

Biossorção: uma revisão sobre métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais

Biosorption: a review of promising alternative methods in wastewater treatment

Felipe Brondani Teixeira Ribas¹, William Leonardo da Silva^{1,2}

¹Curso de Engenharia Química, Universidade Franciscana, Rua Silva Jardim 1323, CEP: 97010-032, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Nanociências, Universidade Franciscana, Rua Silva Jardim 1175, CEP: 97010-491, Santa Maria, Rio Grande do Sul, , Brasil

e-mail: felipe.brondani@ufn.edu.br; w.silva@ufn.edu.br

RESUMO

Métodos convencionais de tratamento de águas residuais apresentam determinadas limitações, como a baixa remoção de poluentes orgânicos refratários, necessidade de grandes áreas de instalação e os elevados custos para implementação e operação. Assim, processos alternativos vêm sendo aplicados para o tratamento de água residuais, como a adsorção, pela sua versatilidade e a possibilidade de utilização de materiais alternativos (biossorventes). O processo de biossorção é considerado uma alternativa biotecnológica para o tratamento de águas residuais, por meio da utilização dos biossorventes, como resíduos agroindustriais. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica de caráter exploratória e qualitativa, relacionando a aplicação do processo de biossorção na remoção de contaminantes em águas residuais. Assim, a maioria das biomassas vivas e mortas demonstraram ótimos resultados na captação de poluentes em meio aquoso, sendo promissoras no tratamento de águas residuais industriais. Além disso, resíduos agroindustriais que se acumulam por não apresentarem o correto gerenciamento, também foram testados para metais pesados e em sua maioria tiveram bom desempenho de capacidade biossorbitiva. A biomassa de natureza microbiana apresentou menores valores de capacidade adsorptiva para a remoção de poluentes, já que foi necessário o controle de nutrientes e das variáveis necessárias à sobrevivência das células. É importante destacar a maior complexidade de remoção dos compostos orgânicos, visto que apresentam em suas estruturas químicas grupos funcionais específicos de natureza iônica diferente, dificultando a interação entre biossorvente e poluente orgânico. Por conseguinte, foi possível identificar a versatilidade do processo de biossorção, bem como a possibilidade de utilização de materiais alternativos.

Palavras-chave: Contaminantes. Tratamento de Águas Residuárias. Processo de Adsorção. Biossorventes.

ABSTRACT

Conventional wastewater treatment methods have certain limitations, such as the low removal of refractory organic pollutants, the need for large areas of installation, and the high costs for implementation and operation. Thus, alternative processes have been applied for the treatment of wastewater, such as adsorption, due to its versatility and the possibility of using alternative materials (biosorbents). The biosorption process is considered a biotechnological alternative for the treatment of wastewater, through the use of biosorbents, as agro-industrial waste. In this context, the present work aims to present an exploratory and qualitative bibliographic review, relating the application of the biosorption process in the removal of contaminants in wastewater. Thus, most of the living and dead biomasses showed excellent results in capturing pollutants in aqueous media, being promising in the treatment of industrial wastewater. In addition, agro-industrial waste that accumulate because they are not properly managed, have also been tested for heavy metals and have mostly performed well in terms of biosorptive capacity. Microbial biomass had lower adsorptive capacity values to pollutant removal since it was necessary to control nutrients and the variables necessary for cell survival. It is important to highlight the greater complexity of removal of the organic compounds, since they present in their chemical structures specific functional groups of different

ionic nature, making the interaction between biosorbent and organic pollutant difficult. Therefore, it was possible to identify the versatility of the biosorption process, as well as the possibility of using alternative materials.

Keywords: Contaminants. Wastewater Treatment. Adsorption Process. Biosorbents.

1. INTRODUÇÃO

As águas residuais apresentam uma diversidade de poluentes, que devem ser removidos de forma adequada, a fim de minimizar o grande impacto ambiental [1]. Em diversas indústrias, como de fertilizantes, metalúrgicas, couro e eletrólise, presencia-se muitas vezes o descarte inadequado de resíduos nos recursos hídricos contendo poluentes, de forma direta e indireta [2]. Assim, necessita-se de um tratamento efetivo, para permitir a reutilização dos recursos hídricos de forma correta e segura [3]. Dentre os principais contaminantes presentes nas águas residuais, destacam-se os íons metálicos, corantes, antibióticos e pesticidas, os quais são classificados como poluentes orgânicos persistentes (POPs) de difícil remoção, bioacumuladores e apresentam alta estabilidade química e elevada toxicidade [4-6].

Diante disso, os nanomateriais têm sido utilizados no tratamento de águas residuais, em função de suas propriedades específicas (elevada área superficial específica e alta reatividade química) e apresentam um considerável resultado em relação à qualidade da água no final do processo, embora muitas vezes apresentem um custo considerável envolvido na aplicação [7].

Os principais nanomateriais utilizados no tratamento de águas residuais são baseados em materiais estruturados de carbono, como nanotubos de carbono, grafeno e óxido de grafeno [8]. Além disso, esses materiais apresentam os efeitos de toxicidade não são completamente elucidados, com uma morfologia heterogênea que pode gerar certo grau de toxicidade para os organismos vivos e o meio ambiente [9].

Vale ainda mencionar que os principais métodos terciários de tratamento de águas residuais consistem em troca iônica, processo de separação por membrana, fotocatalise heterogênea, eletroprecipitação e processos oxidativos avançados (POAs) [10]. Embora eficientes, estes processos estão associados a algumas desvantagens, como a remoção incompleta do poluente, elevada geração de lodo, alta demanda de reagentes e energia, lodos residuais com metais precipitados e incrustação de membranas [11].

Dessa forma, os biossorbentes apresentam uma excelente alternativa na remoção de contaminantes presentes na água em grandes ou mínimas concentrações, pois oferecem alta eficiência, baixo custo operacional e a possibilidade de reutilização de materiais [12, 13]. A preparação de um biossorbente caracteriza-se pela fonte precursora de biomassa residual, podendo ser matéria viva ou inativa [14]. No caso da biomassa inativa, os poluentes orgânicos ligam-se passivamente por meio de cargas iônicas à biomassa, enquanto na biomassa viva o processo apresenta maior complexidade [15]. Os biossorbentes de origem microbiológica (biomassa viva) atuam em um processo de bioacumulação, o qual é ativo e mediado pelo metabolismo do microrganismo presente, acontecendo o acúmulo de poluentes no interior das células vivas [16].

Assim, a biossorção caracteriza-se por ser um processo de remoção de poluentes orgânicos, utilizando um material biológico (biossorbente), por meio da adesão dos poluentes na superfície da biomassa, seja por interações físicas e/ou reações químicas [17]. Além disso, é um processo rápido, podendo ser irreversível ou reversível, conforme a interação poluente/biossorbente, existindo a possibilidade de recuperação da biomassa [1, 18]. A biomassa utilizada tem origem de diferentes fontes de obtenção, como derivada de plantas, resíduos agrícolas e industriais e biopolímeros [19].

Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sistemática integrativa sobre a aplicação de diferentes biossorbentes na remoção de poluentes orgânicos persistentes (POPs) e poluentes orgânicos emergentes (POEs) e íons metálicos, a fim de traçar um panorama da aplicação do processo de biossorção no tratamento de águas residuais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Principais poluentes de águas residuais

Os principais poluentes orgânicos presentes nos corpos d'água são os metais pesados, que se caracterizam por serem carcinogênicos e bioacumuladores nos organismos vivos, promovendo intoxicações graves, sendo denominados persistentes e emergentes [20]. Dentre os compostos orgânicos persistentes, temos os pesticidas, inseticidas, organoclorados, herbicidas e bifenilos policlorados [21]. Enquanto, os compostos emergentes têm origem antropogênica e são caracterizados por serem contaminante mais recentes e sem uma legislação específica, sendo oriundos tanto de origem antrópica (presentes em efluentes domésticos, industriais, hospitalares, das atividades agrícola e pecuária), quanto de ocorrência natural (como em diferentes espécies de plantas) [22]. Os antibióticos fornecem uma dificuldade de remoção do meio aquoso e estão relacionados com a possibilidade de aumento de resistência de determinadas bactérias [23].

Além disso, outra classe de compostos orgânicos são os corantes, que são produzidos em largas escalas a nível industrial e lançados no meio ambiente, causam sérios problemas aos ecossistemas existentes [24]. Além de serem tóxicos e carcinogênicos, suas pigmentações são muito fortes e, dessa forma, podem conferir uma cor intensa às águas, até mesmo em concentrações pequenas, afetando a penetração da luz solar no ambiente aquático [25]. Os corantes podem ser classificados, quando à sua estrutura química, em diversas classes como azo, antraquinonas, metalizados e sulfurosos [26].

2.2 Bioacumulação de metais e compostos orgânicos

A biomassa utilizada no tratamento de águas residuais pode ser composta por seres microbiológicos vivos, culminando na bioacumulação, em que acontece o cultivo da biomassa de um microrganismo nas proximidades do metal a ser acumulado [11, 27]. Desde que a solução contenha os nutrientes necessários para o crescimento, o organismo inicia seus processos metabólicos e ativa seus sistemas de transporte para o acúmulo do poluente de interesse em seu interior [28].

O processo ocorre em duas etapas: a primeira etapa é a adsorção do metal em direção às células, que é feita de maneira rápida e acompanhada pelos mecanismos de interação eletrostática, troca iônica, complexação de superfície, processo redox e precipitação, enquanto que a segunda etapa acontece de uma forma irreversível e lenta que inclui o transporte dos metais no interior das células por transporte ativo [29, 30], conforme o metabolismo celular [31]. Os íons metálicos após entrarem no interior das células podem ser imobilizados em uma organela (vacúolo) ou se ligarem internamente a compostos intracelulares, como os polissacarídeos [32]. Além disso, as células podem transformar os metais adsorvidos em espécies com menor toxicidade ou expulsá-los para fora de seus interiores pelo sistema de efluxo [33].

A principal limitação da tecnologia envolvendo a biomassa viva é que o meio nutritivo para o crescimento celular contém fontes de carbono [34]. Além disso, devem ser escolhidos microrganismos capazes de resistir à toxicidade do meio, já que há o interesse de remoção da maior quantidade de metais possível [35].

A Figura 1 ilustra a diferença entre os processos de bioacumulação e de bioissorção. Já a Figura 2, esquematiza uma célula viva com os principais mecanismos que promovem a entrada de íons metálicos na célula viva, bem como interações que acompanham o processo de bioissorção na superfície celular.

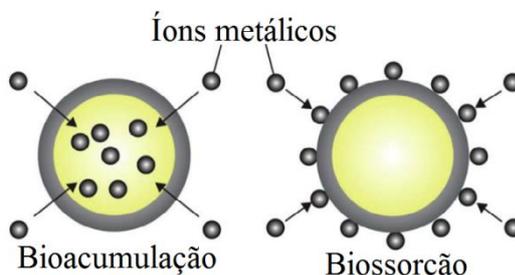


Figura 1: Comparação entre os processos de bioacumulação e bioissorção [Adaptado de [29]]

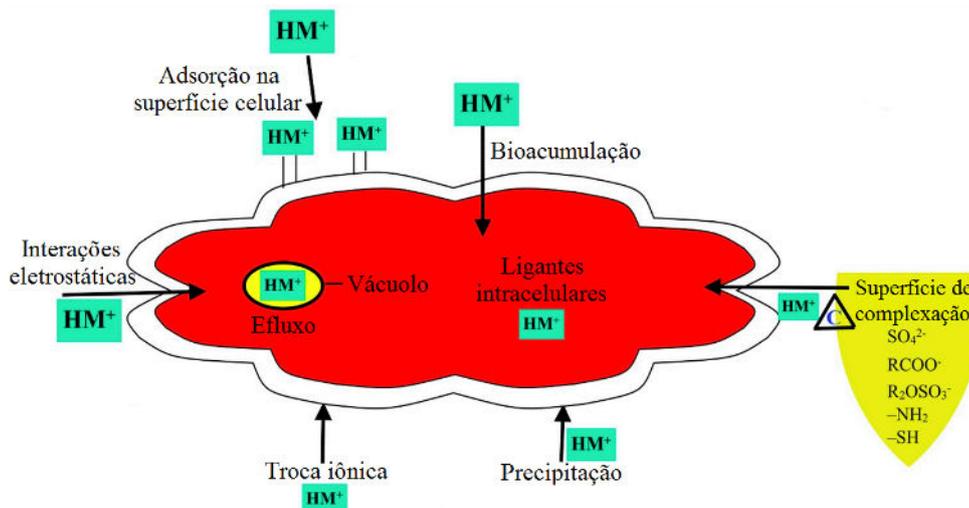


Figura 2: Mecanismos de captura de metais pesados por microrganismos [Adaptado de [20]]

Conforme a Figura 2, a parede celular dos microrganismos atua como um complexo trocador de íons, em virtude das características aniônicas e dos grupos funcionais presentes, como a carboxila, o grupo amino, sulfato e fosfato, que serão responsáveis pela captação de cátions metálicos adsorvidos, promovendo uma série de interações eletrostáticas e outros processos (troca iônica, precipitação, bioacumulação) [20].

2.3 Biossorção e dessorção de metais e compostos orgânicos

A utilização de biomassa residual como biossorvente vem sendo estudada como potencial alternativa para o tratamento de águas residuais com metais e poluentes orgânicos, em virtude da possibilidade de promover um valor agregado para esse resíduo, além do baixo custo e boa capacidade de remoção [36]. As vantagens do processo são a operação simples, sem a necessidade de inserção de nutrientes ao meio e possibilidade de regeneração do biossorvente [37-39]. Dessa forma, vários métodos vêm sendo desenvolvidos baseados na biossorção demonstrando uma efetividade nos resultados, um processo economicamente viável e uma aceitabilidade ambiental [40-43].

As características desejadas em um biossorvente estão relacionadas com a capacidade de retenção dos poluentes [44], principalmente relacionado com alta seletividade por metais e/ou compostos orgânicos, além da sua disponibilidade em grandes quantidades.

Além disso, os compostos orgânicos estão presentes principalmente em corantes sintéticos, antibióticos, pesticidas e herbicidas e causam sérios problemas em ecossistemas até mesmo em pequenas concentrações [45, 46]. Entretanto, técnicas físico-químicas de tratamento de águas residuais não são tão efetivas e geram um custo mais elevado e problemas ambientais adicionais [47]. Dessa forma, estudos vêm sendo realizados aplicando a biossorção como uma alternativa viável por meio de sistemas nanoestruturados, a fim de promover uma maior remoção dos poluentes orgânicos [48-51].

A Figura 3 mostra o funcionamento geral do processo de adsorção do poluente pela biomassa e posterior remoção do poluente da biomassa saturada.

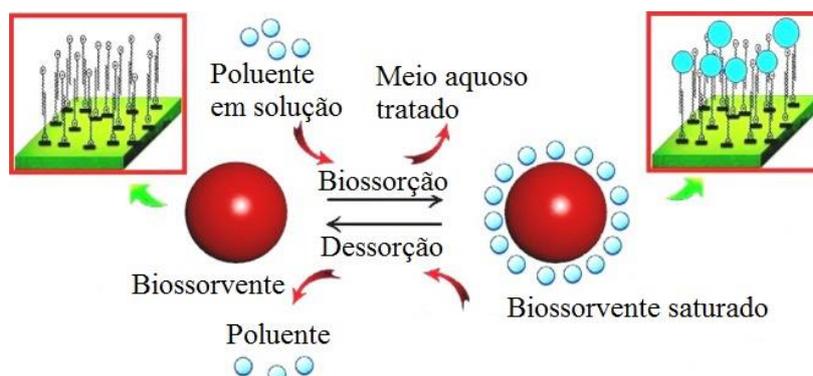


Figura 3: Esquemática do funcionamento do processo de biossorção e dessorção [Adaptado de [52]]

Em alguns casos, como na biossorção de ouro [53, 54], platina [55] e paládio [55, 56], após a ocorrência da captação do poluente pelo biossorvente, tem-se o interesse na recuperação do poluente e regeneração da capacidade do biossorvente de desempenhar sua função [19]. O processo de dessorção deve proporcionar a retirada do poluente, de qualquer natureza, na forma concentrada para poluentes com valor agregado, sendo necessária a utilização de um eluente que possua as seguintes características [57, 58]:

- baixo custo;
- ambientalmente aceitável;
- **seletivo com a biomassa (biossorvente)**;
- garantir capacidade intacta de ligação ao poluente.

2.4 Fatores que alteram a eficiência do processo biossortivo

Para a obtenção do melhor desempenho e capacidade máxima de adsorção, deve-se controlar diversos fatores que interferem na interação da superfície da biomassa com o poluente [59]. A Tabela 1 mostra as principais variáveis de interesse que devem ser controladas para otimização do processo de biossorção.

Tabela 1: Principais fatores a serem observados na captação de poluentes pelas biomassas e suas considerações.

Fatores	Considerações
pH	<ul style="list-style-type: none">• Valores de pH maiores promovem a formação de hidróxidos de metais, aumentando a carga superficial negativa, limitando a aplicabilidade;• Determinação do ponto de carga zero da biomassa para obtenção do valor de pH ótimo;• Valores de pH menores do que a carga pontual da biomassa promovem o aumento de cargas positivas em sua superfície;• Valores de pH maiores do que a carga pontual da biomassa promovem o aumento de cargas negativas em sua superfície;• Verificação dos pKas dos grupos funcionais presentes em compostos orgânicos para leitura da protonação e cargas presentes.
Concentração inicial de poluente	<ul style="list-style-type: none">• Resistência de transferência de massa deve ser superada pela concentração inicial do metal;• Capacidade de bioissorção aumenta com o aumento da concentração de poluentes até atingir um valor de saturação;• Capacidade de remoção diminui com o aumento da concentração de poluentes pela diminuição de sítios ativos disponíveis na superfície da biomassa.
Quantidade inicial de bioissorvente	<ul style="list-style-type: none">• Em concentrações baixas do bioissorvente, a quantidade de metal adsorvido por unidade de peso é alta;• Em concentrações altas a quantidade de metal adsorvido por unidade de peso é baixa;• A menor proporção de adsorbato para sítio de interação faz com que fiquem desocupados alguns espaços na superfície da biomassa.
Temperatura	<ul style="list-style-type: none">• A efetividade da adsorção geralmente aumenta com o aumento da temperatura;• Porém existem estudos com compostos orgânicos em que se observa o comportamento oposto.
Tempo de contato	<ul style="list-style-type: none">• Cada tipo de bioissorvente e de poluente, nas combinações possíveis, possui um tempo requerido de máxima adsorção;• A taxa de bioissorção é alta na primeira hora devido à presença de vacâncias na superfície da biomassa, porém começa a diminuir com o aumento da porcentagem de saturação por poluentes remanescentes na solução.
Velocidade de agitação	<ul style="list-style-type: none">• Um aumento da velocidade de agitação garante uma menor resistência à transferência de massa, aumentando a capacidade de bioissorção;• Uma velocidade moderada garante uma melhor homogeneidade para a suspensão com uma alta capacidade de bioissorção, evitando danificações da biomassa;• Altas velocidades aplicadas provocam o fenômeno do vórtice, que resulta na perda de homogeneidade da suspensão e na diminuição do tempo de interação entre o bioissorvente e o poluente, diminuindo a eficiência do processo.
Superfície disponível da biomassa	<ul style="list-style-type: none">• Modificações na biomassa são feitas com tratamentos físicos ou químicos para adição de grupos funcionais nas suas superfícies e obtenção de resultados diferentes;• O excesso de bioissorventes postos em solução pode provocar o aglomerado de partículas e diminuição da capacidade bioissorvente.

Fonte: Adaptado de [1, 11, 27]

2.5 Bioissorventes imobilizados

A biomassa imobilizada é utilizada com o intuito de melhorar o desempenho na adsorção de poluentes a nível industrial e quando se analisa a biomassa viva, a liberdade de células em um processo de bioissorção que opera de modo contínuo apresenta algumas desvantagens, como dificuldade de separação da fase sólida e líquida, perda de bioissorvente após regeneração e menor eficácia [60, 61]. Além disso, outra vantagem observada é facilitação da coleta da biomassa e aumento da tolerância das células a fatores desfavoráveis, como acidez, temperaturas elevadas [62-64].

Existem algumas técnicas que são aplicadas na imobilização de bioissorventes no meio aquoso e envolvem métodos físicos e químicos [65]. A Tabela 2 mostra os principais métodos utilizados na imobilização

de microrganismos em meio aquoso para posterior aplicação na remoção de poluentes.

Tabela 2: Exemplos de técnicas utilizadas na imobilização de biomassas com atividade microbiológica.

Método	Considerações	Ilustração
Adsorção	<ul style="list-style-type: none">• Método mais simples de imobilização;• Interação física;• Reversível e pode acarretar no escape da biomassa durante a operação pela fraqueza das interações.	
Ligação covalente	<ul style="list-style-type: none">• Formação de ligações covalentes;• Aumento da estabilidade do microrganismo durante o processo;• Associada à toxicidade pela utilização de reagentes químicos;• Acarreta a rápida diminuição da atividade microbial pós-operacional.	
Ligação cruzada	<ul style="list-style-type: none">• Macromoléculas de origem biológica ligadas entre si com ligações covalentes;• Utilização de reagentes multifuncionais, como glutaraldeído e bisdiazobenzidina;• Método simples, porém de difícil controle.	
Encapsulamento	<ul style="list-style-type: none">• Encapsulamento de microrganismos em um gel polimérico, que pode ser sintético ou natural;• Aprisionamento do microrganismo em polímeros;• Limitação de difusão.	
Aprisionamento em uma matriz	<ul style="list-style-type: none">• O aprisionamento acontece em uma matriz porosa polimérica sintética ou natural;• Os polímeros naturais apresentam maiores taxas de difusão e são ambientalmente aceitos;• Os sintéticos apresentam maior estabilidade;• Limitação de transferência mássica;• O suporte carreador deve possuir uma estrutura porosa, baixo peso, não ser biodegradável nas condições do teste, atóxico, não ter inibição e permitir a transferência mássica;• A matriz deve ter uma superfície irregular e propícia à colonização e resistência biológica, química e física.	

2.6 Modelos de adsorção

Os modelos usados na biossorção tentam descrever e modelar a cinética ocorrida no processo, tendo como função a compreensão dos mecanismos e etapas limitantes relacionadas à biossorção [71]. A quantificação do desempenho do biossorvente é realizada por meio das isotermas, por meio do equilíbrio entre os sítios ativos do biossorvente e a concentração do poluente (adsorvato) [72].

A Tabela 3 mostra alguns modelos cinéticos e considerações utilizados na adsorção de poluentes em meio aquoso e a Tabela 4 as isotermas mais comumente utilizadas, bem como suas equações e descrições.

Tabela 3: Principais modelos cinéticos de adsorção relacionando tempo e a capacidade de adsorção.

Modelos	Descrições	Equações
Pseudo primeira ordem	<ul style="list-style-type: none"> A taxa de reação depende de apenas de um dos reagentes presentes no sistema sólido-líquido; Há a dependência completa da capacidade adsorção dos sólidos; 	$\frac{dq_t}{dt} = k_1 \cdot (q_e - q_t)$ <ul style="list-style-type: none"> Em que k_1 é a constante cinética de primeira ordem, q_t a concentração do adsorvato em um tempo t e q_e a concentração do adsorvato no equilíbrio.
Pseudo segunda ordem	<ul style="list-style-type: none"> A adsorção química é assumida como etapa limitante da taxa. 	$\frac{dq_t}{dt} = k_2 \cdot (q_e - q_t)^2$ <ul style="list-style-type: none"> Em que k_2 é a constante cinética de taxa de segunda ordem, q_t a concentração do adsorvato em um tempo t e q_e a concentração do adsorvato no equilíbrio.
Elovich	<ul style="list-style-type: none"> Baseia-se na cinética de segunda ordem, assumindo que a superfície sólida tem energia heterogênea. 	$\frac{dq}{dt} = a e^{-\alpha q}$ <ul style="list-style-type: none"> Em q é a capacidade de adsorção do adsorvato no tempo t, a é a constante de adsorção, α é a taxa inicial de adsorção.

Fonte: Adaptado de [73-75]

Tabela 4: Principais modelos de isotermas para o estudo de equilíbrio de adsorção.

Isotermas de adsorção	Descrições	Equações
Langmuir	<ul style="list-style-type: none"> O modelo de Langmuir descreve a sorção em monocamada em sítios de adsorção localizados distintos. Indica que não há transmigração do adsorbato no plano das superfícies e assume energias de maneira uniforme de sorção de monocamada na superfície do adsorvente. 	$\frac{C_e}{C_{ads}} = \frac{1}{Q_b} + \frac{C_e}{Q}$ <ul style="list-style-type: none"> Em que C_e é a concentração de equilíbrio do adsorvato, C_{ads} é a quantidade de adsorvato sorvido em equilíbrio, b é a constante de sorção a uma determinada temperatura, relacionada à energia de sorção e Q é a capacidade máxima de sorção.
Freundlich.	<ul style="list-style-type: none"> A isoterma de Freundlich é utilizada para descrever processos de adsorção que ocorrem em sistemas com superfícies heterogêneas e sítios ativos com diferentes energias baseadas na adsorção de multicamadas e equilíbrio. 	$\ln Q = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$ <ul style="list-style-type: none"> Em que K_f é a constante de isoterma de Freundlich, n é a intensidade de adsorção, C_e é o equilíbrio concentração de adsorbato e Q é a quantidade de adsorvato sorvida no equilíbrio.

Temkin	<ul style="list-style-type: none"> A isoterma de adsorção de Temkin contém um fator que considera a interação entre adsorbatos. O modelo assume que o calor de adsorção de todas as moléculas na camada irá diminuir linearmente em vez de logaritmicamente com cobertura em concentrações médias. 	$q_e = B \cdot \ln A_T + B \cdot \ln C_e$ $B = \frac{R}{B_T}$ <ul style="list-style-type: none"> Em que A_T é a constante de ligação de equilíbrio da isotérmica Temkin, B_T é a isoterma Temkin constante, R é a constante universal do gás, T é a temperatura de 298 K e B é a constante relacionada ao calor de sorção.
Dubinin – Radushkevich (D-R)	<ul style="list-style-type: none"> A isoterma de adsorção de Dubinin-Radushkevich é usada para descrever o mecanismo de adsorção com uma distribuição de energia gaussiana em uma superfície heterogênea, não assumindo a superfície como homogênea ou potencial de sorção constante e auxiliando na determinação da energia aparente de adsorção. 	$\ln q_e = \ln q_s - \beta \cdot \varepsilon^2$ <ul style="list-style-type: none"> Em que q_e é a quantidade de poluente adsorvido em equilíbrio, q_s é a teórica capacidade de saturação e β é a constante isotérmica de Dubinin-Radushkevich.

Fonte: Adaptado de [76-79]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão bibliográfica sobre os bio sorventes utilizados no tratamento de poluentes em águas residuais foi realizada de acordo com artigos e capítulos de livros recentes, as quais foram verificadas nas bases de dados científicas e de Engenharia, como o Ei Compendex, o Science Direct e o Scopus, juntamente com as recomendações de autores. A metodologia apresentada no estudo é uma pesquisa sistemática integrativa, em que foram apresentados materiais bio sorventes, principais poluentes de águas residuais, mecanismos da bio sorção e os principais efeitos que influenciam na bio sorção, de forma geral. Pela pesquisa realizada, publicações foram selecionadas e dispostas em tabelas. Cada subgrupo de bio sorventes foi apresentado em determinada tabela e então os dados obtidos mais importantes dessas pesquisas foram descritos e discutidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Bio sorção para remoção de íons metálicos com microrganismos vivos

A Tabela 5 apresenta uma série de estudos com a utilização de biomassa com microrganismos vivos em meio aquoso, pelo processo de bio sorção no tratamento de águas residuais com a presença de íons metálicos que apresentaram diferentes porcentagens de captura dos íons metálicos, bem como distintas condições do melhor rendimento possível.

Tabela 5: Principais bio sorventes utilizados no processo de remoção de metais pesados por bio sorção.

Biosorvente	Poluente	Eficiência/capacidade máxima	Metodologia usada	Referência
Substâncias secretadas de <i>Synechococcus mundulus</i> (cianobactéria)	Cromo (VI)	85,89%	Utilização de cianobactérias obtidas de um meio com microalgas, expostas à radiação gama para a secreção de substância polimérica. Dentre as condições estudadas, para a concentração de 300mg L ⁻¹ de bio sorvente e 100mg L ⁻¹ de poluente e durante um tempo de contato de 48h, a biomassa apresentou a maior remoção do íon metálico (85,89%) em virtude do maior número de grupos funcionais proteicos disponíveis na superfície do bio sorvente, favorecendo a interação entre os íons catiônicos do cromo e a superfície aniônica da biomassa.	[80]
<i>Botryosphaeria rhodina</i> (fungo)	Lantânio (III)	100%	Remoção de íons metálicos baseando-se em biomassas de fungos (liofilizado e <i>in natura</i>)	[81]

			<p>autoclavada). Ambas biomassas apresentaram melhor desempenho em pH na faixa de 5,0-7,0. A biomassa liofilizada apresentou os melhores resultados com uma quantidade inicial de lantânio (III) de 20mg L⁻¹, com uma remoção de 100% em pH = 5,0 e, 97% em pH = 7,0. Enquanto, biomassa autoclavada obteve um desempenho um pouco menor, com uma remoção de 87% (pH = 5,0) e 97% (pH = 7,0). Isso acontece, porque com o aumento do pH, o número de prótons (H⁺) diminui em solução e os íons metálicos catiônicos tem maior possibilidade de interação com os grupos funcionais negativos dos bioissorventes.</p>
<i>Pseudomonas sp.</i> (bactéria)	Cádmio (II)	92,59mg g ⁻¹	<p>Aplicação da biomassa bacteriana viva e morta na remoção do íon cádmio, avaliando o efeito do pH. Tanto para a biomassa viva, quanto para a morta o valor de pH com maior capacidade de retenção do poluente foi 7,0. Uma capacidade máxima de 92,59mg g⁻¹ e 63,29mg g⁻¹ foram obtidas, respectivamente para o bioissorvente na forma viva e morta. O estudo promissor mostrou que a biomassa viva pode ser utilizada para remoção de íons de Cd (II) com baixas concentrações de 1mg L⁻¹ a 100mg L⁻¹, contrastando com a biomassa morta que não apresenta o mesmo desempenho.</p>
Biofilme microbial (bactéria)	Mercúrio (II)	85%	<p>Utilização de um biofilme bacteriano na remoção do íon mercúrio, com maior remoção (85%) em pH = 5,5; em um tempo de contato de 120 minutos, à temperatura de 25°C, tempo de incubação de 28 dias e concentração de solução de mercúrio de 1mg L⁻¹. O aumento da quantidade de íons de mercúrio acarretou a queda de eficiência na retenção do poluente pela biomassa, pois houve uma maior ocupação dos sítios ativos que inibiu a interação do restante dos íons com a biomassa.</p>
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> (bactéria)	Urânio (VI)	179,5mg g ⁻¹	<p>Colônias da bactéria da espécie <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> foram isoladas e utilizadas na remoção do íon de urânio (50mg L⁻¹). O valor de pH encontrado como ideal foi igual a 6,0 e o tempo de contato foi de 3h. A capacidade máxima de adsorção da biomassa foi de 179,5mg g⁻¹, demonstrando um excelente desempenho na remoção de radionuclídeos em solução aquosa.</p>
<i>Providencia sp.</i> (bactéria)	Manganês (II)	291,44mg g ⁻¹	<p>Colônias de bactérias obtidas do solo da espécie <i>Providencia sp</i> foram isoladas e utilizadas na remoção do íon manganês, apresentando uma capacidade máxima de adsorção de 291,438mg g⁻¹. O excelente resultado deve-se à oxidação que ocorre na superfície da célula dos íons metálicos e da sua interação com a quantidade de grupos funcionais disponíveis e da acumulação de carbonato de manganês no interior da célula. O valor de pH ótimo encontrado foi 7,0 e a partir de 150mg L⁻¹ da solução de manganês houve a saturação do bioissorvente.</p>

Os bioissorventes vivos selecionados mostraram bons resultados no processo de remoção de metais pesados em meio aquoso. Quando comparamos a remoção de cromo (VI) envolvendo outros tipos de bioissorventes, verificamos a utilização de biomassas oriundas de outras fontes. O trabalho desenvolvido por SUTKOWY; KŁOSOWSKI [86] cultivou a alga de espécie *Pseudopediastrum boryanum* em um fotobioreator em condições ideais e recolheu a biomassa para secagem e utilização nos testes de adsorção. Neste caso, a biomassa morta não alcançou um desempenho satisfatório, alcançando 70% de eficiência de remoção e uma baixa capacidade de remoção. Os trabalhos que apresentam a maior capacidade remoção e eficiência de cromo (VI) são aqueles que envolvem materiais sintetizados em laboratório, tais como óxido de grafeno e nanotubos de carbono [87, 88], porém o ponto negativo está na incerteza dos efeitos de toxicidade aos seres vivos e de acumulação na natureza, além de não estarem disponíveis em abundância usualmente.

Uma desvantagem no uso de biossorbentes vivos são as condições ideais que devem ser mantidas para o metabolismo celular continuar em funcionamento, como visto em KALOLA; DESAI [89] e MUSA; PENG; XU [90], o que ocasiona uma preocupação na quantidade suportada de metais pesados pelos microrganismos no meio aquoso. Além disso, mesmo que não seja utilizada viva, a biomassa deve ser cultivada em condições específicas, para que se consiga obter uma quantidade razoável de matéria para os testes de adsorção. A vantagem em se utilizar a biomassa viva está relacionada ao mecanismo de bioacumulação intracelular, ausente na biomassa morta, que permite a aplicação potencial *in situ*, a diminuição da possibilidade de produção de poluição secundária e menor alteração na capacidade de adsorção com a variação de pH [90, 91].

A remoção de lantânio (III) [81] pela biomassa viva fúngica atingiu uma eficiência de remoção excelente. O bom desempenho também é visto no trabalho desenvolvido por GIESE; JORDÃO [92], em que células vivas de espécie *Bacillus subtilis* quimicamente modificadas por hidróxido de sódio atingiram eficiência semelhante na remoção do metal pesado. Tais células foram recolhidas do solo e postas em condições essenciais a nível laboratorial para o seu cultivo e posterior recolhimento para os testes de adsorção. Outro trabalho que testou a remoção do lantânio (III) foi de DA COSTA; DA SILVA; VIEIRA [93], o qual sintetizou um material contendo partículas de sericina/alginato reticuladas por poli (álcool vinílico). Este material conseguiu atingir o desempenho dos trabalhos anteriores, com uma eficiência de remoção perto de 96%. Porém, o material sintético não se encontra em abundância na natureza e é necessário um preparo experimental com etapas químicas para que se atinja a eficiente remoção. Dessa forma, tanto as utilizações da biomassa propriamente viva, englobando também o material morto recolhido do cultivo, quanto a sintetização de materiais que exigem um preparo prévio, necessitam de um tempo para que se alcance o material de interesse antes dos testes de adsorção. Assim, para a escolha do melhor material adsorvente deve-se ser levado em consideração o tempo de preparo do material, a poluição envolvida no processo, os custos de cultivo da biomassa e síntese de materiais modificados com inserção de compostos orgânicos e inorgânicos. Como visto nos trabalhos anteriores envolvendo a remoção de lantânio (III) em solução, necessita-se a comparação dos métodos para a escolha do melhor adsorvente, a qual envolve o custo benéfico e o tempo para se alcançar a alta eficiência.

O procedimento experimental apresentado para a adsorção de cádmio (II) em meio aquoso por [82] envolveu a comparação do desempenho da biomassa viva e morta com matéria bacteriana, em que para pequenas concentrações do íon metálico, a biomassa viva obteve melhor capacidade de remoção. O cultivo bacteriano durou dois dias e maior parte do metal poluente retido ficou adsorvido na parede celular com a menor quantidade bioacumulada no interior das células vivas. SALMAN *et al.* [94] utilizou a planta de espécie *Sorghum bicolor* L., a qual foi recolhida em terreno natural e caracterizada a nível laboratorial com potencial efetividade no processo de adsorção por sua alta porosidade. O material foi modificado quimicamente com a inserção de tioureia na tentativa de maximização das interações entre adsorvente e poluente. Porém o material somente alcançou uma capacidade máxima de remoção de 17,241mg g⁻¹. O contraste com o primeiro trabalho não se deve ao fato do mecanismo adicional bioacumulativo, já que apresenta uma participação pequena na capacidade máxima de remoção apresentada. A maior área superficial e grupos funcionais mais propensos a interações entre o poluente e o material adsorvente podem ser explicações para a diferença na capacidade de adsorção. Já a diferença dos resultados entre a biomassa morta e viva pode ser justificada pelo melhor ajuste dos resultados experimentais da matéria viva com o modelo de Freudlich e da matéria morta com o modelo de Langmuir. Pelo modelo de Freudlich, a adsorção acontece em multicamadas, fazendo com que fique retida uma maior quantidade de poluente na superfície celular. MAHMOUDI *et al.* [95] testou a remoção do poluente com o material sintetizado óxido de grafeno coberto por sílica, o qual utilizou no seu método de preparação o reagente com grau de toxicidade permanganato de potássio. O teste experimental apresentou o valor máximo na capacidade de remoção igual a 42mg g⁻¹, que é inferior ao do estudo apresentado na Tabela 5.

Uma alternativa para remoção de íons metálicos, é a utilização de biofilmes microbianos como uma comunidade de células aderidas em uma superfície para a remoção de mercúrio (II) [83], pois além de parte do poluente ficar aprisionado no biofilme, há a atuação do filtro geotêxtil como uma barreira extra contra a passagem dos contaminantes. A Figura 4 ilustra a esquematização da retenção de íons de mercúrio pelo biofilme microbial apoiado pelo filtro geotêxtil.

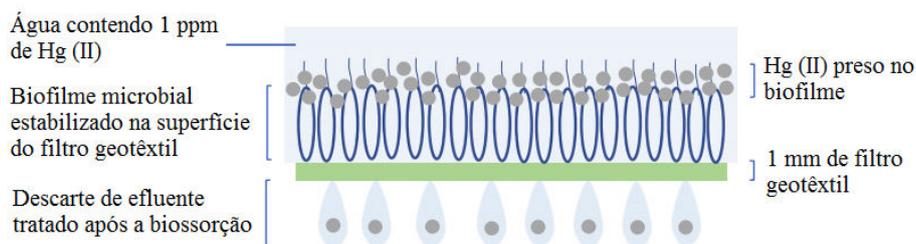


Figura 4: Processo de bioadsorção em um biofilme [Adaptado de [83]]

Biomassa oriunda do cultivo de algas também foi utilizada em testes de remoção de mercúrio (II) em solução por KUMAR; SINGH; SIKANDAR [96]. As análises previamente realizadas determinaram uma grande área superficial do material, bem como uma diversidade de grupos funcionais capazes de maximizar as interações com íon metálico. A eficiência de remoção alcançou 93% e o processo foi conduzido em batelada em livre circulação no meio aquoso, diferente do trabalho anterior que utilizou uma membrana imobilizada. A forma como a biomassa permanece localizada ao longo do experimento pode trazer dificuldades em sua aplicabilidade em corpos d’água reais ou nas indústrias, já que a captação do adsorvente/poluente livre se torna mais trabalhoso, gerando mais custo e tempo desperdiçado.

4.2 Aplicação do processo de bioadsorção para remoção de íons metálicos com resíduos agroindustriais

Muitas indústrias produzem grandes quantidades de subprodutos e resíduos que não são reaproveitados e se acumulam no meio ambiente. Dessa forma, a utilização dessas biomassas para um processo importante de captura de poluentes é promissora, contornando dois problemas existentes. O grande volume de biomassa disponível para o processo de adsorção é importante, já que pode ser utilizado no tratamento de efluentes industriais, os quais representam grandes concentrações de resíduos em meio aquoso despejados continuamente. Um exemplo em que isso acontece é nas indústrias têxteis, com o volume gerado de corantes com propriedades químicas e físicas maléficas aos organismos vivos e ao meio ambiente. A Tabela 6 mostra alguns trabalhos recentes em que foram utilizados resíduos e subprodutos oriundos de indústrias alimentícias, do processamento de madeira, da produção de bebidas alcoólicas e da agricultura, indicando uma gama significativa de resíduos agroindustriais sendo utilizados na remoção de íons metálicos em solução, independentemente de sua origem.

Tabela 6: Principais rejeitos agroindustriais usados como bioadsorventes na remoção de poluentes em águas residuais.

Bioadsorvente	Poluente	Eficiência/capacidade	Metodologia usada	Referência
Resíduo madeireiro	Cobre (II)	178,57mg g ⁻¹	Bioadsorvente oriundo da indústria madeireira foi coletado na forma de serragem. A biomassa foi submetida a três tipos de tratamentos iniciais para remoção de cores e impurezas e após, os resultados de adsorção foram comparados. O primeiro tratamento foi o de ebulição, em que foram realizadas diversas fervuras com água destilada e recolheu-se o filtrado. No segundo tratamento, foi colocado formaldeído junto à biomassa, a qual foi posteriormente lavada. Por fim no terceiro tratamento foi utilizado ácido sulfúrico, que foi eluído com água destilada após a remoção de impurezas. O pH ideal para o processo de bioadsorção encontrado foi de 5,8 para os três casos, sendo as capacidades máximas de adsorção encontradas para os íons de cobre (II) foram de 98,81mg g ⁻¹ , 178,57mg g ⁻¹ e 142,85mg g ⁻¹ , respectivamente para a biomassa tratada por ebulição, formaldeído e ácido sulfúrico.	[86]
Casca de	Cromo	30,88%	Casca de beterraba oriunda do descarte da	[87]

beterraba	(VI)		agricultura foi utilizada como biossorvente para remoção de íons de cromo (VI). O melhor desempenho do processo obtido foi realizado em pH com valores baixos, especificamente igual a 2,0. Isso se deve ao fato de o cromo estar presente em formato aniônico como $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ e HCr_2O_7^- e os grupos funcionais da biomassa estarem protonados, fazendo com que haja interação eletrostática entre o biossorvente e os ânions de cromo. A média de adsorção obtida foi de 30,88%, sendo não tão conveniente para a remoção de cromo (VI) de soluções aquosas.	
Resíduos industriais cervejeiros	Níquel (II)	49%	Resíduos industriais cervejeiros contendo fermento para testes de adsorção de níquel (II). O melhor valor de pH obtido para o melhor rendimento no processo foi 5,0. As cargas negativas dos grupos funcionais da biomassa permitiram uma aproximação de cargas com os íons catiônicos metálicos melhor neste valor de pH. Valores de pH maiores que 7,0 não foram testados pela formação de hidróxidos que inibem a interação física eletrostática. A maior eficiência obtida de 49% teve como condições uma concentração inicial de níquel de 10mg L^{-1} , uma quantidade de biomassa inicial de 4g L^{-1} e uma temperatura de 30°C .	[88]
Resíduo de uva	Prata (I)	$61,4\text{mg g}^{-1}$	O resíduo coletado da indústria de vinho foi composto por cascas, sementes e caules de uva, as quais foram testadas separadamente. O maior rendimento do processo aconteceu em um pH igual a 7,0 e para a concentração inicial de biossorvente de 3g L^{-1} . Os íons de prata (I) tiveram uma máxima adsorção de $41,7\text{mg g}^{-1}$; $61,4\text{mg g}^{-1}$; e $46,4\text{mg g}^{-1}$, respectivamente para as cascas, sementes e caules de uva.	[89]
Biomassa residual da produção de ácido poliglutâmico	Cromo (VI)	$96,38 \pm 0,45\%$	Rejeito gerado pela produção fermentativa microbiana de ácido poliglutâmico. A biomassa residual contém a bactéria de espécie <i>Bacillus subtilis</i> , a qual foi utilizada na forma imobilizada para facilitação da sua separação da solução aquosa e melhor estabilidade, controle e eficiência no decorrer do experimento. As melhores condições encontradas para a máxima eficiência no processo de adsorção foram em pH igual a 7,0, concentração inicial de cromo (VI) de 200mg L^{-1} , quantidade inicial de biomassa de 2g L^{-1} e tempo de contato de 60 minutos. O resultado obtido gerou uma expectativa grande para o tratamento de águas residuais pela alta eficiência de $96,38 \pm 0,45\%$.	[90]
Bagaço de <i>Sambucus nigra</i> (sabugueiro)	Ferro (III)	99,5%	Bagaço de <i>Sambucus nigra</i> (sabugueiro) oriundo do processamento em uma indústria de alimentos foi testado na remoção de poluente. A quantidade inicial de 50g L^{-1} utilizada de biomassa alcançou excelentes resultados na remoção de íons de ferro (III) de concentração entre 2mg L^{-1} e 22mg L^{-1} , permanecendo com uma eficiência acima de 90%. O pH escolhido esteve na faixa de 2-5. A melhor eficiência conseguida foi de 99,5% e aconteceu com uma quantidade inicial de	[91]

biossorvente de 100g L^{-1} , pH com valor igual a 2,0, concentração de íons em solução de $10,6\text{mg L}^{-1}$, sendo calculada a capacidade máxima de adsorção em $33,25\text{mg g}^{-1}$. Dessa forma, os resíduos de sabugueiros analisados demonstraram a remoção efetiva de íons de ferro (III) em solução aquosa devido à presença de agrupamentos orgânicos que beneficiam a interação biomassa/biossorvente e adequadas propriedades físicas e químicas.

Assim, existe uma gama significativa de resíduos agroindustriais sendo utilizados na remoção de íons metálicos em solução, independentemente de sua origem.

4.3 Aplicação do processo de biossorção para remoção de íons metálicos utilizando microrganismos inativos

A Tabela 7 apresenta materiais diversificados sem atividade microbiológica que foram submetidos a variações de condições iniciais em testes de remoção de íons metálicos em um meio aquoso.

Tabela 7: Exemplos de biossorventes mortos utilizados na remoção de metais em águas residuais.

Biossorvente	Poluente	Eficiência/capacidade máxima	Metodologia usada	Referência
Folhas de <i>Corchorus olitorius</i> (planta malva de juta)	Zinco (II)	65,5%	A remoção de zinco em solução foi testada com a utilização de uma biomassa de baixo custo. O melhor valor de pH encontrado para o processo foi 6,0, acima desse valor a biossorção fica bastante prejudicada pela formação de hidróxido de zinco insolúvel no meio. A concentração inicial do metal também promoveu alterações na eficiência do processo, em que valores de concentrações menores permitiram uma captação maior dos íons, já que a biomassa ainda não estava saturada. O valor com maior eficiência foi obtido com o teste de até 3mg L^{-1} , ocorrendo um decréscimo com valores superiores testados devido à indisponibilidade de sítios ativos para interações na superfície da biomassa. Em relação à quantidade inicial de biossorvente disponível, houve um aumento da eficiência adsorviva com o aumento da quantidade de biomassa colocada, alcançando um valor de estabilização em 2mg L^{-1} . Porém, ocorreu uma diminuição da capacidade de captação do zinco ocasionada pela agregação da biomassa que bloqueou os sítios ativos.	[92]
Casca de limão	Níquel (II)	$36,74\text{ mg g}^{-1}$	Três cascas de limão originadas de fontes diferentes e modificadas com hidróxido de sódio foram utilizadas na adsorção de níquel (II). A quantidade de biossorvente colocada no meio alcançou excelentes resultados até o valor limite de 5g L^{-1} , já que ultrapassando esse valor aconteceu um malefício ao processo pela aglomeração de partículas e redução de área superficial. O valor de pH escolhido foi 5,0, pois não foram detectadas diferenças significantes na faixa de 3,0-6,0, além da solução de níquel estar perto desse valor. A máxima capacidade de adsorção obtida foi testada com uma concentração de solução de	[93]

			níquel (II) de 200mg L ⁻¹ , alcançando o valor de 36,74mg g ⁻¹ .	
Casca de pomelo (laranja-natal)	Chumbo (II)	47,18mg g ⁻¹	Casca de laranja-natal foi estudada na remoção de íons de chumbo (II) em meio aquoso, obtendo o valor de pH ideal de 5,5 e um tempo de contato de 120 minutos. A capacidade máxima de adsorção testada forneceu o resultado de 47,18mg g ⁻¹ para 80mg L ⁻¹ de chumbo (II) em solução e quantidade de 0,1g L ⁻¹ de biomassa.	[94]
Casca de alho	Tungstênio (VI)	84%	Casca de alho modificada em íons de tungstênio (VI) foi utilizada para remoção de íons de ferro (III) (Fe-CA), titânio (IV) (Ti-CA) e cério (III) (Ce-CA). A faixa de pH ótima para os testes de adsorção ocorrem entre 1,0 e 3,0 para Ti-CA, 1,0 e 4,0 para Fe-CA e 3,0 para Ce-CA. As maiores capacidades adsorptivas encontradas foram de 91,5mg g ⁻¹ , 84mg g ⁻¹ e 83mg g ⁻¹ em pH com valor de 2,5; respectivamente para Fe-CA, Ce-CA e Ti-CA.	[95]
Alga marinha marrom	Cádmio (II)	0,75 mmol g ⁻¹	Alga marinha marrom <i>Sargassum filipendula</i> modificada quimicamente foi utilizada para remoção de íons de cádmio (II) em solução aconteceu em pH de 3,5 e alcançou a máxima capacidade de adsorção de 0,75mmol g ⁻¹ , em uma temperatura de 50°C para cerca de 10,5mg L ⁻¹ de metal em solução.	[96]

4.4 Aplicação do processo de biossorção para remoção de diferentes poluentes orgânicos

Os compostos orgânicos também representam uma fonte de poluentes importantes no meio ambiente e dessa forma, diversos trabalhos têm sido realizados com biomassas, que apresentam ou não atividade microbiológica, para as suas remoções do meio aquoso que estão inseridos. A captação de compostos orgânicos apresenta uma complexidade um pouco maior devido ao fato de apresentarem diversos grupos funcionais capazes de interferirem no processo biossortivo. A Tabela 8 apresenta uma lista geral de poluentes orgânicos com as respectivas biomassas que foram estudadas nas suas remoções.

Tabela 8: Exemplos de biossorbentes utilizados na remoção de compostos orgânicos em águas residuais.

Biossorbente	Poluente	Eficiência/capacidade e máxima	Metodologia usada	Referência
<i>Luffa cylindrica</i> (bucha vegetal)	Fenol	28,9mg g ⁻¹	Bucha vegetal foi transformada em pequenas fibras e uma parte delas foi colocada em contato com uma solução de nitrato de zinco (II) para avaliação do desempenho na adsorção de fenol. A quantidade de fenol adsorvido foi maior ao usar materiais híbridos sintetizados. Os valores de capacidade adsorptiva máxima encontrados foram de 15,4mg g ⁻¹ ; 28,07mg g ⁻¹ e 28,9mg g ⁻¹ para uma concentração de 30mg L ⁻¹ de fenol, respectivamente, para bucha vegetal simples, bucha vegetal com solução 4% de zinco e corrente alternada e bucha vegetal com solução de zinco 4%. A modificação da biomassa pura em 4% do Zn ²⁺ aumentou o número de locais possíveis de interações e proporcionou melhores resultados na capacidade de retenção de fenol.	[97]

Biofilme fungo-bacterial	Ácido acetilsalicílico	292,4mg g ⁻¹	Um biofilme fungo-bacterial foi suportado por dois tipos de carvão ativado, um oriundo de fibras de coco (CAC) e o outro de cascas de frutas da árvore de espécie <i>Hymenaea stigonocarpa</i> (HYAC), os quais foram denominados de CAC-b e HYAC-b após inoculação no biofilme. A composição das fibras de HYAC com o biofilme aumentou o poder de adsorção na remoção de ácido acetilsalicílico em cerca de 57,2%, enquanto que o conjunto das fibras de coco com o biofilme gerou um aumento menor de 32,4% na eficiência de adsorção. O biossorvente com maior capacidade de adsorção foi o CAC-b, alcançando um valor de 292,4mg g ⁻¹ , seguindo o modelo teórico, para o valor de pH igual a 3,5.	[98]
<i>Phaeocystis globosa</i> (microalga)	Nonilfenol	66,37%	Microalga com atividade microbiológica foi utilizada na bactéria remoção de nonilfenol em meio aquoso e alcançou, para a quantidade inicial de poluente de 1mg L ⁻¹ a capacidade de adsorção de 441,8µg L ⁻¹ durante as primeiras 24 horas, correspondendo a 43,14% de eficiência de remoção. A eficiência de remoção da microalga após cinco dias foi de 66,37% para as concentrações iniciais de nonilfenol entre 0,5mg L ⁻¹ e 2,5 mg L ⁻¹ . A faixa de pH utilizada esteve entre 6,5 e 7,0.	[99]
<i>Scenedesmus obliquus</i> (microalga verde)	Ácido salicílico e Ibuprofeno	63mg g ⁻¹ e 12mg g ⁻¹	O modelo de pseudo-segunda ordem e a isoterma de Langmuir descrevem o estudo cinético e de equilíbrio de adsorção da microalga verde. A máxima capacidade adsorptiva alcançada foi de 63mg g ⁻¹ para o ácido salicílico e 12 mg g ⁻¹ para o ibuprofeno.	[100]
<i>Moringa oleifera</i> (acácia-branca)	Diuron (herbicida e algicida)	47,44%	Cascas de frutas de acácia branca foram utilizadas na remoção do herbicida, em pH = 10,0, já que gerou cargas negativas na superfície da biomassa, além de aumentar a solubilidade do diuron e, assim, resultar em um aumento nas interações hidrofóbicas entre os funcionais disponíveis grupos na superfície do adsorvente. O valor alcançado foi de 47,44% para uma concentração inicial de diuron em solução de 5 mg L ⁻¹ .	[101]
<i>Ulva fasciata</i> e <i>Sargassum dentifolium</i> (macroalgas)	Azul de metileno	244 mg g ⁻¹	Dois espécies diferentes de algas marinhas foram utilizadas na remoção de azul de metileno em solução, as quais foram lavadas, secas e moídas em um moinho de bolas para obtenção de tamanho em escala micro. A espécie de alga <i>Ulva fasciata</i> alcançou melhores resultados removendo 97% de 328 mg L ⁻¹ de azul de metileno com uma máxima capacidade de adsorção de 244mg g ⁻¹ , já a espécie <i>Sargassum dentifolium</i> teve um desempenho um pouco pior alcançando a remoção de 85,6% de 26 mg L ⁻¹ de azul de metileno com uma capacidade máxima de adsorção de 66,6mg g ⁻¹ . O valor de pH não mostrou alteração nos resultados, então o valor igual a 7,0 como pH ótimo foi utilizado.	[102]
<i>Kappaphycus alvarezii</i> , <i>Gracilaria</i>	Rodamina B	112,35mg g ⁻¹	Na adsorção de rodamina B, três espécies de algas marinhas foram utilizadas, as quais foram lavadas, secas e moídas para	[103]

<i>salicornia</i> e <i>Gracilaria</i> <i>edulis</i> (macroalgas)			obtenção de formato em pó. Elas foram testadas em condições normais e modificadas com etanol. A capacidade máxima de bioissorção encontrada foi de 9,84mg g ⁻¹ (KA), 11,03 mg g ⁻¹ (GS), 8,96 mg g ⁻¹ (GE), 112,35 mg g ⁻¹ (EKA), 105,26 mg g ⁻¹ (EGS) e 97,08 mg g ⁻¹ (EGE), respectivamente para a remoção de RB de soluções aquosas. O melhor rendimento de remoção de rodamina B foi observado em pH com valor igual a 2,0.	
<i>Fucus vesiculosus</i> (macroalga)	Eriocromo T e azul de metileno	698,477 mg g ⁻¹ e 24,306mg g ⁻¹	A microalga <i>F. vesiculosus</i> foi utilizada na remoção dos corantes azul de metileno e eriocromo T. A biomassa apresentou uma capacidade máxima de bioissorção de 698,477 mg g ⁻¹ para azul de metileno e 24,306 mg g ⁻¹ para eriocromo T. De acordo com a cinética, o modelo de pseudo-segunda ordem foi o que se mostrou o mais bem ajustado. A otimização do modelo foi alcançada com o objetivo da maximização de eficiência na remoção dos poluentes, correspondendo a 99,28% para azul de metileno e 99,44% para eriocromo T.	[104]

5. CONCLUSÕES

Com a presente revisão bibliográfica foi possível identificar resultados promissores quanto à inovação na eliminação de poluentes em águas residuais. A tecnologia da bioissorção permite uma grande variedade de combinações possíveis para a aplicabilidade de diferentes biomassas na adsorção do contaminante de interesse. A eficiência da biomassa deve ser compensatória com o tempo necessário de bioissorção, assim como o custo envolvido, disponibilidade e possibilidade de reaproveitamento de biomassa. Dessa forma, a bioissorção mostra-se uma técnica de remoção de poluentes orgânicos promissora e alternativa às técnicas convencionais utilizadas no tratamento de águas residuais. Por conseguinte, os resultados indicam uma alta seletividades de bioissorventes para remoção de diferentes poluentes orgânicos, como íons metálicos e corantes, por meio do estudo de equilíbrio e cinética de adsorção para a compreensão do mecanismo do processo de bioissorção.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Síntese de Nanomateriais (015) da Universidade Franciscana (UFN) por seu apoio e assistência no presente trabalho. Além disso, este trabalho recebeu apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS–Project 19/2551-0001606-9).

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] SAHA, S., ZUBAIR, M., KHOSA, M. A., *et al.*. Keratin and chitosan biosorbents for wastewater treatment: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 27, n. 7, p. 1389-1403, Apr. 2019.
- [2] MAHMUD, H. N. M. E., HUQ, A. K. O., YAHYA, R. The removal of heavy metal ions from wastewater/aqueous solution using polypyrrole-based adsorbents: a review. *RSC Advances*, v. 6, n. 18, p. 14778-14791, Jan. 2016.
- [3] SÁ, A., ABREU, A. S., MOURA, I., *et al.* Polymeric materials for metal sorption from hydric resources. In: *Water Purification*. [S.l.: s.n.]. p. 289-322, 2017.
- [4] AGORO, M. A., ADENIJI, A. O., ADEFISOYE, M. A., *et al.* Heavy metals in wastewater and sewage sludge from selected municipal treatment plants in eastern cape province, South Africa. *Water*, v. 12, n. 10, p. 1-19, Oct. 2020.
- [5] YASEEN, D. A., SCHOLZ, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 16, n. 2, p. 1193-1226, Nov. 2018.
- [6] TROJANOWICZ, M. Removal of persistent organic pollutants (POPs) from waters and wastewaters by the use of ionizing radiation. *Science of The Total Environment*, v. 718, p. 1-18, May. 2020.
- [7] JIANG, M., QI, Y., LIU, H., *et al.* The role of nanomaterials and nanotechnologies in wastewater treatment: a bibliometric analysis. *Nanoscale Research Letters*, v. 13, n. 1, p. 1-13, Aug. 2018.

- [8] YU, D., XU, C. Mapping research on carbon emissions trading: a co-citation analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, p. 1314-1322, Jul. 2017.
- [9] MANIKAM, M. K., HALIM, A. A., HANAFIAH, M. M., *et al.* Removal of ammonia nitrogen, nitrate, phosphorus and COD from sewage wastewater using palm oil boiler ash composite adsorbent. *Desalination and Water Treatment*, v. 149, p. 23-30, Jan. 2019.
- [10] AZIMI, A., AZARI, A., REZAKAZEMI, M., *et al.* Removal of heavy metals from industrial wastewaters: A review. *ChemBioEng Reviews*, v. 4, n. 1, p. 37-59, Feb. 2017.
- [11] KANAMARLAPUDI, S. L. R. K., CHINTALPUDI, V. K., MUDDADA, S. Application of biosorption for removal of heavy metals from wastewater. In: *Biosorption*. [S.l.: s.n.], 2018.
- [12] SALMAN, M., ATHAR, M., FAROOQ, U. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, n. 2, p. 211-228, Feb. 2015.
- [13] SINGH, S., KUMAR, V., DATTA, S., *et al.* Current advancement and future prospect of biosorbents for bioremediation. *Science of The Total Environment*, v. 709, p. 1-24, Mar. 2020.
- [14] ALOTHMAN, Z. A., BAHKALI, A. H., KHIYAMI, M. A., *et al.* Low cost biosorbents from fungi for heavy metals removal from wastewater. *Separation Science and Technology*, v. 55, n. 10, p. 1766-1775, May. 2019.
- [15] FOMINA, M., GADD, G. M. Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, v. 160, p. 3-14, May. 2014.
- [16] CHEN, S. H., CHEOW, Y. L., NG, S. L., *et al.* Bioaccumulation and biosorption activities of indoor metal-tolerant penicillium simplicissimum for removal of toxic metals. *International Journal of Environmental Research*, v. 14, n. 2, p. 235-242, Mar. 2020.
- [17] MRVČIĆ, J., STANZER, D., ŠOLIĆ, E., *et al.* Interaction of lactic acid bacteria with metal ions: opportunities for improving food safety and quality. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 28, n. 9, p. 2771-2782, Jun. 2012.
- [18] GAVRILESCU, M. Biomass - a resource for environmental bioremediation and bioenergy. In: *Recent Developments in Bioenergy Research*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 19-63.
- [19] GIESE, E. C. Biosorption as green technology for the recovery and separation of rare earth elements. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 36, n. 4, p. 1-11, Mar. 2020.
- [20] AYANGBENRO, A., BABALOLA, O. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 14, n. 1, p. 1-16, Jan. 2017.
- [21] WAHLANG, B. Exposure to persistent organic pollutants: impact on women's health. *Reviews on Environmental Health*, v. 33, n. 4, p. 331-348, ago. 2018.
- [22] GARCÍA, J., GARCÍA-GALÁN, M. J., DAY, J. W., *et al.* A review of emerging organic contaminants (EOCs), antibiotic resistant bacteria (ARB), and antibiotic resistance genes (ARGs) in the environment: Increasing removal with wetlands and reducing environmental impacts. *Bioresource Technology*, v. 307, p. 1-10, Jul. 2020.
- [23] TUROLLA, A., CATTANEO, M., MARAZZI, F., *et al.* Antibiotic resistant bacteria in urban sewage: Role of full-scale wastewater treatment plants on environmental spreading. *Chemosphere*, v. 191, p. 761-769, jan. 2018.
- [24] LELLIS, B., FÁVARO-POLONIO, C. Z., PAMPHILE, J. A., *et al.* Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, v. 3, n. 2, p. 275-290, jul. 2019.
- [25] DONKADOKULA, N. Y., KOLA, A. K., NAZ, I., *et al.* A review on advanced physicochemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 19, n. 3, p. 543-560, jul. 2020.
- [26] ZANONI, M.V.B., YAMANAKA, H. *Corantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento*. São Paulo: Cultura acadêmica, 2016.
- [27] TORRES, E. Biosorption: A review of the latest advances. *Processes*, v. 8, n. 12, p. 1-23, dez. 2020.
- [28] MUSTAPHA, M. U., HALIMOON, N. Microorganisms and biosorption of heavy metals in the environment: A review paper. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, v. 7, n. 5, p. 253-256, 2015.
- [29] YANG, T., CHEN, M.-L., WANG, J.-H. Genetic and chemical modification of cells for selective separation and analysis of heavy metals of biological or environmental significance. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 66, p. 90-102, mar. 2015.
- [30] DERCO, J., VRANA, B. Introductory chapter: Biosorption. In: *Biosorption*. [S.l.: s.n.], 2018.
- [31] VIDYASHANKAR, S., RAVISHANKAR, G. Algae-based bioremediation. In: *Bioremediation and Bioeconomy*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 457-493.
- [32] MOGHADDAM, S. A. E., HARUN, R., MOKHTAR, M. N., *et al.* Potential of zeolite and algae in biomass immobilization. *BioMed Research International*, v. 2018, p. 1-15, dez. 2018.
- [33] IGIRI, B. E., OKODUWA, S. I. R., IDOKO, G. O., *et al.* Toxicity and bioremediation of heavy metals contaminated ecosystem from tannery wastewater: A review. *Journal of Toxicology*, v. 2018, p. 1-16, set. 2018.
- [34] WANG, X., XIA, K., YANG, X., *et al.* Growth strategy of microbes on mixed carbon sources. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 1-7, mar. 2019.
- [35] DAS, S., DASH, H. R., CHAKRABORTY, J. Genetic basis and importance of metal resistant genes in bacteria for bioremediation of contaminated environments with toxic metal pollutants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 100, n. 7, p. 2967-2984, fev. 2016.
- [36] OJIMA, Y., KOSAKO, S., KIHARA, M., *et al.* Recovering metals from aqueous solutions by biosorption onto

- phosphorylated dry baker's yeast. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1–9, jan. 2019.
- [37] ARYAL, M. A comprehensive study on the bacterial biosorption of heavy metals: materials, performances, mechanisms, and mathematical modellings. *Reviews in Chemical Engineering*, v. 0, n. 0, p. 1-40, jan. 2020.
- [38] LIU, T., HOU, J.-H., WANG, J.-B., *et al.* Biosorption of heavy metals from aqueous solution by the novel biosorbent *Pectobacterium sp.* ND2. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 37, n. 3, p. 968-974, set. 2017.
- [39] JACOB, J. M., KARTHIK, C., SARATALE, R. G., *et al.* Biological approaches to tackle heavy metal pollution: A survey of literature. *Journal of Environmental Management*, v. 217, p. 56-70, jul. 2018.
- [40] FREITAS, G. R., VIEIRA, M. G. A., SILVA, M. G. C.. Fixed bed biosorption of silver and investigation of functional groups on acidified biosorbent from algae biomass. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 36, p. 36354-36366, Nov. 2019.
- [41] WANG, N., QIU, Y., XIAO, T., *et al.* Comparative studies on pb(II) biosorption with three spongy microbe-based biosorbents: High performance, selectivity and application. *Journal of Hazardous Materials*, v. 373, p. 39-49, Jul. 2019.
- [42] CUI, D., TAN, C., DENG, H., *et al.* Biosorption mechanism of aqueous Pb²⁺, Cd²⁺, and Ni²⁺ ions on extracellular polymeric substances (EPS). *Archaea*, v. 2020, p. 1-9, jun. 2020.
- [43] DENIZ, F., ERSANLI, E. T. An effectual biosorbent substance for removal of manganese ions from aquatic environment: A promising environmental remediation study with activated coastal waste of zosteria marina plant. *BioMed Research International*, v. 2020, p. 1-8, jul. 2020.
- [44] SALMAN, M., ATHAR, M., FAROOQ, U. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, n. 2, p. 211-228, Feb. 2015.
- [45] GEORGIN, J., FRANCO, D. S. P., NETTO, M. S., *et al.* Treatment of water containing methylene by biosorption using brazilian berry seeds (*Eugenia uniflora*). *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 17, p. 20831-20843, Apr. 2020.
- [46] SUN, W., SUN, W., WANG, Y. Biosorption of direct fast scarlet 4bs from aqueous solution using the green-tide-causing marine algae *Enteromorpha prolifera*. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 223, p. 1-8, Dec. 2019.
- [47] DADA, A. O., ADEKOLA, F. A., ODEBUNMI, E. O., *et al.* Sustainable and low-cost ocimum gratissimum for biosorption of indigo carmine dye: kinetics, isotherm, and thermodynamic studies. *International Journal of Phytoremediation*, v. 22, n. 14, p. 1524-1537, Jul. 2020.
- [48] EZEKOYE, O. M., AKPOMIE, K. G., EZE, S. I., *et al.* Biosorptive interaction of alkaline modified *Dialium guineense* seed powders with ciprofloxacin in contaminated solution: central composite, kinetics, isotherm, thermodynamics, and desorption. *International Journal of Phytoremediation*, v. 22, n. 10, p. 1028-1037, Feb. 2020.
- [49] BOZORGINIA, S., JAAFARI, J., TAGHAVI, K., *et al.* Biosorption of ceftriaxone antibiotic by pseudomonas putida from aqueous solutions. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, p. 1-15, mar. 2021.
- [50] SINTAKINDI, A., ANKAMWAR, B. Fungal biosorption as an alternative for the treatment of dyes in waste waters: a review. *Environmental Technology Reviews*, v. 10, n. 1, p. 26–43, jan. 2021.
- [51] SUNSANDEE, N., RAMAKUL, P., PHATANASRI, S., *et al.* Biosorption of dicloxacillin from pharmaceutical waste water using tannin from indian almond leaf: Kinetic and equilibrium studies. *Biotechnology Reports*, v. 27, p. 1-12, set. 2020.
- [52] MEDHI, H., CHOWDHURY, P. R., BARUAH, P. D., *et al.* Kinetics of aqueous Cu(II) biosorption onto thevetia peruviana leaf powder. *ACS Omega*, v. 5, n. 23, p. 13489-13502, jun. 2020.
- [53] PÁEZ-VÉLEZ, C., RIVAS, R. E., DUSSÁN, J. Enhanced gold biosorption of lysinibacillus sphaericus CBAM5 by encapsulation of bacteria in an alginate matrix. *Metals*, v. 9, n. 8, p. 1-10, Jul. 2019.
- [54] PAN, H.-W., IIZUKA, A., SHIBATA, E. Gold recovery from dilute aqueous solution by a biosorbent derived from woody biomass. *Chemical Engineering Communications*, p. 1-14, set. 2020.
- [55] GODLEWSKA-ZYŁKIEWICZ, B., SAWICKA, S., KARPIŃSKA, J. Removal of platinum and palladium from wastewater by means of biosorption on fungi *Aspergillus sp.* and *Aaccharomyces sp.* *Water*, v. 11, n. 7, p. 1-17, jul. 2019.
- [56] TAN, L., DONG, H., LIU, X., *et al.* Mechanism of palladium(ii) biosorption by providencia vermicola. *RSC Advances*, v. 7, n. 12, p. 7060-7072, 2017.
- [57] FREITAS, G. R., SILVA, M. G. C., VIEIRA, M. G. A. Biosorption technology for removal of toxic metals: a review of commercial biosorbents and patents. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 19, p. 19097-19118, maio 2019.
- [58] BAYUO, J., ABUKARI, M. A., PELIG-BA, K. B. Desorption of chromium (VI) and lead (II) ions and regeneration of the exhausted adsorbent. *Applied Water Science*, v. 10, n. 7, p. 1-6, jun. 2020.
- [59] REDHA, A. A. Removal of heavy metals from aqueous media by biosorption. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 27, n. 1, p. 183-193, jan. 2020.
- [60] GE, N., XU, J., LI, F., *et al.* Immobilization of inactivated microbial cells on magnetic Fe₃O₄@CTS nanoparticles for constructing a new biosorbent for removal of patulin in fruit juice. *Food Control*, v. 82, p. 83-90, dez. 2017.
- [61] XIE, J., FENG, N., WANG, R., *et al.* A reusable biosorbent using ca-alginate immobilized providencia vermicola for pd(II) recovery from acidic solution. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 231, n. 2, p. 1-12, jan. 2020.
- [62] VASILIEVA, S. G., LOBAKOVA, E. S., LUKYANOV, A. A., *et al.* Immobilized microalgae in biotechnology. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, v. 71, n. 3, p. 170-176, jul. 2016
- [63] HU, M. Z., TANG, Y. N., WANG, X. Y. Immobilized microorganism technology and the application of wastewater treatment. *Advanced Materials Research*, v. 955-959, p. 383-386, jun. 2014.
- [64] VELKOVA, Z., KIROVA, G., STOYTICHEVA, M., *et al.* Immobilized microbial biosorbents for heavy metals

- removal. *Engineering in Life Sciences*, v. 18, n. 12, p. 871-881, ago. 2018.
- [65] RASHEED, A., GHOUS, T., MUMTAZ, S., *et al.* Immobilization of pseudomonas aeruginosa static biomass on eggshell powder for on-line preconcentration and determination of Cr(VI). *Open Chemistry, Walter de Gruyter GmbH*, v. 18, n. 1, p. 303-313, abr. 2020.
- [66] DAS, M., ADHOLEYA, A. Potential uses of immobilized bacteria, fungi, algae, and their aggregates for treatment of organic and inorganic pollutants in wastewater. In: ACS Symposium Series. [S.l.: s.n.], p. 319-337, 2015..
- [67] MOGHADDAM, S. A. E., HARUN, R., MOKHTAR, M. N., *et al.* Potential of zeolite and algae in biomass immobilization. *BioMed Research International*, v. 2018, p. 1-15, Dec. 2018.
- [68] GIESE, E. C., SILVA, D. D. V., COSTA, A. F. M., *et al.* Immobilized microbial nanoparticles for biosorption. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 40, n. 5, p. 653-666, abr. 2020.
- [69] LESTARI, I. Biosorption of Zn(II) metal ion by ca-alginate immobilized durian (*Durio zibethinus*) seed. *Journal of Chemical Natural Resources*, v. 1, n. 2, p. 60-68, ago. 2019.
- [70] TAN, L., DONG, H., LIU, X., *et al.* Mechanism of palladium(ii) biosorption by providencia vermicola. *RSC Advances*, v. 7, n. 12, p. 7060-7072, 2017.
- [71] NWIDI, I., AGUNWAMBA, J. Comparative analysis of some existing kinetic models with proposed models in the biosorption of three heavy metals in a flow-batch reactor using five selected micro-organisms. *Nigerian Journal of Technology*, v. 35, n. 3, p. 1-5, jul. 2016.
- [72] RANGABHASHIYAM, S., BALASUBRAMANIAN, P. Characteristics, performances, equilibrium and kinetic modeling aspects of heavy metal removal using algae. *Bioresource Technology Reports*, v. 5, p. 261-279, fev. 2019.
- [73] QIU, H., LV, L., PAN, B., *et al.* Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University-Science A*, v. 10, n. 5, p. 716-724, 2009.
- [74] BONILLA-PETRICIOLET, A., MENDOZA-CASTILLO, D.I., REYNEL-ÁVILA, H.E. Adsorption processes for water treatment and purification. In: *Springer Nature*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 19-51.
- [75] HO, Y. S. Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*, v. 136, n. 3, p. 681-689, 2006.
- [76] DOTTO, G. L., VIEIRA, M. L. G., ESQUERDO, V. M., *et al.* Equilibrium and thermodynamics of azo dyes biosorption onto Spirulina platensis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 30, p. 13-21, 2013.
- [77] WONG, Y.C., SZETO, Y.S., CHEUNG, W.H., MCKAY, G. Adsorption of acid dyes on chitosan - Equilibrium isotherm analyses. *Process Biochemistry*, v. 39, p. 693-702, 2004.
- [78] LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, v. 40, p. 1361-1403, 1918.
- [79] Freundlich, H. Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 57, p. 358-471, 1906.
- [80] HUSSEIN, M. H., HAMOUDA, R. A., ELHADARY, A. M. A., *et al.* Characterization and chromium biosorption potential of extruded polymeric substances from *Synechococcus mundulus* induced by acute dose of gamma irradiation. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 31, p. 31998-32012, Sep. 2019.
- [81] GIESE, E. C., DEKKER, R. F. H., BARBOSA-DEKKER, A. M. Biosorption of lanthanum and samarium by viable and autoclaved mycelium of *Botryosphaeria rhodina* MAMB-05. *Biotechnology Progress*, v. 35, n. 3, p. 1-8, Mar. 2019.
- [82] XU, S., XING, Y., LIU, S., *et al.* Characterization of Cd⁺² biosorption by *Pseudomonas sp.* strain 375, a novel biosorbent isolated from soil polluted with heavy metals in southern china. *Chemosphere*, v. 240, p. 1-7, Feb. 2020.
- [83] FATHOLLAHI, A., COUPE, S. J., EL-SHEIKH, A. H., *et al.* The biosorption of mercury by permeable pavement biofilms in stormwater attenuation. *Science of The Total Environment*, v. 741, p. 1-12, Nov. 2020.
- [84] LIU, L., LIU, J., LIU, X., *et al.* Kinetic and equilibrium of U(VI) biosorption onto the resistant bacterium bacillus amyloliquefaciens. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 203, p. 117-124, Jul. 2019.
- [85] LI, D., LI, R., DING, Z., *et al.* Discovery of a novel native bacterium of *Providencia sp.* with high biosorption and oxidation ability of manganese for bioleaching of heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, v. 241, p. 1-10, Feb. 2020.
- [86] RANI, S., BANSAL, M., KAUR, K., *et al.* Biosorption of copper(ii) ions using timber industry waste based biomass. *Rasayan Journal of Chemistry*, v. 12, n. 03, p. 1247-1261, Jan. 2019.
- [87] BLAGOJEV, N., KUKIĆ, D., VASIĆ, V., *et al.* A new approach for modelling and optimization of Cu(II) biosorption from aqueous solutions using sugar beet shreds in a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*, v. 363, p. 366-375, Feb. 2019.
- [88] KULKARNI, R. M., SHETTY, K. V., SRINIKETHAN, G. Kinetic and equilibrium modeling of biosorption of nickel (II) and cadmium (II) on brewery sludge. *Water Science and Technology*, v. 79, n. 5, p. 888-894, Mar. 2019.
- [89] ESCUDERO, L. B., VANNI, G., DUARTE, F. A., *et al.* Biosorption of silver from aqueous solutions using wine industry wastes. *Chemical Engineering Communications*, v. 205, n. 3, p. 325-337, Jan. 2018.
- [90] ZHANG, C., REN, H.-X., ZHONG, C.-Q., *et al.* Biosorption of Cr(VI) by immobilized waste biomass from polyglutamic acid production. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1-8, Feb. 2020.
- [91] KALAK, T., DUDCZAK-HAŁABUDA, J., TACHIBANA, Y., *et al.* Effective use of elderberry (sambucus nigra) pomace in biosorption processes of Fe(III) ions. *Chemosphere*, v. 246, p. 1-8, May. 2020.
- [92] ALI, M. M., BHAKTA, J. N. Biosorption of zinc from aqueous solution using leaves of *Corchorus olitorius* as a low-cost biosorbent. *Water Environment Research*, v. 92, n. 6, p. 821-828, Dec. 2019.
- [93] VILLEN-GUZMAN, M., GUTIERREZ-PINILLA, D., GOMEZ-LAHOZ, C., *et al.* Optimization of Ni(II) biosorption from aqueous solution on modified lemon peel. *Environmental Research*, v. 179, p. 1-23, Dec. 2019.
- [94] DINH, V.-P., XUAN, T. D., HUNG, N. Q., *et al.* Primary biosorption mechanism of lead (II) and cadmium (II) cations from aqueous solution by pomelo (*Citrus maxima*) fruit peels. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-

12, Jul. 2020.

- [95] WANG, Y., HUANG, K. Biosorption of tungstate onto garlic peel loaded with Fe(III), Ce(III), and Ti(IV). *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 27, p. 33692-33702, Jun. 2020.
- [96] NISHIKAWA, E., SILVA, M. G. C., VIEIRA, M. G. A. Cadmium biosorption by alginate extraction waste and process overview in life cycle assessment context. *Journal of Cleaner Production*, v. 178, p. 166-175, Mar. 2018.
- [97] OTHMANI, A., KESRAOUI, A., SEFFEN, M. Removal of phenol from aqueous solution by coupling alternating current with biosorption. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-16, Jul. 2020.
- [98] BÓ, L. G., ALMEIDA, R. M., CARDOSO, C. M. M., *et al.* Acetylsalicylic acid biosorption onto fungal-bacterial biofilm supported on activated carbons: an investigation via batch and fixed-bed experiments. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 28, p. 28962-28976, Aug. 2019.
- [99] WANG, L., XIAO, H., HE, N., *et al.* Biosorption and biodegradation of the environmental hormone nonylphenol by four marine microalgae. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1-11, Mar. 2019.
- [100] SILVA, A., COIMBRA, R. N., ESCAPA, C., *et al.* Green microalgae *Scenedesmus obliquus* utilization for the adsorptive removal of nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) from water samples. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 10, p. 1-24, May. 2020.
- [101] WERNKE, G., FAGUNDES-KLEN, M. R., VIEIRA, M. F., *et al.* Mathematical modelling applied to the rate-limiting mass transfer step determination of a herbicide biosorption onto fixed-bed columns. *Environmental Technology*, v. 41, n. 5, p. 638-648, Aug. 2018.
- [102] MOGHAZY, R. M., LABENA, A., HUSIEN, S. Eco-friendly complementary biosorption process of methylene blue using micro-sized dried biosorbents of two macro-algal species (*Ulva fasciata* and *Sargassum dentifolium*): Full factorial design, equilibrium, and kinetic studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 134, p. 330-343, Aug. 2019.
- [103] SELVAKUMAR, A., RANGABHASHIYAM, S. Biosorption of rhodamine b onto novel biosorbents from *Kappaphycus alvarezii*, *Gracilaria salicornia* and *Gracilaria edulis*. *Environmental Pollution*, v. 255, p. 1-12, Dec. 2019.
- [104] LEBRON, Y. A. R., MOREIRA, V. R., SANTOS, L. V. S. Biosorption of methylene blue and eriochrome black t onto the brown macroalgae *Fucus vesiculosus*: equilibrium, kinetics, thermodynamics and optimization. *Environmental Technology*, v. 42, n. 2, p. 279-297, Jun. 2019.

ORCID

Felipe Brondani Teixeira Ribas

<https://orcid.org/0000-0001-7480-7657>

William Leonardo da Silva

<https://orcid.org/0000-0002-7804-9678>