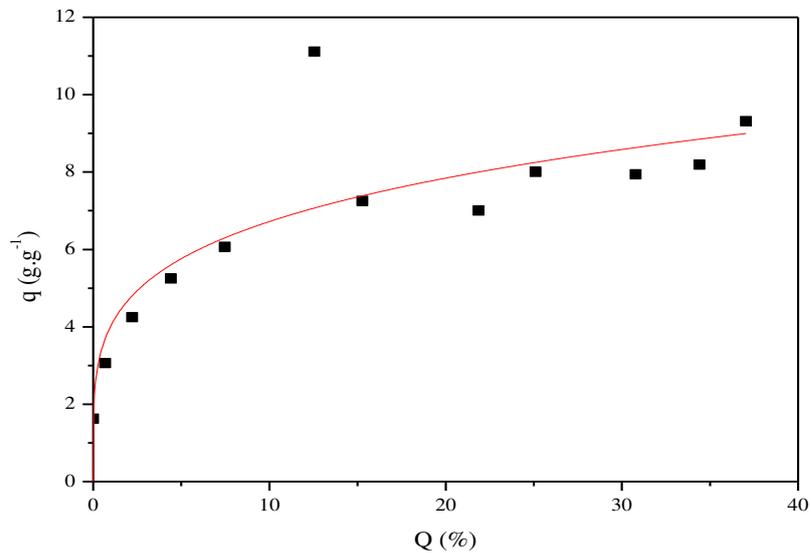
Pode-se observar, a partir do gráfico 1, que a adsorção por meio da biomassa casca da palma forrageira é rápida e eficaz, tendo início a partir dos 05 minutos de contato com o adsorvente.

O processo de adsorção foi satisfatório, tendo satisfatória redução da concentração do poluente na solução, conforme a literatura prevê (LIMA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018), havendo pequenas variações ao longo do tempo. O sistema apresentou o menor valor da concentração de contaminante na solução no tempo de 60 minutos (6,04 g.g<sup>-1</sup>), e de maior concentração no tempo de 05 minutos, com 7,36 g.g<sup>-1</sup>.

## 5.2 EQUILÍBRIO NA ADSORÇÃO

O Gráfico 2 ilustra os resultados dos experimentos de equilíbrio de adsorção para o sistema estudado.

**Gráfico 2** – Equilíbrio de adsorção para o sistema palma forrageira/gasolina/água.



Fonte: Construído com os dados da pesquisa.

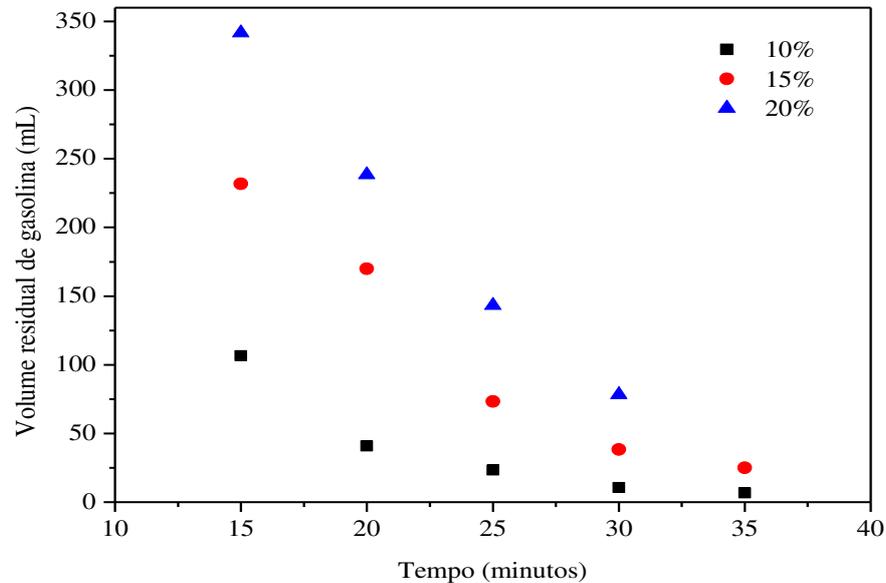
Em relação aos resultados exibidos no gráfico 2, pode-se afirmar que o equilíbrio apresentou-se de acordo com as pesquisas anteriores (LIMA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018), com capacidade máxima de adsorção de  $11,11 \text{ g.g}^{-1}$ , na concentração de 12,56% da solução final.

O modelo de isoterma de Freundlich ajustou-se bem aos resultados de equilíbrio, sugerindo que a adsorção ocorreu em multicamadas, ou que houve adsorção de mais de uma molécula do adsorbato em um sítio do adsorvente.

## 5.3 ADSORÇÃO EM SISTEMA DE LEITO DIFERENCIAL

No Gráfico 3 estão apresentados os resultados da adsorção no leito diferencial, para as concentrações de contaminante de 10, 15 e 20%.

**Gráfico 3** – Curva de equilíbrio de adsorção para o sistema água/gasolina/biomassa no leito diferencial.



Fonte: Construído com os dados da pesquisa.

A partir do gráfico 3, observa-se que o sistema de adsorção em leito diferencial para as três concentrações estudadas, nos primeiros 15 minutos, apresentou uma eficiência adsortiva significativa, com crescimento à medida que o tempo de contato aumentou.

A adsorção para o sistema com 10% de contaminante presente mostrou ser mais eficiente, visto que o volume residual final de contaminante foi de 6,65 mL após o tempo de 35 minutos de contato com a biomassa.

À medida que a concentração de contaminante foi aumentada, a eficiência diminuiu quantitativamente visto que o volume residual aumentou, porém o perfil de adsorção manteve-se, com o aumento na quantidade de remoção do contaminante à medida que o tempo de contato contaminante/biomassa aumentou. Para a concentração de 15%, o volume residual a 35 minutos foi de 25 mL e para a concentração de 20%, a quantidade de contaminante presente após 35 minutos foi de 53,32 mL.

## 6 CONCLUSÕES

Os estudos utilizando o sistema de adsorção em leito diferencial apresentaram resultados satisfatórios, tornando-se um protótipo de grande eficácia no estudo do tratamento de efluentes contaminados por compostos derivados do petróleo.

A cinética de adsorção foi bastante rápida, com início nos primeiros 05 minutos de contato entre a mistura água/gasolina e a biomassa casca de palma forrageira, ocorrendo remoção do contaminante de modo constante.

O equilíbrio de adsorção foi obtido com valores significativos de capacidade de adsorção do contaminante (11,11 g.g<sup>-1</sup>). O modelo de Freundlich mostrou-se bem ajustado aos resultados obtidos nos estudos de equilíbrio, sugerindo uma superfície heterogênea e uma adsorção em multicamadas.

Analisando os resultados experimentais obtidos, pode-se afirmar a eficiência adsortiva da biomassa da casca da palma forrageira (*Opuntia stricta*), caracterizando assim uma fonte alternativa, econômica e sustentável para remoção de efluentes contaminados por gasolina.

## REFERÊNCIAS

- ABRIOLA, L.mM. **Multiphase Flow and Transport Models for Organic Chemicals: a Review and Assessment**. Eletric Power Research Institute, Final Report. Ann Arbor, 93p., Michigan: September, 1988.
- BALDAN, E.; BASAGLIA, M.; FONTANA, F.; SHAPLEIGH, J. P.; CASELLA, S. Development, assessment and evaluation of a biopile for hydrocarbons soil remediation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 98, p. 66-72, 2015.
- BESKOSKI, V.P.; GOJGIĆ-CVIJOVIĆ, G.; MILIĆ, J.; ILIĆ, M.; MILETIĆ, S.; SOLEVIĆ, T.; VRVIĆ, M.M. Ex situ bioremediation of a soil contaminated by mazut (heavy residual fuel oil) - A field experiment. **Chemosphere**, v. 83, p. 34-40, 2011.
- BRAGA, R. M. **Uso de argilominerais e diatomita como adsorvente de fenóis em águas produzidas na indústria de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte–Brasil, 2008.
- COELHO, G. F.; JR, A. C. G.; SOUSA, R. F. B.; SCHWANTES, D.; MIOLA, A. J.; DOMINGUES, C. V. R. Uso De Técnicas De Adsorção Utilizando Resíduos Agroindustriais Na Remoção De Contaminantes Em Águas. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.3, n. especial, p.291-317, 2014.
- CURBELO, F. D. S. **Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada**. Dissertação de mestrado (Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal- RN, 2002.
- CUSTANCE, S. R.; MCCAWE, P. A.; KOPF, A. C.; SULLIVAN, M. J. Environmental fate of the chemical mixtures: crude oil, jp-5, Mineral spirits and diesel fuel. **J. Soil Contam.**, 1:379-386, 1992.
- DOMENICO, P. A., SHWARTZ, F. W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. 824p, John Wiley & Sons: 1990.
- DOMINGUES, V. M. F. **Utilização de um produto natural (cortiça) como adsorvente de pesticidas piretróides em águas**. 2005. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2005.
- DOTTO, G. L.; SOUZA, V. C.; PINTO, L. A. A. Drying of chitosan in a spouted bed: The influences of temperature and equipment geometry in powder quality. **LWT–Food Sci. and Technol.**, 44, 1786–1792, 2011.
- ESPINDULA; J. C.; SANTOS, A. C.; ARAÚJO, J. M. de A.; CALAZANS, G. M. T.; ALMEIDA, F. de A. Caracterização bacteriológica e físicoquímica das águas do aquífero freático do cemitério da várzea-Recife, **Estudos geológicos**, v. 15, p. 79-89, 2005.
- FERNANDES, R. **Adsorventes alternativos para remoção de fenol em solução aquosa**. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- FINOTTI, A. R.; TEIXEIRA, C. E.; FEDRIZZI, F.; CALGLIARI, J.; NASCIMENTO FILHO, I. Avaliação da influência do etanol sobre o grau de volatilização BTEX em solos impactados por derrames de gasolina/etanol, **Eng Sanit Ambient.**, v.14, n.4, out/dez, p. 443-448, 2009.

- FONSECA, A.C.C. **Produção de carvão ativado utilizando como precursor borra de café e sua aplicação na adsorção de fenol.** Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais) - Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 51f., Curitiba, 2013.
- FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, p.2-10. 2010.
- GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias.** 3ª Edición, México: CECSA, 1998.
- HILLEL, D. **Movement and Retention of Organic in Soil: A Review and a Critique of Modeling.** In: KOSTECKI, P. T., CALABRESE, E. J. Petroleum Contaminated Soils - Volume 1, p.81-86, Chelsea: Lewis Publishers, 1988.
- HO, Y.S.; MCKAY, G. Pseudo-second-order model for sorption process. **Process Biochemistry**, v.34, n.5, p.451-465, 1999.
- HUNT, J. R., SITAR, N., UDELL, K. S. **Nonaqueous Phase Liquid Transport and Cleanup: 1 - Analysis of Mechanisms.** Water Resources Research, v.24, n.8, p.1247-1258, 1988.
- JÚNIOR, J. J.; PASQUALETTO, A. **Contaminação ambiental movida por postos retalhistas de combustíveis.** Universidade Católica de Goiás. Goiás, 2008.
- JAYALAKSHMI, G.; SARITHA, V.; DWARAPUREDDI, B. K. A Review on Native Plant Based Coagulants for Water Purification, **International Journal of Applied Environmental Sciences**, v. 12, n. 3, p. 469-487, 2017.
- LIMA, L. M. R.; TAVARES D.; OLIVEIRA, F. J. da C.; SILVA, J. L. B. C. da; MARTINS, T. D. N.; LIMA, L. M. R. Avaliação do poder adsorptivo da palma forrageira (*Opuntia ficus*) para remoção de contaminantes hidrogenocarbonados em águas de descarte, In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, Fortaleza-CE, 2016.
- LIMA, L. M. R.; SILVA, J. L. B. C. da; CAVALCANTE, L. E.; SILVA, E. D. A. F. da; LIMA, L. M. R. L., **Avaliação do poder adsorptivo da palma forrageira (*Opuntia tuna mill*) sem casca para uso na remoção de gasolina comum em corpos d'água,** In: III Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e V Workshop de Engenharia de Petróleo, Salvador-BA, 2018.
- LIMA, L. M. R.; COSTA, K. J. B.; OLIVEIRA, E. D. C.; OLIVEIRA, E. K. G.; SANTOS, T. C.; SILVA, V. L. M. M. **Utilização do mandacaru (*Cereus jamacaru*) como biomassa adsorvente de gasolina presente em corpos d'água.** X Encontro Brasileiro sobre Adsorção, Guarujá-SP, 2014.
- LITTLE, J. C., DAISEY, J. M., NAZAROFF, W. W. Transport of Subsurface Contaminants into Buildings. **Environmental Science & Technology**, v. 26, n.11, p. 2058-2065, 1992.
- MACKAY, D.; CHERRY, J. A. **Groundwater Contamination: Pump-and-Treat Remediation.** Environmental Science & Technology, v.23, n.6, 7p., 1989.
- MARCHAL, R.; PENET, S.; SOLANO-SERENA, F.; VANDECASTEELE, J.P. Gasoline and diesel oil biodegradation. **Oil & Gas Science Technology**, v. 58, n. 4, p. 441-448, 2003.
- MARIANO, A. P. **Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel.** 162f. Tese (doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

- MARIANO, A. P.; BONOTTO, D. M.; ANGELIS, D. F. de; PIRÔLLO, M. P. S.; CONTIERO, J. Biodegradability of commercial and weathered diesel oils. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 133-142, 2008.
- MARSOLLA, L. D. **Avaliação da adsorção do herbicida 2,4-D em carvão ativado em pó utilizando água com diferentes qualidades**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 105 f., 2015.
- MORRISON, R. T.; BOYD, R. N. **Química Orgânica**, Lisboa-PO: Fundação Calouste Gulbenkian, 1996.
- NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **ADSORÇÃO: Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa universitária, 256p., 2014.
- NUNES, C. S. Usos E Aplicações da Palma Forrageira como Uma Grande Fonte de Economia para o Semiárido Nordeste. **Revista Verde**, Mossoró, v. 6, p. 58–66, 2011.
- OLADOJA, N. A.; UNUABONAH, E. I.; AMUDA, O. S.; KOLAWOLE, O. M. Progress and prospects of polysaccharide composites as adsorbents for water and wastewater treatment. In: OLADOJA, N. A.; UNUABONAH, E. I.; AMUDA, O. S.; KOLAWOLE, O. M. **Springer Briefs in Molecular Science**, cap. 4, p. 65-90. Berlin: Springer, 2017.
- OLIVEIRA, A. S. C.; FILHO, F. N. C.; RANGEL, A. H. N.; LOPES, K. B. P. A palma forrageira: alternativa para o semiárido. v.6, p. 49- 58, **Revista Verde**, Mossoró – RN, Brasil, 2011.
- PESSOA JR, A.; KILIKIAN, B. V. **Purificação de Produtos Biotecnológicos**. Barueri: Manole, 2005.
- PORTO, D. C. **Investigação da contaminação do solo e das águas subterrâneas por óleo combustível: estudo de caso em Ribeirão Preto (SP): Empresa Viação Garcia**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.
- RAFATULLAH, M.; SULAIMAN, O.; HASHIM, O.; AHMAD, A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. **Journal of hazardous materials**, v. 177, n. 1-3, p. 70-80, 2010.
- REBOUÇAS, A.C., BRAGA, B., TUNDISI, J.G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**, 2.ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002.
- RODRIGUES, E. M.; KALKS, K. H. M.; FERNANDES, P. L.; TÓTOLA, M. R. Bioremediation strategies of hydrocarbons and microbial diversity in the Trindade Island shoreline - Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 101, n. 2, p. 517-525, 2015.
- RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. New York: J. Wiley, 1984.
- SANTOS, A. C.; SILVA, S. R.; SILVA, J. T.; ZANTA, C. L. P. S. **Tratamento de água produzida de petróleo através da tecnologia eletroquímica**. 3º Congresso Brasileiro de P&D em petróleo e gás. Salvador, 2005.
- SEKAR, M.; SAKTHI, V.; RENGARAJ, S. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead (II) onto activated carbon prepared from coconut shell. **Colloid and Interface Science**, v. 279, p. 307-313, 15 nov. 2004.
- SHAK, K. P. Y.; WU, T. Y. Synthesis and characterization of a plant-based seed gum via etherification for effective treatment of high-strength agro-industrial wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 307, 2017.

SILVA, R. L. B.; BARRA, C. M.; MONTEIRO, T. C. do N.; BRILHANTE, O. M. Estudo da contaminação de poços rasos por combustíveis orgânicos e possíveis consequências para a saúde pública no Município de Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil. **Cad Saúde Pública**, v. 18, n. 6, p. 1599-607, 2002.

SOUZA, R. S; LIMA, L. M. R; SILVA, V. L. M. M. Adsorção de óleo diesel em sistema de leito diferencial com biomassa bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6 (2011) 123-126, ISSN 1809.8797, 2011.

VAGHETTI, J. C. P. Pecan nutshell as biosorbent to remove Cu (II), MN (II) and PB (II) from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 162, n. 1, p. 270-280, 2009.

VOLESKY, B. Biosorption process simulation tools. **Hydrometallurgy**, v.71, p.179-190, 2003.

WIEDMEIR, T. H.; SWANSON, M. A.; WILSON, J. T.; KAMPBELL, D. H.; MILLER, R. N.; HANSEN, J. E. Approximation of Biodegradation Rate Constants for Monoaromatic Hydrocarbons (BTEX) in Ground Water. **Ground. Monit. Rem.**, v. summer, p. 186-194, 1996.

YALLOUZ, A. V.; CALIXTO, T. Mercúrio – Análise de peixe – “insitu” e a possibilidade de intoxicação, **Saneamento Ambiental**, p. 40-43, 2002.

<<https://slideplayer.com.br/slide/9557437/>>. Acesso em: 12 de Setembro de 2018.

<<http://universechemistry.blogspot.com/2017/06/revisao-para-prova-do-3-ano-purificacao.html>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2018.