



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JULIANA VIEIRA DA SILVA

**ADSORÇÃO DE AMOXICILINA EM BORRA DE CAFÉ, COMO UMA
ALTERNATIVA PROMISSORA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

JOÃO PESSOA - PB
2025

JULIANA VIEIRA DA SILVA

**ADSORÇÃO DE AMOXICILINA EM BORRA DE CAFÉ, UMA ALTERNATIVA
PROMISSORA EM ÁGUA POTÁVEL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química Industrial, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, *Campus I*, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Andrea Lopes de Oliveira Ferreira

JOÃO PESSOA - PB
2025

Catlogação na publicação Seção de

S586a Silva, Juliana Vieira da.

ADSORÇÃO DO AMOXICILINA EM BORRA DE CAFÉ, UMA
ALTERNATIVA PROMISSORA EM ÁGUA POTÁVEL: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA / Juliana Vieira da Silva. - João Pessoa, 2025.
29 f. : il.

Orientação: Andrea Lopes de Oliveira Ferreira. TCC (Graduação) -
UFPB/CT.

1. Antibióticos. 2. Amoxicilina. 3. Adsorção. 4. Borra de café. I. Ferreira,
Andrea Lopes de Oliveira.
II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

Catlogação e Classificação

Elaborado por ONEIDA DIAS DE PONTES - CRB-CRB15/198

JULIANA VIEIRA DA SILVA

**ADSORÇÃO DE AMOXICILINA EM BORRA DE CAFÉ, UMA ALTERNATIVA
PROMISSORA EM ÁGUA POTÁVEL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Aprovada em: 25 de abril de 2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANDREA LOPES DE OLIVEIRA FERREIRA**
Data: 05/05/2025 21:04:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof.^a Dra. Andrea Lopes de Oliveira Ferreira – DEQ/CT/UFPB
(Orientadora)**

Documento assinado digitalmente
 **ISLANNY LARISSA OURIQUES BRASILEIRO**
Data: 07/05/2025 10:43:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Islanny Larissa Ouriques Brasileiro – DEQ/CT/UFPB
(Membro da Banca)**

Documento assinado digitalmente
 **GIOVANILTON FERREIRA DA SILVA**
Data: 06/05/2025 09:19:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Giovanilton Ferreira da Silva – DEQ/CT/UFPB (Membro da
Banca)**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, que debaixo de muito sol me fez chegar aqui, na sombra.

RESUMO

A contaminação da água por fármacos, especialmente antibióticos, é um crescente problema global. Aproximadamente 90% dos antibióticos são descartados no meio ambiente ainda ativos, levando ao aumento de microrganismos resistentes, com potencial de causar uma nova pandemia, segundo a ONU. Em 2019, infecções resistentes resultaram em mais de 1 milhão de mortes, e a projeção é que possam causar até 10 milhões de mortes por ano até 2050. A amoxicilina, um antibiótico comum, é amplamente utilizado e, portanto, frequentemente encontrada em corpos d'água, contribuindo para o desenvolvimento de resistência bacteriana. Para mitigar esse problema, a adsorção se destaca como uma operação eficaz para remover esses contaminantes da água. A borra de café, um resíduo abundante, apresenta alta capacidade de adsorção, tornando-se uma opção promissora para o tratamento de efluentes contaminados por amoxicilina. A borra de café, um resíduo da indústria, apresenta alta capacidade de adsorção. A borra de café surge como uma solução econômica e sustentável para o tratamento de efluentes contaminados por amoxicilina. Este estudo teve como objetivo realizar uma investigação descritiva que emprega a metodologia de revisão integrativa da literatura (RI) sobre a eficiência de adsorção da amoxicilina na borra de café.

Palavras-chave: Antibióticos. Amoxicilina. Adsorção. Borra de café.

ABSTRACT

Water contamination by pharmaceuticals, especially antibiotics, is a growing global issue. Approximately 90% of antibiotics are discarded into the environment while still active, leading to an increase in resistant microorganisms, with the potential to cause a new pandemic, according to the UN. In 2019, resistant infections resulted in over 1 million deaths, and projections indicate they could cause up to 10 million deaths per year by 2050. Amoxicillin, a common antibiotic, is widely used and therefore frequently found in water bodies, contributing to the development of bacterial resistance. To mitigate this problem, adsorption stands out as an effective method for removing these contaminants from water. Coffee grounds, an abundant waste product, exhibit a high adsorption capacity, making them a promising option for treating effluents contaminated with amoxicillin. Coffee grounds, a byproduct of the industry, show high adsorption potential. Coffee grounds emerge as an economical and sustainable solution for the treatment of effluents contaminated with amoxicillin. This study aimed to conduct a descriptive investigation using the integrative literature review (ILR) methodology on the adsorption efficiency of amoxicillin in coffee grounds.

Key words: Antibiotics. Amoxicillin. Adsorption. Coffee grounds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Isolamento dos micro-organismos resistentes ao antibiótico amoxicilina (água bruta).....	14
Figura 2	Estrutura da amoxicilina.....	15
Figura 3	Esquema de operação do adsorvato e do adsorvente.....	16
Figura 4	Resumo da sequência da metodologia empregada para seleção da bibliografia para análise de amoxicilina em corpos de água.....	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Achados destacados da pesquisa.....	17
-----------------	-------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ONU- Organização das Nações Unidas

Pnuma- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

OMS- Organização Mundial da Saúde

ETE- Estação de Tratamento de Esgoto

DRX- Difração de Raios X

MEV-Microscopia Eletrônica de Varredura

RI- Revisão Integrativa

SAC- Carvão Ativado derivado de Resíduos de Café

BC- Biochar (Carvão Biológico)

HC- Carvão Ativado Convencional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL.....	14
3.2	AMOXICILINA.....	15
3.3	ADSORÇÃO.....	15
3.4	BORRA DE CAFÉ.....	17
4	METODOLOGIA.....	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
6	CONCLUSÕES.....	22
7	REFERÊNCIAS.....	23

1 INTRODUÇÃO

A população mundial está cada vez mais exposta à água contaminada por fármacos. Por exemplo, a contaminação de fontes de água por antibióticos. Um relatório divulgado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), da ONU, indica que cerca de 90% dos antibióticos são despejados no meio ambiente ainda ativos, seja através de esgotos ou pela defecação a céu aberto. Isso pode resultar na presença de microrganismos resistentes a medicamentos na água, que podem desencadear uma nova pandemia (ONU, 2023).

O relatório da ONU destaca que quanto mais os microrganismos são expostos aos antibióticos, maior é sua capacidade de se adaptar e desenvolver resistência a esses medicamentos. Em 2019, infecções resistentes a antibióticos foram responsáveis por mais de 1 milhão de mortes. Sem medidas imediatas, estima-se que essas infecções possam causar até 10 milhões de mortes por ano até 2050. Isso ocorre porque esses fármacos apresentam alta toxicidade para bactérias ambientais, o que pode, a longo prazo, levar ao desenvolvimento de espécies bacterianas resistentes, tornando o medicamento ineficaz no tratamento de algumas doenças. Além disso, sua baixa biodegradabilidade impede ainda a determinação do efeito crônico da exposição em seres humanos e animais, bem como sua remoção por métodos convencionais no tratamento de esgoto doméstico e industrial. Dessa forma, o problema transcende o âmbito ambiental e passa a ser também uma questão de saúde pública (ONU, 2023).

A amoxicilina, pertencente à classe dos antibióticos β -lactâmicos, caracterizados por possuírem um núcleo β -lactâmico em sua estrutura molecular, é derivada da penicilina, é um medicamento de custo acessível e bem tolerado. Com um espectro moderado, é eficaz no tratamento de infecções bacterianas provocadas por microrganismos sensíveis, ou seja, aqueles não produtores de beta-lactamases, as quais podem neutralizar a ação da amoxicilina. Tipicamente é preferido dentro dessa classe devido à sua melhor absorção via oral em comparação com outros antibióticos β -lactâmicos, como a ampicilina, em consequência disso, a amoxicilina é amplamente utilizada pela população em comparação com outros antibióticos, o que implica em uma eliminação mais significativa na natureza (Sanar, 2019).

A amoxicilina, apresenta um potencial para causar impactos ambientais, devido à sua capacidade de promover o desenvolvimento de organismos resistentes, à toxicidade aguda para certas espécies aquáticas, à resistência aos métodos convencionais de tratamento de efluentes e à persistência no ambiente, intensificando seu efeito no ecossistema. Uma grande quantidade desses medicamentos é direcionada para o ambiente aquático, com taxas de excreção variando

de 30 a 90%. Considerando um consumo mundial de aproximadamente 200.000 toneladas por ano, estima-se que cerca de 50% dessas substâncias entrem nos corpos hídricos (Da Silva, 2022).

Atualmente, há uma discussão sobre os riscos e impactos dos antibióticos no meio ambiente, assim como sobre a capacidade de remoção ou destruição dessas substâncias por meio de sistemas de tratamento de efluentes. As principais vias de contaminação dos antibióticos no meio ambiente incluem o uso deliberado, seja por via oral ou por injeção, no qual a parcela não utilizada pelo organismo é eliminada por excreção, além do descarte de medicamentos vencidos ou não utilizados em esgotos ou lixo comum. Existem diversas técnicas disponíveis para a remoção de compostos orgânicos de efluentes líquidos, e a adsorção se destaca como uma excelente opção para esse propósito. Estudos têm sido conduzidos visando o desenvolvimento de adsorventes alternativos de baixo custo, utilizando resíduos e materiais agrícolas que são ricos em carbono e facilmente disponíveis (Oliveira, 2022).

O café, por exemplo, é um material de grande relevância para a economia do Brasil e gera quantidades significativas de resíduos. Os remanescentes carbonáceos desses resíduos, que muitas vezes são separados em categorias com pouco ou nenhum valor comercial, apresentam-se como potenciais candidatos para a produção de adsorventes de baixo custo. Assim, os materiais remanescentes gerados na indústria do café, surge como uma via promissora para a produção desses adsorventes. A adsorção é uma técnica eficaz para remover fármacos de efluentes, e a utilização de borra de café tem se destacado nesse sentido. A borra de café possui alta capacidade de adsorção para uma variedade de contaminantes orgânicos, inorgânicos e metais, devido à sua grande área superficial, estabilidade térmica e baixo custo. Em processos industriais, a adsorção pode ser conduzida em colunas de leito fixo, tipicamente de forma contínua, onde o efluente é passado pelo leito contendo o adsorvente (Rangel, 2023).

É possível encontrar na literatura diversos estudos avaliando a adsorção de amoxicilina em diferentes condições operacionais. Dentre essas variáveis, destacam-se o *pH*, temperatura, velocidade de agitação do meio, concentração de adsorvente e adsorvato que podem estabelecer a eficiência ou fracasso da operação de adsorção se não forem bem avaliados. Sendo assim, este estudo propõe-se a revisar e analisar a adsorção, em diferentes condições operacionais, da amoxicilina na borra do café e estabelecer a remoção do resíduo da amoxicilina nas águas consumidas pela população em geral.

2 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Realizar uma investigação descritiva que emprega a metodologia de revisão integrativa da literatura (RI) revisando e analisando a adsorção, em diferentes condições operacionais, da amoxicilina na borra do café e estabelecer a remoção do resíduo da amoxicilina nas águas consumidas pela população em geral.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a aplicação de adsorção de amoxicilina em borra de café, visando o esclarecimento de mecanismos controladores do processo e;
- Estudar diferentes condições operacionais capazes de aumentar o rendimento do processo de adsorção como, temperatura, pH, concentração de adsorvente e concentração de adsorvato.

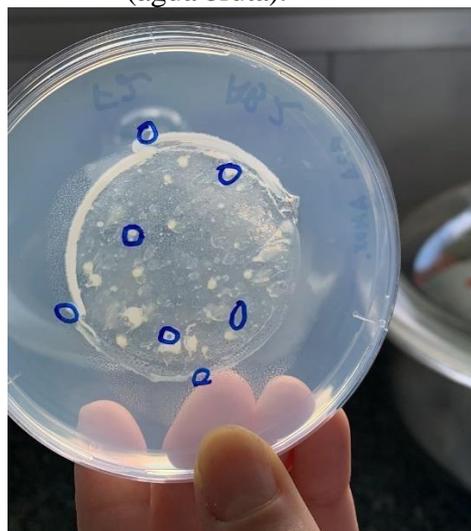
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Contaminação Ambiental

Com o aumento do uso de medicamentos por humanos e animais, a comunidade científica tem se interessado mais por esse tema. Pesquisas mostram que há resquícios de medicamentos em estações de tratamento de esgoto e em águas naturais. (Silva; Wolff e Carissimi, 2022). Eles entram no meio ambiente por diversas fontes, como esgotos hospitalares e domésticos, áreas de irrigação com lodo de ETE, produção industrial, lixiviação de aterros e resíduos sanitários (OMS, 2018).

A contaminação da água por medicamentos ocorre através de interações entre os resíduos e o meio ambiente. Muitas vezes, os contaminantes chegam ao solo sem tratamento e, eventualmente, atingem o lençol freático. Mesmo após tratamento em estações de esgoto, os fármacos podem não ser totalmente removidos e acabam contaminando fontes de água potável. A Figura 1 mostra o isolamento de microrganismos resistentes a amoxicilina em água bruta. Durante esse processo, vários organismos são expostos aos resíduos, o que permite que os fármacos circulem por diferentes níveis tróficos. A indústria farmacêutica pode ser uma grande poluidora devido à ausência ou ineficiência de tratamento de efluentes, liberando substâncias químicas no meio ambiente. Estudos no Brasil, Estados Unidos e Europa detectaram medicamentos em águas residuais municipais, águas superficiais, subterrâneas e, em menor quantidade, em água potável. (Bound e Voulvoulis, 2004).

Figura 1: Isolamento dos microrganismos resistentes ao antibiótico amoxicilina (água bruta).



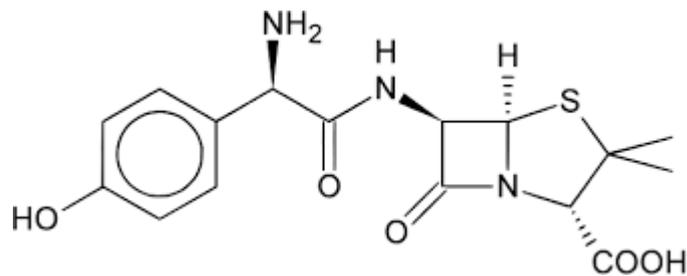
Fonte: Fapeg, 2022.

Os efeitos da presença de contaminantes no meio ambiente incluem o desenvolvimento de bactérias resistentes à maioria ou a todos os antibióticos usados atualmente, resultado da exposição aos resíduos desses medicamentos (OMS, 2014). Estudos indicam que apenas 10-20% das doses ingeridas de medicamentos são absorvidas pelo corpo; o restante é excretado no meio ambiente, muitas vezes sem tratamento adequado (Bound & Voulvoulis, 2004). Entre os medicamentos, os antibióticos são os que mais preocupam em termos ambientais. A amoxicilina é um dos antibióticos mais utilizados no Brasil e no mundo (OMS, 2018).

Amoxicilina

Os antibióticos são substâncias químicas sintéticas usadas para tratar infecções. A amoxicilina, que faz parte da classe das penicilinas, é um antimicrobiano β -lactâmico com ação bactericida, ou seja, interfere na síntese da parede celular das bactérias, impedindo seu crescimento. A estrutura da amoxicilina é mostrada na Figura 2. A amoxicilina é eficaz contra bactérias Gram-positivas aeróbias, como *Enterococcus faecalis*, *Streptococcus pneumoniae* e *Staphylococcus aureus*, e também contra bactérias Gram-negativas, como *Hemophilus influenzae*, *Escherichia coli* e *Helicobacter pylori*. Administrada por via oral, cerca de 60% a 70% da amoxicilina é excretada inalterada na urina através do metabolismo renal. (Souza; Santos; Borges, 2019).

Figura 2: Estrutura da amoxicilina.



Fonte: Grau Farmacêutico - UFMA, 2024.

Adsorção

Existem vários métodos para remover produtos orgânicos de efluentes líquidos, e a adsorção se destaca como uma excelente alternativa. Pesquisas estão sendo desenvolvidas para produzir adsorventes alternativos de baixo custo, utilizando resíduos e materiais agrícolas ricos

em carbono e de fácil disponibilidade. O café, um material importante para a economia do Brasil, gera grandes quantidades de resíduos. O material carbonáceo remanescente desses resíduos é geralmente classificado em categorias de pouca ou nenhuma rentabilidade. Assim, os resíduos carbonáceos da cadeia produtiva do café, junto com materiais remanescentes da indústria, são potenciais para a produção de adsorventes de baixo custo (De, 2017; Stylianou, 2021).

A borra de café apresenta propriedades texturais que variam de acordo com os tratamentos térmicos e químicos aplicados. Em sua forma in natura, sua área superficial específica (BET) é relativamente baixa, em torno de $8,05 \text{ m}^2/\text{g}$, com volume total de poros de $0,008 \text{ cm}^3/\text{g}$ e diâmetro médio de poros de aproximadamente $0,56 \text{ nm}$, o que limita sua eficiência como adsorvente sem modificações adicionais (Küçükgül e Büyükaksoy, 2023). No entanto, após a carbonização, mesmo sem ativação química, a área superficial pode atingir $273,6 \text{ m}^2/\text{g}$, evidenciando um aumento significativo na capacidade de adsorção (Xavier, 2022).

Quando submetida a processos de ativação química, especialmente com agentes como o hidróxido de potássio (KOH), e sob condições controladas de temperatura e tempo, a borra de café pode apresentar uma área superficial BET que varia entre 923 e $1.420 \text{ m}^2/\text{g}$, com volume de poros de até $1,36 \text{ cm}^3/\text{g}$ e diâmetro médio de poros entre $0,926$ e $1,051 \text{ nm}$ (Franco et al., 2015). Esses valores indicam que a borra de café ativada possui características texturais altamente favoráveis para aplicações em processos de adsorção. Dessa forma, a utilização da borra de café como adsorvente representa uma alternativa promissora, econômica e sustentável para o tratamento de efluentes contaminados por fármacos como a amoxicilina, devido à sua elevada área superficial, porosidade adequada, estabilidade térmica, baixo custo e facilidade operacional quando comparada a outros métodos de tratamento.

Nos processos industriais, a adsorção pode ser feita em uma coluna de leito fixo ou leito fluidizado, geralmente operada de forma contínua. O efluente a ser tratado é passado pelo leito que contém o adsorvente a uma velocidade constante, permitindo que as partículas sólidas do material escolhido adsorvam os componentes presentes na fase fluida. É importante realizar testes rápidos em escala de bancada para entender melhor a dinâmica de adsorção do poluente e sua aplicação em escala real (De, 2017; Xavier, 2022).

A adsorção é o processo pelo qual certos sólidos capturam moléculas presentes em fluidos (líquidos ou gasosos) na sua superfície de forma espontânea. Esse fenômeno ocorre devido a forças não balanceadas na superfície do sólido, que atraem e retêm as moléculas do fluido por um tempo determinado, permitindo a separação dos componentes. O termo adsorvato se refere à substância que foi adsorvida, enquanto a remoção das moléculas da superfície do sólido é

chamada de dessorção, ou seja, a operação inversa, como mosrado na Figura 3 (De, 2017; Xavier, 2022; Stylianou,2021).

Figura 3: Esquema de operação do adsorvato e do adsorvente.



Fonte: Oliveira, 2022.

As interações na superfície adsorvente podem envolver forças de van der Waals, dipolo e interações eletrostáticas. Fatores como porosidade, superfície específica, volume específico e grupos funcionais influenciam a eficiência da adsorção. Outros aspectos como polaridade, solubilidade, acidez, basicidade, temperatura e pH também impactam o processo de adsorção (De, 2017; Xavier , 2022).

A adsorção pode ser classificada em fisissorção e quimissorção. A fisissorção envolve forças intermoleculares fracas, é reversível e pode formar várias camadas de moléculas na superfície do adsorvente. A quimissorção, por outro lado, envolve a formação de ligações químicas entre o adsorvente e o adsorvato, resultando em um processo irreversível que libera uma quantidade significativa de energia (De, 2017; Xavier , 2022; Stylianou,2021).

Borra de Café

Nos processos de adsorção, são utilizados sólidos adsorventes com estrutura porosa complexa e variados formatos e tamanhos de poros. Esses materiais são preferidos devido à sua elevada área superficial, que facilita a adsorção. Partículas menores são mais eficazes, pois permitem melhor difusão na superfície interna dos poros, enquanto partículas maiores enfrentam resistência interna. Isso significa que as moléculas adsorvidas devem ser menores que o diâmetro dos poros (Laksaci, 2023).

O primeiro passo no desenvolvimento de um processo de adsorção é encontrar um adsorvente adequado, preferencialmente com tecnologias de baixo custo e alta eficiência operacional. Esses sólidos podem ser descartados após o primeiro uso ou reutilizados após regeneração (Laksaci, 2023). Os adsorventes devem ter alta seletividade, grande área

superficial, alta capacidade de adsorção, boa capacidade de regeneração, longa vida útil e baixo custo (Zhang, 2020).

O Brasil é um dos maiores produtores de subprodutos agroindustriais, muitos dos quais são descartados sem aproveitamento. A reutilização desses subprodutos no tratamento de resíduos ambientais pode ter várias utilidades. Estudos estão sendo realizados para reaproveitar resíduos orgânicos em processos de adsorção, pois eles podem servir como adsorventes alternativos e de baixo custo (Xavier, 2022).

Como um dos maiores produtores e exportadores de café do mundo, o Brasil gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, especialmente borra de café, que é o resíduo mais abundante. Para cada tonelada de café, são produzidos aproximadamente 480 kg de borra, que pode ser usada para gerar energia em caldeiras industriais. A borra de café está sendo estudada como um excelente adsorvente para o tratamento de efluentes industriais, demonstrando resultados satisfatórios a um baixo custo (Xavier, 2022).

Os resíduos do processo de produção de café, como a borra, contêm altas concentrações de açúcares, matéria orgânica e diversos compostos orgânicos e inorgânicos, podendo ser altamente poluentes se descartados inadequadamente no meio ambiente (Quitino, 2021). A borra de café é composta majoritariamente por carboidratos, que representam cerca de 45% de sua massa seca. Entre eles estão polissacarídeos como a celulose (8–15%) e a hemicelulose (30–40%) (Mussatto et al., 2011). A hemicelulose é composta por monossacarídeos como manose (37%), galactose (32%), glicose (24%) e arabinose (7%) (Ballesteros et al., 2014).

Além dos carboidratos, a borra de café possui lignina (20–30%), proteínas (13–17%) e lipídios (7–21%) (Martinez-Saez et al., 2017). Os lipídios são compostos principalmente por ácidos graxos como linoleico, palmítico, oleico e esteárico, além dos diterpenos cafestol e kahweol (Al-Hamamre et al., 2012). A borra também apresenta compostos fenólicos, com destaque para o ácido clorogênico, e alcaloides como a cafeína, em concentrações aproximadas de 12 mg/g e 14,5 µg/g, respectivamente (Angeloni et al., 2023).

Quanto aos minerais, a borra de café contém elementos como potássio, fósforo, magnésio e cálcio, que podem ser aproveitados em processos de compostagem ou utilizados como fertilizantes orgânicos (Angeloni et al., 2023). Diante disso, a borra de café representa um subproduto rico e versátil, com potencial de valorização em diversas áreas industriais e ambientais.

4 METODOLOGIA

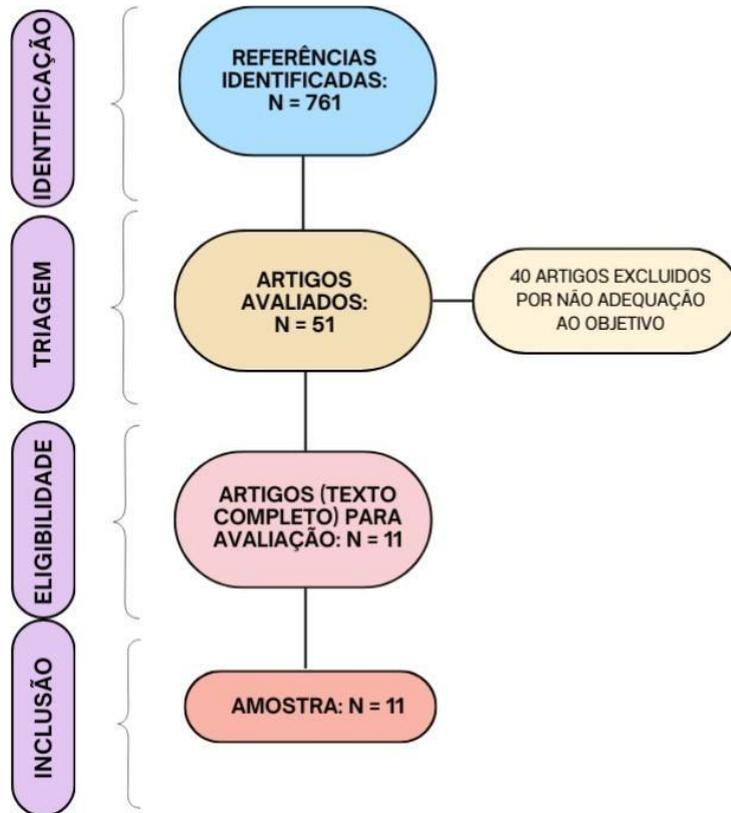
Este estudo consistiu em uma investigação descritiva que emprega a metodologia de revisão integrativa da literatura (*RI*). A *RI* é um método específico que analisa e sintetiza a literatura empírica ou teórica passada, visando oferecer uma compreensão mais completa de um fenômeno particular (Souza, 2010). Com base na importância do rigor metodológico, foram desenvolvida a *RI* para analisar a adsorção da amoxicilina na borra do café e estabelecer a remoção do resíduo da amoxicilina nas águas consumidas pela população.

Para a seleção do material de estudo, foram consultadas várias fontes de busca e pesquisa, incluindo a base de dados *Web of Science*, Portal de Periódicos CAPES, *Scielo* e Google Acadêmico, e alguns livros. A busca automática foi conduzida utilizando descritores, combinados com operador booleano AND e/ou OR para aumentar a abrangência da pesquisa.

Os critérios de inclusão (*CI*) foram estabelecidos para incluir artigos completos disponíveis, publicados entre 2019 e 2024 em português e inglês, relevantes para o tema. Os critérios de exclusão (*CE*) foram aplicados para remover dissertações, teses e publicações não pertinentes ao objeto de estudo. Artigos duplicados foram contabilizados apenas uma vez. As buscas nas bibliotecas de pesquisa foram realizadas entre janeiro e março de 2024, resultando em 761 estudos na busca automática. A Figura 4 exemplifica de forma esquemática a sequência de etapas usada na metodologia empregada para seleção da bibliografia para análise de amoxicilina em corpos de água.

Após a obtenção dos resultados, foram revisados os títulos e resumos dos artigos encontrados para verificar sua adequação às questões orientadoras. Desta forma, 51 estudos foram considerados elegíveis de acordo com os critérios de inclusão e exclusão, e seus metadados foram baixados no formato bibtex. Em seguida, os artigos selecionados foram agrupados, eliminando-se estudos duplicados. Assim, 11 estudos foram incluídos na etapa final e lidos na íntegra para avaliação de sua elegibilidade. Como resultado, a amostra final consistiu em onze estudos.

Figura 4: Resumo da sequência da metodologia empregada para seleção da bibliografia para análise de amoxicilina em corpos de água.



Fonte: Autora, 2024.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da pesquisa realizada, percebeu-se que a remoção de amoxicilina de corpos d'água através da adsorção em borra de café é eficaz em diferentes temperaturas, sendo 27 °C a mais apropriada por proporcionar maior remoção do fármaco. Esse método se mostrou economicamente viável para a remoção de amoxicilina de efluentes, pois a borra de café se mostrou porosa e com alta capacidade de adsorção (De Oliveira Coelho, 2019). O Quadro 1 apresenta alguns aspectos da viabilidade do uso de borra de café como adsorvente de amoxicilina.

A "borra de café tratada" refere-se ao resíduo de café que passou por procedimentos específicos de preparação para ser utilizado como adsorvente na remoção de contaminantes, como a amoxicilina, de efluentes aquosos. Esse tratamento geralmente envolve etapas como lavagem com água destilada para remover impurezas solúveis, secagem em estufa a temperaturas controladas (por exemplo, 50 °C por 7 horas) e peneiramento para uniformizar a granulometria do material. Essas etapas visam aumentar a eficiência da borra de café na adsorção de contaminantes, tornando-a um material mais adequado para aplicações ambientais.

Após o processo de adsorção, a borra de café pode ser caracterizada por diferentes técnicas analíticas para avaliar suas propriedades físico-químicas e estruturais. Uma das técnicas utilizadas é a difração de raios X (DRX), que permite identificar as fases cristalinas presentes no material. No caso da borra de café tratada, os difratogramas de DRX apresentam bandas largas em torno de $2\theta = 22^\circ$ e $2\theta = 35^\circ$, indicando uma estrutura micrográfica desordenada típica de materiais lignocelulósicos semi-amorfos (Quitino, 2021).

Essas bandas correspondem às reflexões da estrutura desordenada do material e corroboram com o comportamento de um material semi-amorfo, o qual não tem ordenação espacial a longa distância (em termos atômicos), como os sólidos regulares. O material não possui estrutura atômica definida, o que contribui para a sua característica mais única, nesse caso, a estrutura dos poros acessíveis. Os difratogramas apresentam os picos referentes aos planos cristalinos característicos dos materiais lignocelulósicos, entre os quais observa-se que a reflexão em 22° referente à celulose do tipo cristalina é a mais intensa ao longo da fibra, e dois picos em $15,5^\circ$ e 35° , relacionados à parte amorfa presente nas microfibrilas que consistem em hemicelulose, lignina, pectina e celulose amorfa. A celulose apresenta regiões amorfas e cristalinas. As regiões cristalinas são responsáveis pela maior resistência da molécula, visto que são definidas por interações de hidrogênio entre as microfibrilas de celulose, tornando-as menos acessíveis a ataques químicos e microbiológicos (Quitino, 2021).

Além disso, análises termogravimétricas (TG) indicam que a borra de café tratada apresenta uma perda de peso inicial em torno de 100 °C, atribuída à perda de umidade. A partir de 230 °C, observa-se uma decomposição significativa do material, com início da pirólise em torno de 350 °C. Esses dados são importantes para entender a estabilidade térmica do material e sua aplicabilidade em diferentes condições ambientais (Quitino, 2021).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) revela que a superfície da borra de café tratada é homogênea e porosa, com presença de grânulos e fibras distribuídas de forma não uniforme. Essa morfologia porosa é adequada para a adsorção de contaminantes orgânicos e metais, pois aumenta a área superficial disponível para interação com os poluentes (Quitino, 2021).

Portanto, a borra de café tratada, após o processo de adsorção, mantém características estruturais e morfológicas que a tornam eficiente na remoção de contaminantes de efluentes, sendo uma alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas residuais. Experimentos variando a quantidade de adsorvente (1g de borra de café) para diferentes concentrações de amoxicilina mostraram boa taxa de remoção, especialmente em pH 7,0, com agitação de 100 rpm, temperatura de 27°C e volume de 50 ml de meio. A adsorção foi rápida nas primeiras 8 horas, atingindo o ponto de equilíbrio. Modelagens de Freundlich, Langmuir e Redlich-Peterson indicaram que a borra de café é um bom adsorvente para a amoxicilina, com resultados satisfatórios (De Oliveira Coelho, 2019).

A borra de café utilizada neste estudo passou por um tratamento prévio antes de ser empregada como adsorvente. Esse tratamento consistiu em etapas de lavagem com água destilada para remoção de impurezas solúveis, secagem em estufa a 50 °C por 7 horas, trituração e peneiramento para uniformização da granulometria. Esses procedimentos visam aumentar a área superficial e expor grupos funcionais ativos, tornando a borra mais eficiente na adsorção de contaminantes (Quitino, 2021; Xavier, 2022). Portanto, ao longo de toda a análise, considera-se a utilização da borra de café tratada, e não in natura.

A capacidade de adsorção do carvão ativado derivado de resíduos de café (SAC – Spent coffee-derived activated carbon) para a amoxicilina foi de 370 mg/g, um desempenho comparável ou até superior ao de muitos adsorventes sintéticos e naturais utilizados para o mesmo fim. Esse resultado foi ajustado aos modelos de isoterma de Sips e Langmuir, com excelente coeficiente de determinação ($R^2 = 0,998$), indicando boa afinidade entre o adsorvente e a molécula-alvo. Além disso, o processo de adsorção foi classificado como espontâneo e exotérmico, com entalpia negativa de -11.465 kJ/mol, reforçando a viabilidade termodinâmica do uso do SAC (Quitino, 2021).

A reciclabilidade também é um fator relevante, e o SAC apresentou boa estabilidade, mantendo uma capacidade de adsorção de 250 mg/g após quatro ciclos consecutivos de adsorção-dessorção. Comparativamente, outros adsorventes como carvão ativado comercial, biochar e argilas modificadas apresentam capacidades que variam entre 100 e 300 mg/g, dependendo das condições experimentais (Gupta et al., 2020).

No presente estudo, a borra de café não é utilizada in natura, mas sim submetida a um tratamento prévio para otimizar sua capacidade adsorptiva. O processo de preparação inclui lavagem com água destilada para remoção de impurezas solúveis, secagem em estufa a 50 °C por 7 horas, trituração e peneiramento para uniformização da granulometria. Esse tratamento aumenta a área superficial do material e ativa grupos funcionais essenciais para a adsorção de contaminantes orgânicos e inorgânicos (Quitino, 2021; Xavier, 2022).

Além disso, o termo "HC" refere-se ao hidrochar, um tipo de carbono obtido por meio do processo de hidrólise térmica, enquanto "BC" se refere ao biochar, produzido por pirólise. A distinção entre BC e HC é importante, pois as propriedades físico-químicas e a eficiência de adsorção de cada um variam conforme o método de produção. O BC apresentou melhor desempenho na remoção de antibióticos do grupo das sulfonamidas, com mecanismos de interação predominantemente do tipo π - π , enquanto no HC predominaram ligações de hidrogênio (Laksaci, 2023). Esses diferentes mecanismos interferem diretamente na seletividade e capacidade de adsorção dos materiais.

Em relação ao desempenho da borra de café tratada em comparação com outros adsorventes, o carvão ativado derivado de resíduos de café (SAC) apresentou capacidade de adsorção para a amoxicilina de 370 mg/g, um valor elevado e comparável ao de adsorventes comerciais, como carvão ativado de origem mineral. O modelo de isoterma de Langmuir obteve excelente ajuste ($R^2 = 0,998$), e o processo foi classificado como espontâneo e exotérmico, com entalpia negativa (-11.465 kJ/mol) (Quitino, 2021). Após quatro ciclos de adsorção-dessorção, o SAC ainda manteve 250 mg/g de capacidade, demonstrando boa estabilidade e reciclabilidade (Xavier, 2022).

Por fim, os dados de adsorção de sulfonamidas nos diferentes tipos de carvão ajustaram-se melhor ao modelo de Langmuir, com exceção da sulfametoxazol (SMX) no BC. A cinética de adsorção, por sua vez, foi bem descrita pelo modelo de pseudo-segunda ordem, indicando que o processo depende da quantidade de sítios ativos disponíveis e da afinidade química entre adsorvato e adsorvente (Laksaci, 2023).

Quadro 1: Achados destacados da pesquisa

Aspecto	Achados	Referências
Remoção de Amoxicilina	A remoção é eficaz em diferentes temperaturas, sendo 27 °C a mais apropriada, demonstrando viabilidade econômica.	De Oliveira Coelho, 2019
Borra de Café Tratada	Não apresentou desprendimento de cor, mostrando eficiência. Análises TG indicaram perda de peso em 100 °C e decomposição em 230 °C; pirólise iniciando em 350 °C.	Quitino, 2021; Xavier, 2022
Análise de Difração de Raios X	Bandas largas em torno de $2\theta = 20^\circ$ e $2\theta = 35^\circ$ indicam estrutura micrográfica desordenada.	Quitino, 2021; Xavier, 2022
Microscopia Eletrônica de Varredura	Superfície homogênea e porosa, adequada para adsorção de contaminantes orgânicos e metais.	Quitino, 2021; Xavier, 2022
Experimentos de Adsorção	Variando 1 g de borra para diferentes concentrações de amoxicilina, boa taxa de remoção foi observada, especialmente em pH 7,0. Adsorção rápida nas primeiras 8 horas, com ponto de equilíbrio atingido.	De Oliveira Coelho, 2019
Modelos de Adsorção	Modelos de Freundlich, Langmuir e Redlich-Peterson mostraram que a borra de café é um bom adsorvente para amoxicilina, com resultados satisfatórios.	De Oliveira Coelho, 2019
Carvão Ativado Derivado de Café	Capacidade de adsorção de 370 mg/g para amoxicilina, com dados de equilíbrio ajustados pelos modelos de Sips e Langmuir ($R^2 = 0,998$). Adsorção espontânea e exotérmica (-11,465 kJ/mol); regeneração mostrou 250 mg/g após 4 ciclos.	Quitino, 2021; Xavier, 2022
Desempenho do Biochar	Biochar (BC) mais adequado que carvão ativado convencional (HC) para remoção de antibióticos sulfonamidas. Adsorção no BC predominada por interações π - π ; no HC, ligações de hidrogênio foram mais relevantes.	Laksaci, 2023; Quitino, 2021
Modelos de Adsorção do Biochar	Dados de adsorção se ajustaram melhor ao modelo de Langmuir, com cinética de adsorção descrita pelo modelo de pseudo-segunda ordem.	Laksaci, 2023; Quitino, 2021

Fonte: Autora, 2024.

Por outro lado, no carvão ativado convencional, as ligações de hidrogênio foram mais relevantes, o que pode limitar a eficiência de adsorção para certos poluentes. Os dados de adsorção se ajustaram de maneira mais precisa ao modelo de Langmuir, sugerindo que a adsorção ocorre em uma superfície homogênea com sites de adsorção equivalentes, embora para o antibiótico SMX no biochar, esse padrão não se aplicasse, indicando um comportamento complexo. Além disso, a cinética de adsorção foi bem descrita pelo modelo de pseudo-segunda ordem, reforçando a ideia de que o processo de adsorção é limitado por etapas químicas. Esses

achados não apenas ressaltam a eficácia do biochar como uma alternativa sustentável para o tratamento de águas residuais, mas também abrem novas perspectivas para a otimização de processos de adsorção em aplicações ambientais. (Laksaci, 2023; Quitino, 2021; Xavier, 2022).

6 CONCLUSÕES

A remoção de amoxicilina por adsorção em borra de café foi avaliada como eficaz em várias temperaturas, com 27 °C sendo a mais apropriada. Esse método mostrou-se economicamente viável para tratar efluentes, destacando a eficiência da borra de café, que não apresentou desprendimento de cor durante os experimentos. Análises termogravimétricas e de difração de raios X indicaram a estabilidade e a estrutura adequada da borra de café para adsorção. Experimentos demonstraram uma boa taxa de remoção de amoxicilina, especialmente em pH 7,0, com rápida adsorção nas primeiras 8 horas e modelos de isoterma (Freundlich, Langmuir e Redlich-Peterson) confirmando a eficácia da borra de café.

O carvão ativado derivado de resíduos de café demonstrou alta capacidade de adsorção (370 mg/g) e boa reciclabilidade, com o processo de adsorção sendo espontâneo e exotérmico. O biochar, por sua vez, se mostrou mais eficaz que o hidrochar na remoção de antibióticos, com interações específicas predominando em cada caso. Em relação à borra de café, é importante destacar que ela precisa passar por um tratamento prévio, como a ativação, para maximizar sua capacidade de adsorção e garantir eficiência na remoção de compostos como a amoxicilina. Portanto, tanto a borra de café tratada quanto o carvão ativado derivado de resíduos de café são alternativas promissoras e sustentáveis para a remoção de amoxicilina e outros contaminantes de efluentes.

REFERÊNCIAS

AL-HAMAMRE, Z. et al. Physical properties of spent coffee grounds. *Fuel*, v. 96, p. 70-76, 2012. DOI: <10.1016/j.fuel.2012.01.023>.

ANGELONI, S. et al. Bioactive Compounds in Spent Coffee Grounds: A Review. *Beverages*, v. 1, n. 1, 2023. DOI: <10.3390/beverages1010002>.

BALLESTEROS, L. F. et al. Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, v. 7, p. 3493-3503, 2014. DOI: <10.1007/s11947-013-1349-z>.

DE MELO, Deliane Farias et al. USO DA PENICILINA EM PACIENTES ALÉRGICOS. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 9, p. 14-24, 2023.

DE OLIVEIRA COELHO, Gisella et al. Desenvolvimento e caracterização de filmes biopoliméricos compostos majoritariamente por galactomananas recuperadas da borra de café. 2019.

DE, G. Desenvolvimento e caracterização de filmes biopoliméricos compostos majoritariamente por galactomananas recuperadas da borra de café. *Handle.net*, 2017.

FRANCO, D. S. et al. Microporous activated carbon from waste coffee grounds for CO₂ adsorption. *RSC Advances*, v. 5, p. 41636-41644, 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ra/c4ra13026j>

GUPTA, V. K. et al. A review on the removal of antibiotics from wastewater using adsorbents. *Journal of Environmental Management*, v. 260, p. 110857, 2020. DOI: <10.1016/j.jenvman.2019.110857>.

KÜÇÜKGÜL, C.; BÜYÜKAKSOY, Y. Activated carbons prepared from spent coffee grounds for adsorptive removal of pharmaceuticals. *Processes*, v. 11, n. 7, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/7/2099>.

LAKSACI, Hamza et al. Elimination of amoxicillin by adsorption on coffee waste based activated carbon. *Journal of Molecular Structure*, 2023, v. 1274, p. 134500.

MARTINEZ-SAEZ, N. et al. Spent coffee grounds in food applications: Food safety, nutritional and antioxidant properties. *Food and Chemical Toxicology*, v. 111, p. 423-431, 2017. DOI: <10.1016/j.fct.2017.11.031>.

MUSSATTO, S. I. et al. Extraction of antioxidant phenolic compounds from spent coffee grounds. *Separation and Purification Technology*, v. 83, n. 1, p. 173-179, 2011. DOI: <10.1016/j.seppur.2011.09.036>.

OLIVEIRA, Orlando Xavier de et al. Remoção de amoxicilina usando borra de café como adsorvente. 2022.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS. Antimicrobial resistance: global report on surveillance. Organização Mundial de Saúde, 2014.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS. Report on surveillance of antibiotic consumption: 2016-2018 early implementation. 2018.

QUITINO, M. Utilização de resíduos de café para remoção adsorptiva de corantes em solução aquosa. www.repositorio.ufal.br, 25 nov. 2021.

RANGEL, Eduarda Medran; RANGEL, Adrize Medran; MACHADO, Fernando Machado. Utilização de resíduos orgânicos para a produção de adsorventes. *Dataset Reports*, v. 2, n. 1, 2023.

RUTHVEN, D. M. Principles of adsorption and adsorption processes. 1. ed. John Wiley & Sons, 1984.

SILVA, V. F. DA; WOLFF, D. B.; CARISSIMI, E. Contaminação de efluentes por amoxicilina: consequências ambientais e métodos de remoção. *Brazilian Journal of Science*, v. 1, n. 2, p. 8-20, 1 fev. 2022.

SOUZA, V. P. DE; SANTOS, V. DO N.; BORGES, B. E. AVALIAÇÃO DO CONHECIMENTO DA POPULAÇÃO SOBRE O ANTIBIÓTICO AMOXICILINA. *Publicatio UEPG: Ciências Biológicas e da Saúde*, v. 25, n. 2, p. 43-54, 2019.

SOUZA, Marcela Tavares de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein (São Paulo)*, v. 8, p. 102-106, 2010.

STYLIANOU, Marinos et al. Adsorption and removal of seven antibiotic compounds present in water with the use of biochar derived from the pyrolysis of organic waste feedstocks. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9.5, p. 105868, 2021.

VICENTIN, B. M. Estudo da remoção do antibiótico amoxicilina em meio aquoso: utilização da perlita expandida e casca de pistache in natura como adsorventes. 82 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.

What is fuelling the world's antimicrobial resistance crisis? Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/what-fuelling-worlds-antimicrobial-resistance-crisis>. Acesso em: 4 maio 2025.

XAVIER, O. et al. Influence of temperature on Amoxicillin removal using coffee grounds as adsorbent. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*, v. 3, n. 4, p. 611-619, 11 out. 2022.

ZHANG, Xinbo et al. Characterization and sulfonamide antibiotics adsorption capacity of spent coffee grounds based biochar and hydrochar. *Science of the Total Environment*, v. 716, p. 137015, 2020.