

**REMOÇÃO DE MANGANÊS DISSOLVIDO DE ÁGUAS DE MINA UTILIZANDO MICROALGAS:
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*****MANGANESE REMOVAL FROM MINE-INFLUENCED WATERS BY MICROALGAE: A
COMPREHENSIVE LITERATURE REVIEW******ELIMINACIÓN DEL MANGANESO DISUELTO DE LAS AGUAS DE MINA MEDIANTE
MICROALGAS: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA***José Lázaro Tchivela Calueio¹, Versiane Albis Leão²

e747693

<https://doi.org/10.47820/recima21.v7i4.7693>

PUBLICADO: 04.2026

RESUMO

O manganês é um metal com várias aplicações industriais, tendo papel biológico importante. Sua presença em concentrações elevadas está associada a uma série de impactos à saúde humana (como letargia e deficiências neurológicas) e ao meio ambiente. Métodos químicos de remoção, como coagulação/floculação e troca iônica, têm sido utilizados para a remoção de manganês de águas e efluentes, mas apresentam limitações quanto à eficiência, custo e geração de resíduos. Nesse contexto, a utilização de soluções baseadas na natureza (SBN) tem ganhado destaque e, no caso da remoção de manganês, a utilização de microalgas emerge como uma alternativa promissora, destacando-se por ser uma tecnologia de fácil implementação, com baixa geração de resíduos e ampla disponibilidade em diversas regiões. O presente trabalho revisa recentes pesquisas sobre a aplicação de microalgas no tratamento de águas e efluentes contendo íons Mn^{2+} . A revisão evidencia a capacidade de diversas microalgas de remover o íon, principalmente por meio de mecanismos de biossorção e precipitação. A biossorção refere-se à capacidade das microalgas vivas de reterem o íon Mn^{2+} em sua matriz celular, enquanto a precipitação, frequentemente induzida pela elevação do pH resultante da atividade fotossintética (absorção de $CO_2(aq)$), favorece a remoção do metal no meio externo. A análise da literatura indica que a maior parte dos trabalhos se refere a estudos realizados em condições laboratoriais (bancada), o que evidencia a necessidade de mais investigações para a transição dessas tecnologias para aplicações de maior escala e complexidade.

PALAVRAS-CHAVE: Algas. Microalgas. Remoção de manganês. Efluentes líquidos. Água de mina. Precipitação. Biossorção.

¹ Docente do Departamento de Biologia da Faculdade de Ciências Naturais (FCN), Universidade do Namibe (UNINBE); Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

² Professor Doutor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

**ABSTRACT**

Manganese is a metal with several industrial applications, having an important biological role. Therefore, its presence in high concentrations is associated with a series of impacts on human health (such as lethargy and neurological disabilities) and the environment. Chemical removal methods, such as coagulation/flocculation and ion exchange, have been used to remove manganese from water and effluents, but have limitations in terms of efficiency, cost and waste generation. In this context, the use of nature-based solutions (NBS) has gained prominence and in the case of manganese removal, the use of microalgae emerges as a promising alternative, standing out for being an easy-to-implement technology, with low waste generation and wide availability in several regions. This work reviews recent research on the application of microalgae in the treatment of water and effluents containing Mn^{2+} ions. The review shows the ability of several microalgae to remove the ion, mainly through biosorption and precipitation mechanisms. Biosorption refers to the ability of live microalgae to retain the Mn^{2+} ion in their cell matrix, while precipitation, often induced by pH elevation resulting from photosynthetic activity ($CO_2(aq)$ absorption), favors the removal of the metal in the external environment. The analysis of the literature indicates that most of the work refers to studies carried out in laboratory conditions (bench), identifying the need for more investigations for the transition of these technologies to applications of greater scale and complexity.

KEYWORDS: *Algae; Microalgae; Manganese removal; Wastewater; Mine water; Precipitation; Biosorption.*

RESUMEN

El manganeso es un metal con múltiples aplicaciones industriales y un papel biológico importante; sin embargo, su presencia en altas concentraciones se asocia con diversos impactos en la salud humana, como letargo y deficiencias neurológicas, así como efectos ambientales. Los métodos químicos de eliminación, como coagulación/floculación e intercambio iónico, se han utilizado para remover manganeso de aguas y efluentes, pero presentan limitaciones en eficiencia, costo y generación de residuos. En este contexto, el uso de soluciones basadas en la naturaleza (SBN) ha ganado relevancia, y el empleo de microalgas surge como una alternativa prometedora debido a su fácil implementación, baja generación de residuos y amplia disponibilidad. Este trabajo revisa investigaciones recientes sobre la aplicación de microalgas en el tratamiento de aguas y efluentes con iones Mn^{2+} , evidenciando la capacidad de diversas especies para remover el ión principalmente mediante biosorción y precipitación. La biosorción consiste en la retención de Mn^{2+} en la matriz celular de microalgas vivas, mientras que la precipitación, frecuentemente inducida por el aumento del pH derivado de la actividad fotosintética (absorción de $CO_2(aq)$), favorece la eliminación del metal en el medio externo. La revisión de la literatura indica que la mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, lo que subraya la necesidad de más investigaciones para la transición de estas tecnologías hacia aplicaciones a mayor escala y mayor complejidad.

PALABRAS-CLAVE: *Microalgas. Eliminación de manganeso. Efluentes líquidos. Aguas de mina. Precipitación. Biosorción.*



INTRODUÇÃO

O manganês é um elemento químico pertencente aos grupos dos metais de transição. Faz parte dos quatro metais com maior uso no mundo, que incluem ferro, cobre e alumínio (Afonso, 2019). Apresenta aplicações nas indústrias siderúrgicas, como item de fabricação de diferentes tipos de aços, baterias portáteis ou latas de alumínio para bebidas, coloração de tijolos e telhas (IMnI, 2025). Também exerce um papel importante em todos os organismos, animais e vegetais, sendo a forma biologicamente utilizável o íon Mn^{2+} . Nos vegetais, é constituinte das enzimas fosfotransferases (que atuam no crescimento das plantas) e no processo de fotossíntese (etapa de foto-oxidação da água, com liberação de O_2 pelos cloroplastos). Em humanos, é o terceiro metal de transição mais importante na dieta (após ferro e zinco). Está presente em compostos associados aos processos de coagulação sanguínea, de tratamento de ferimentos, de absorção de vitaminas e da produção de cartilagem nos ossos (IMnI, 2025).

Embora o manganês seja um importante micronutriente em sistemas biológicos, a sua presença em elevadas concentrações tem efeitos deletérios para a saúde humana e o meio ambiente. A presença desse elemento na água pode ter impacto na saúde humana, como o aparecimento de letargias, tremores, deficiências neurológicas, transtornos comportamentais e manganismo, além de afetar outros organismos vivos (IMnI, 2025; USEPA, 2024). Níveis elevados de manganês na água se devem ao fato de que efluentes de diversas indústrias (como mineração, fundição, produção de combustíveis ou energia, entre outras) são descartados no meio ambiente. Portanto, é necessário tratar os efluentes que contêm íons de manganês, antes de seu descarte no meio ambiente (Martini e Roni, 2021; Mishra *et al.*, 2021).

Várias tecnologias, como precipitação/coagulação/floculação, filtração, flotação, eletrorremediação, separação por membranas, evaporação, adsorção em carvão ativado e resinas de troca iônica, vêm sendo estudadas para o tratamento de águas e efluentes contaminados por manganês (Kerur *et al.*, 2020; Qiu *et al.*, 2021). Essas tecnologias apresentam alguns inconvenientes, como geração de grande quantidade de lodo (precipitados) em seus processos, altos custos operacionais e inviabilidade na aplicação em grande escala (Bilal *et al.*, 2022). Por essas razões, as tecnologias mais sustentáveis, seguindo o princípio das soluções baseadas na natureza (SBN), como o uso de microalgas no tratamento de águas e efluentes contaminados por íons metálicos, vêm ganhando grandes destaques nos últimos anos (O'Hogain e McCarton, 2019).

Em comparação aos processos químicos tradicionais, a biorremediação utilizando microalgas apresenta vantagens operacionais, como baixo custo e ampla disponibilidade em diversas regiões geográficas. Estes processos geram poucos resíduos e são de fácil implementação (Flores-Chaparro *et al.*, 2017). Essas vantagens reforçam o potencial do uso de microalgas como



estratégia eficiente e sustentável para a remoção de contaminantes, como o manganês de efluentes e águas de minas (He e Chen, 2014; Tounsadi *et al.*, 2016; Yi *et al.*, 2016).

Na presente revisão, o principal objetivo foi avaliar as pesquisas publicadas recentemente sobre a aplicação de microalgas no tratamento de águas e efluentes contaminados por manganês, particularmente no contexto de águas afetadas pela mineração. Portanto, os objetivos específicos deste estudo são: (1) Descrever os mecanismos envolvidos na remoção de manganês pela microalga; (2) Analisar os fatores que influenciam a remoção do manganês pela microalga; (3) Descrever os principais grupos de microalgas mais estudados na remoção do íon; (4) Apresentar perspectivas futuras a serem exploradas, compilando os desenvolvimentos recentes nesta área.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Águas impactadas pela mineração (AIM) e o acidente da Samarco

Águas impactadas pela mineração (mine-impacted Waters – MIW) formam um conceito amplo que engloba todos os tipos de água cujas características são afetadas pela atividade mineradora. Um exemplo típico de AIM é a drenagem ácida de minas (DAM), definida como uma solução ácida contendo metais tóxicos e sulfatos solubilizados durante a oxidação de sulfetos de ferro (pirita e pirrotita). Entretanto, o conceito de AIM é mais amplo, englobando águas cujo pH é neutro, mas com conteúdo de metais tóxicos e/ou sulfatos acima do permitido pela legislação, geradas em ambientes de mineração (Fitch, 2015). As águas produzidas nas minerações de minério de ferro, como a Samarco, são exemplos de AIM, embora tenham pH neutro.

O impacto da mineração na qualidade das águas foi demonstrado de forma dramática pelos acidentes envolvendo barragens de minério de ferro em MG. Com o rompimento da barragem de Fundão em Mariana, em 2015, registrou-se um significativo acréscimo nos níveis de contaminação por manganês no Rio Doce. Logo após o incidente, a concentração de manganês atingiu valores próximos a 1000 mg/L, e era esperado que, com o decorrer do tempo, tais concentrações tenderiam gradualmente aos níveis de referência prévios ao acidente. No entanto, 10 anos após o acidente, observa-se que este processo tem sido lento e irregular. Como exemplo, no ano de 2020, houve um incremento estatístico significativo no valor da mediana das concentrações de manganês nas águas dos afluentes do Rio Doce afetados pelo rompimento da barragem, que atingiu valores próximos a 0,20 mg/L, conforme indicado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Tal fenômeno foi associado à intensa pluviosidade verificada na bacia hidrográfica do Rio Doce naquele ano. O IGAM argumenta que o rejeito depositado no leito dos rios vem disponibilizando manganês para a coluna d'água em anos de elevada precipitação (Igam, 2020).

1.2. Características químicas do manganês

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



O manganês é um elemento químico, com número atômico 25, pertencente ao grupo 7 e período 4 da tabela periódica dos elementos, ocupando posição junto à tríade ferro, cobalto e níquel, e também faz parte do grupo dos metais de transição. Apresenta a massa atômica de 54,938 g/mol (IMnI, 2018; Moreira *et al.*, 2024).

Segundo Moreira *et al.* (2024), o manganês ocupa a 12ª posição em abundância relativa entre todos os elementos químicos; colocado entre os cinco metais com maior distribuição na crosta terrestre. Entre as espécies minerais portadoras de manganês, destacam-se a pirolusita, um dióxido, a principal fonte do elemento, bem como a rodocrosita, um mineral carbonatado. Além do Brasil, são encontrados grandes depósitos de manganês em alguns países como a África do Sul, o Gabão, a China, a Índia, a Ucrânia e a Austrália (IMnI, 2018).

O elemento apresenta variados estados de oxidação (Moreira *et al.*, 2024), sendo os estados +2, +4 e +7 considerados estados de oxidação mais relevantes de acordo com o aspecto biológico e ambiental, por representarem as formas mais comuns, reativas e atuantes deste elemento nos sistemas naturais e nos organismos vivos. O mais estável e comum é o estado de oxidação 2+ (Mn^{2+}), sendo o íon Mn^{2+} encontrado em sólidos, em soluções aquosas e em complexos metálicos (Lee, 2003).

Como Mn^{2+} , o manganês forma compostos solúveis que podem ser transportados em solução. Em contrapartida, no estado Mn^{4+} , o manganês forma espécies insolúveis, como o MnO_2 . Assim, o íon Mn^{2+} pode ser precipitado em ambientes oxidantes, especialmente em condições de pH neutro a alcalino, onde a oxidação para Mn^{4+} é catalisada (Garcia, 1999).

1.3. Aplicações do manganês

Aproximadamente 90% do consumo desse metal é devido ao seu uso na indústria siderúrgica, como item da fabricação de variados aços (de baixo carbono, aços de usinagem fácil e aços-ferramenta). Ainda é usado em combinação com outros metais, como cobre, zinco, alumínio, estanho e chumbo no fabrico de ligas metálicas (IMnI, 2018). Pode ser empregado como cátodo e despolarizador em pilhas e baterias, e como pigmento em pinturas, inclusive na coloração de tijolos e telhas. Outra aplicação importante é na descoloração de vidros verdes, quando causada pela presença de ferro. Por outro lado, o manganês é usado para conferir coloração violeta ao vidro (Nascimento e Gonzalez, 2018). Outrossim, o sulfato de manganês é empregado no fabrico de vários produtos, como fertilizantes, fungicidas, cosméticos e tintas. O manganês ainda pode ser utilizado como agente oxidante (permanganato) ou estar presente como impureza em coagulantes empregados no tratamento de água potável (IMnI, 2018; Nascimento e Gonzalez, 2018).

1.4. Toxicidade do manganês

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



O manganês é um nutriente essencial às plantas, aos animais e aos seres humanos (Moreira *et al.*, 2024). É benéfico quando consumido em baixas concentrações (abaixo de 0,1 mg/L), o que é obtido por intermédio dos alimentos, trazendo benefícios para a coagulação sanguínea, no tratamento de ferimentos e na formação de tecido ósseo (IMnI, 2018).

Por outro lado, quando presente em concentrações superiores a 0,1 mg/L, em água potável, o manganês pode induzir efeitos tóxicos, sobretudo em casos de excesso e/ou exposição prolongada (Queiroz *et al.*, 2021). A toxicidade também pode ocorrer por via inalatória, em ambientes com partículas ou poeiras contaminadas. Seus efeitos adversos incluem danos aos sistemas pulmonar e hematológico, além de potenciais impactos neurotóxicos, uma vez que o manganês apresenta capacidade de travessia da barreira hematoencefálica e atingir o sistema nervoso central (Guilarte, 2011). Ademais, pode estar envolvido em doenças neurodegenerativas, como Alzheimer e Parkinson. Também pode provocar pneumonia, asma brônquica, bronquite aguda, desordens extrapiramidais e manganismo (Felix *et al.*, 2005).

1.5. Legislação ambiental e regulamentação do manganês

Devido à sua toxicidade, diversas legislações ambientais têm sido implementadas para evitar a exposição dos seres humanos a elevadas concentrações de manganês e também impedir a contaminação ambiental, como, por exemplo, em aquíferos.

A Tabela 1 mostra os padrões de lançamento de efluentes e potabilidade de águas contendo manganês dissolvido, regulamentados pela legislação ambiental de diversas nações e pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Tabela 1. Padrões de lançamento de efluentes e potabilidade de água contendo manganês

Tipo	Limite máximo permitido (mg/L)	País/ Organização	Fonte
Efluente	1,0	Brasil	(CONAMA, 2011)
Água potável	0,1	Brasil	(Ministério da Saúde, 2021)
Água potável	0,05	EUA	(USEPA, 2024)
Água potável	0,12	Canadá	(Health Canada, 2019)
Efluente	0,05	Nigéria	(Oyebamiji <i>et al.</i> , 2019)
Água potável	0,08	OMS	(World Health Organization, 2022)
Água potável	0,1	Austrália	(NHMRC, 2011)
Água potável	0,05	União Europeia	(European Union, 1998)

Legenda: CONAMA – Comissão Nacional do Meio Ambiente; NHMRC – Conselho Nacional de Saúde e Pesquisa da Austrália; USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EUA).

Fonte: Adaptado, os autores, 2025.



No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde (MS) nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece que, em água potável, a concentração máxima permitida de manganês é de 0,1 mg/L. De acordo com a Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, dispõe-se que para o lançamento de efluentes com manganês dissolvido, a concentração do metal não deve exceder 1,0 mg/L.

Em nível internacional, com base em considerações estéticas para a água potável, a EPA-USA estabeleceu o limite máximo aceitável de 0,05 mg/L de manganês (USEPA, 2024). Na edição mais recente das diretrizes da OMS para a qualidade da água potável, o valor-guia para o manganês total foi definido para 0,08 mg/L (WHO, 2022). A OMS ressalta ainda que a “potabilidade” deve considerar não apenas os efeitos à saúde, mas também a aceitação estética (sabor e coloração) e, por isso, concentrações de manganês menores podem ser desejadas, dependentes do contexto local. As Diretrizes Australianas de Água Potável estabelecem uma meta de 0,01 mg/L em pontos de tratamento e um limite máximo aceitável, baseado em considerações estéticas, de 0,1 mg/L para o manganês (NHMRC, 2011). A Diretiva do Conselho da Comissão Europeia lista como parâmetro indicador para o manganês em água potável o valor de 0,05 mg/L (European Union, 1998).

Considerando a população mais sensível à presença de manganês (a infantil), a legislação canadense estabeleceu uma concentração máxima aceitável de manganês em água potável de 0,12 mg/L, com o valor de 0,02 mg/L de manganês total na água potável como padrão estético (Health Canada, 2019).

De forma a atender aos padrões de lançamento de efluentes e potabilidades de águas contendo manganês dissolvido, estabelecidos pelas legislações ambientais, as microalgas têm sido utilizadas para a remoção do íon.

1.6. Microalgas e biotecnologia ambiental

Microalgas são organismos microscópicos, fotossintéticos, eucarióticos (Thoré *et al.*, 2023). Possuem uma enorme biodiversidade, com mais de 30.000 espécies estudadas (Singh e Saxena, 2015). Geralmente não apresentam estruturas diferenciadas típicas de plantas superiores (raízes, caule, folhas) (Bello *et al.*, 2021). Seus tamanhos podem variar de 0,2 µm a 2 µm e, nas formas filamentosas, de tamanhos iguais ou superiores a 100 µm.

Fixando o CO₂, as microalgas têm a habilidade de transformar energia solar em energia química (Bule *et al.*, 2018). Desenvolvem-se principalmente em ambientes aquáticos, em solos, em rochas e em ambientes extremos, como fossas termais, podendo estar associados a outros organismos, auxiliando-os na fixação de nitrogênio (Santos *et al.*, 2017).

2. MÉTODOS



Esta revisão bibliográfica foi conduzida de forma narrativa, com o objetivo de analisar estudos sobre remoção de manganês utilizando microalgas publicados entre 2015 – 2025, bem como os aspectos ligados à química, à toxicidade e às legislações ambientais sobre o metal.

2.1. Referencial teórico

Os dados empregados no Item 1 (Referencial teórico), foram obtidos realizando busca geral no Google e em diversas bases de dados, sem critérios de data de publicação, utilizando assuntos ligados à química, à toxicidade, aplicação e às legislações ambientais sobre o manganês, bem como as águas impactadas pela mineração e acidente da Samarco, microalgas e biotecnologia ambiental.

2.2. Bases de dados e termos de buscas

Para os estudos discutidos nos Resultados, foram consultadas em bases de dados Scopus, ScienceDirect, MPDI e Google Scholar, utilizando os termos de busca (*manganese, removal, algae, microalgae e water*), nas seguintes combinações: “*manganese removal AND algae*”, “*manganese removal AND microalgae*”, “*manganese removal AND algae AND water*”, e “*manganese AND algae*”.

2.3. Critérios de exclusão e inclusão

Foi realizada a triagem dos estudos com base nos títulos e resumos, sendo excluídos os estudos duplicados, artigos de revisão, resenhas, publicações fora do período definido, bem como trabalhos que utilizaram outras biomassas (por exemplo, bactérias) ou que abordaram a remoção de poluentes distintos do manganês.

Posteriormente, os artigos selecionados foram analisados na íntegra, com extração de dados referentes aos objetivos, principais resultados e parâmetros experimentais, incluindo espécie de microalga empregada, concentração inicial de manganês, pH, tempo de contato, eficiência de remoção, mecanismo envolvido e potencial de aplicação em escala industrial.

Ao final, 22 estudos atenderam aos critérios de inclusão, que contemplaram artigos originais, de carácter experimental, com descrição do cultivo das microalgas e do processo de remoção do íon Mn^{2+} .

2.4. Análise de dados

Para a análise comparativa, consideraram-se a espécie utilizada, a variação do pH, mecanismos de remoção, o tempo de contato experimental, a eficiência máxima e o escalonamento.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Aplicações práticas de microalgas no tratamento de águas residuárias contendo manganês

A Tabela 2 lista estudos que utilizaram microalgas para remoção de manganês. Verifica-se uma remoção entre 23% e 100% do metal, por diferentes microalgas estudadas, em variadas condições de pH e quantidade inicial do metal durante os experimentos.

Tabela 2. Estudos que utilizaram microalgas para remoção de manganês

Microalga	Espécie química	Conc. Inicial (mg/L)	pH	Eficiência (%)	Tempo de contato	Mecanismo de remoção	Fonte	ID
<i>Pediastrum duplex</i>	Mn ²⁺	22,0	6 – 9	93 – 95	6 dias	Precipitação	Thongpitak <i>et al.</i> (2018)	1
<i>Chlorella</i> sp. HQ	Mn ²⁺	5,52 50,52	7,5-10	97,24 45,63	35 dias	Precipitação	Liu, Zhan e Hong (2017)	2
<i>C. vulgaris</i>	Mn ²⁺	2,4		89,22		Biossorção	Choi (2015)	3
<i>Scenedesmus</i> sp.	Mn ²⁺	0,03	> 8	83	36 dias	Precipitação	Farias <i>et al.</i> (2023)	4
<i>C. vulgaris</i>	Mn ²⁺	19,4	8	99,9		Precipitação	Brar <i>et al.</i> (2022)	5
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	Mn ²⁺	109 247,7 549,4		95 75 66	7 dias	Biossorção	Sim <i>et al.</i> (2021)	6
<i>Chlorella</i> sp. HL	Mn ²⁺	1 6		42,74 30,33	14 dias	Precipitação	Liu <i>et al.</i> (2023)	7
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> <i>Scenedesmus almeriensis</i>	Mn ²⁺	3	7,0	85,6 78	72 horas	Adsorção	Saavedra <i>et al.</i> (2018)	8
<i>Pediastrum duplex</i>	Mn ²⁺	9 20	6 – 9	100	6 dias	Adsorção e precipitação	Thongpitak <i>et al.</i> (2019)	9
<i>S. obliquus</i>	Mn ²⁺	5,49	> 7	75		Não mencionado	Khairuddin <i>et al.</i> (2024)	10
<i>C. vulgaris</i> <i>Scenedesmus</i> sp.	Mn ²⁺	25 2,5	6,5- Não mencionado	54,87 25,38	24 horas	Não mencionado	Şentürk e Yıldız (2016)	11
<i>Chlorella</i> sp. <i>Spirulina</i> sp. <i>Azolla</i> sp. <i>Phragmites australis</i>	Mn ²⁺	0,08-0,3	7,4 – Não mencionado	74 86 74 72	12 meses	Não mencionado	Yehia <i>et al.</i> (2021)	12
<i>Desmodesmus</i> sp. WR1	Mn ²⁺	6 30 50	> 7	100 100 60	7 dias	Precipitação	Wang <i>et al.</i> (2017)	13

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



<i>Anabaena flos-aquae</i>				72,71					
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Mn ²⁺	0,15	7-10	69,71	6 dias	Precipitação	Wang M. et al. (2022)	14	
<i>S. obliquus</i>				67,58					
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>				72,68					
<i>C. vulgaris</i>	Mn ²⁺	158,6 76,8 34,8 17,7		91,2 87,9 75,74 99,44	6 dias	Adsorção	Li et al. (2019)	15	
<i>S. quadricauda</i>	Mn ²⁺	10 20 30 40 50	6,0- ≥8,0	96 76,5 66,16 49,62 39,5	7 dias	Precipitação	Li et al. (2024)	16	
<i>Desmodesmus sp. WR1</i>	Mn ²⁺	3,36	7,5- 10,5	100	3 dias	Precipitação	Gong et al. (2025)	17	
<i>Tetraselmis marina AC16 MESO</i>	Mn ²⁺	1,0 5,0		50,4 23,4	72 horas	Não mencionado	Cameron et al. (2018)	18	
<i>Chlamydomonas sp. WH1-1</i>									
<i>Chlamydomonas sp. WH1-4</i>									
<i>Chlorella sp. WH2-4</i>	Mn ²⁺	13,74 - 109,88		>90	10 dias	Precipitação	Wang et al. (2022)	19	
<i>Chlorella sp. WH2-5</i>									
<i>C. vulgaris</i>	Mn ²⁺	108,7 76,69 76,63 76,53 108,7 76,69 76,63 76,53	7,7-6,9 7,9-7,0 7,7-7,0 7,8-6,8 7,7-7,1 7,9-7,2 7,7-7,3 7,8-7,3	100 91,54 92,7 93,71 89,94	10 dias	Não mencionado	EI-Sheekh et al. (2016)	20	
<i>Chlorella salina</i>									
<i>C. vulgaris</i>	Mn ²⁺	50	6,2- 11,0	100	14 dias	Precipitação	Cândido et al. (2024)	21	
<i>C. vulgaris</i>				86,19	90 min	Biossorção	Salimi et al. (2025)	22	
<i>Sargassum angustifolium</i>	Mn ²⁺	20	8,5	75,44	120 min				

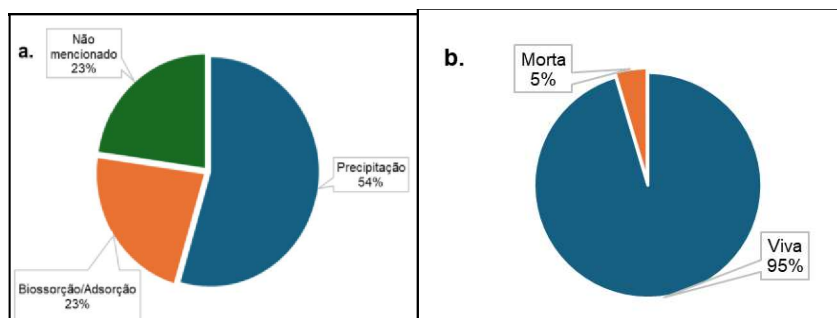
Fonte: Adaptado, os autores (2026).

3.2. Mecanismo de remoção e avaliação do ciclo de vida da biomassa algal

A figura 1 ilustra as análises realizadas nos 22 estudos, concernente ao mecanismo de remoção do metal (Figura 1-a) e o ciclo de vida da biomassa utilizada (Figura 1-b).



Figura 1. Análise de alguns aspetos dos estudos: **(a.)** Mecanismos de remoção; **(b.)** Biomassa algal utilizada



Fonte: Adaptado, os autores (2026).

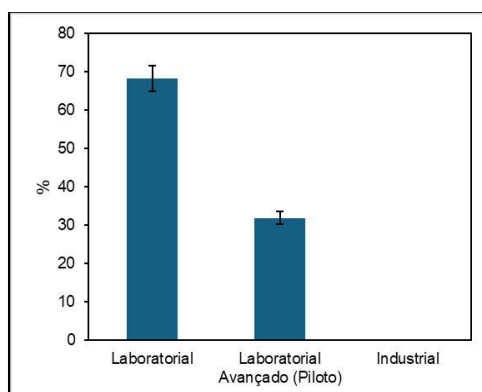
Dos 22 estudos sobre a remoção de manganês em água por microalgas apresentados nesta revisão, 54% \pm 20,8% atribuem a remoção ao mecanismo de precipitação, enquanto 23% \pm 17,6% indicam a biossorção/adsorção como processo predominante. Os demais trabalhos não especificam o mecanismo envolvido, 23% \pm 17,6% (Figura 1-a). Entre os estudos que apontam a precipitação, os autores destacam que esse processo é favorecido pelo aumento do pH decorrente da atividade fotossintética da microalga, promovendo a formação de óxidos de manganês, nesses casos, foram registrados valores de pH iguais ou superiores a 8,0. O experimento realizado por Cândido *et al.* (2024), com Leucoberbelina Azul I (LBB), confirma a elevação do pH do meio influenciado pela fotossíntese da microalga, libera o oxigênio como subproduto, criando condições favoráveis à catálise de oxidação do íon Mn^{2+} . Por outra, estudos relatados à biossorção, como mecanismo de remoção do metal, alguns, empregaram a biomassa algal morta (inativa) (Salimi *et al.*, 2025) (Figura 1-b), outros, o têm como mecanismo secundário (Thongpitak *et al.*, 2019), e alguns não monitoraram o pH (Choi, 2015; Li *et al.*, 2019; Sim *et al.*, 2021) (Tabela 2), o que evidencia a limitação desses estudos, porque, sem análise de parâmetros reais (como o pH) e outros estudos profundos (como a espectroscopia de infravermelho), acha-se ilusória a afirmação categórica da ocorrência de biossorção como mecanismo principal da remoção do manganês utilizando biomassa algal viva (ativa), uma vez que, o pH elevado ($\geq 8,0$) é um fator influente no processo de precipitação (Cândido *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2022; Wang Q. *et al.*, 2022). pH ácido a neutro ($\leq 7,9$) influencia a ocorrência de biossorção (Saavedra *et al.*, 2018), sendo este mecanismo, analisando por espectroscopia no infravermelho (Ajjabi e Chouba, 2009; Pavasant *et al.*, 2006). Outrossim, a maior parte dos estudos empregaram a biomassa viva (Figura 1-b), o que reforça o potencial da utilização da microalga em biotecnologia ambiental, visto que, a microalga mostra-se resistente a esse metal tóxico.

Esse conjunto de evidências reforça a interpretação de que a remoção do manganês pela microalga ocorre predominantemente em função do aumento do pH do meio.

3.3. Escalonamento

A figura 2 evidencia o escalonamento dos estudos analisados. Verifica-se que $68,2\% \pm 19,4\%$ dos estudos analisados, foram em escala laboratorial, seguido por escala piloto (laboratorial avançado) com $32\% \pm 19,4\%$. Não foram observados estudos em escala industrial.

Figura 2. Escalonamento

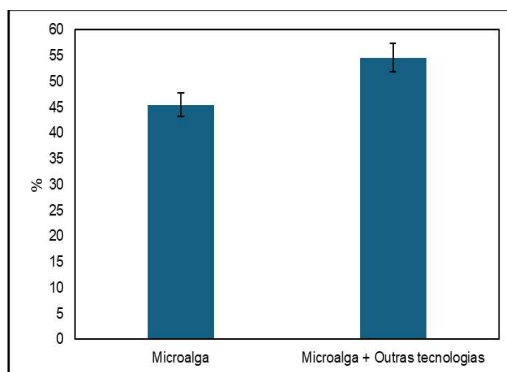


Fonte: Adaptado, os autores (2026).

Estas evidências (Figura 2), mostram a lacuna nos estudos ligados a aplicação de microalga na remoção de manganês em água, o que reforça a proposta de estudos com focos em aplicações industrial, de forma a colmatar as ausências de respostas reais aos variados problemas causados por metais tóxicos, tanto ao ambiente, quanto à sociedade.

3.4. Integração com outras tecnologias

Com base na figura 3, constatou-se que a maior parte dos estudos ($54,5\% \pm 20,8$) integram a microalgas com outras tecnologias, a outra parte, $45,45\% \pm 20,8\%$, utilizaram simplesmente a microalga.

Figura 3. Integração das microalgas com outras tecnologias

Fonte: Adaptado, os autores (2026).

As outras tecnologias envolvidas no consórcio com as microalgas, incluem a sericita (Choi, 2015), bactérias (Farias *et al.*, 2023), produção de lipídios (Brar *et al.*, 2022), membranas filtrantes (Sim *et al.*, 2021), entre outras. Esses dados evidenciam que o consórcio das microalgas com outras tecnologias melhoram e de que maneira, o desempenho da remoção do manganês, o que pode ser uma alternativa bastante viável, principalmente em aplicação industrial, para obtenção de resultados eficientes em curto espaço de tempo.

3.5. Desafios e perspectivas futuras

Atualmente, o uso de microalgas para o tratamento de água contaminada por manganês e outros metais tóxicos ainda está na fase de escala laboratorial e piloto. Não existem, até então, estudos com aplicação industrial das microalgas para remoção do manganês (item 3.3), o que reforça lacunas que ainda precisam ser exploradas em investigações futuras, de forma a avaliar a efetividade das eficiências constatadas em escala laboratorial quando transpostas para escala ampla (industrial). Faz-se necessário, também, desenvolver estudos de viabilidade de reaproveitamento da biomassa gerada após o tratamento do efluente pela microalga, uma vez que apenas uma parcela dos estudos aborda o reaproveitamento da matéria orgânica.

As principais obras na área relatam estudos com maior predominância em efluentes sintéticos. Existe uma minoria ou até mesmo a inexistência de estudos com aplicação da microalga na remoção de altas concentrações do íon Mn^{2+} em efluente de mineração, que chega a apresentar concentrações acima de 100 mg/L (Barboza *et al.*, 2015). Outrossim, também existe a necessidade de aplicação da microalga no tratamento de efluente de mineração sem suplementação prévia do meio.

4. CONSIDERAÇÕES

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



O manganês pode ser removido pela microalga por meio de mecanismos diretos, como a biossorção, e indiretos, como a precipitação. A biossorção ocorre predominantemente em biomassa inativa, enquanto a precipitação acontece em células vivas, nas quais a atividade fotossintética eleva o pH do meio, promovendo a formação de MnOx a partir de Mn²⁺.

Entre os fatores que mais influenciam a remoção de manganês pela microalga estão o pH, a temperatura e o tempo de contato. Diversas espécies têm sido empregadas com destaque nesse processo, incluindo *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus* sp., *Chlorella sorokiniana*, *Scenedesmus obliquus*, *Spirulina* sp. e *Desmodesmus* sp., especialmente em concentrações de até 100 mg/L. No entanto, muitos estudos não monitoram parâmetros críticos, como o pH, o que dificulta a determinação precisa do mecanismo predominante na remoção do metal. Ademais, observa-se a ausência de aplicações em escala industrial, evidenciando lacunas que ainda precisam ser exploradas em pesquisas futuras.

A associação de microalgas com outras tecnologias surge como uma estratégia promissora para aumentar a eficiência de remoção do manganês.

REFERÊNCIAS

Afonso, J. C., 2019. Manganese in Brazil: Discovery, extraction, consumption and marketing from a historical perspective. *Quimica Nova*, v. 42 (10), 1172–1183. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170435>

Ajjabi, L. C.; Chouba, L., 2009. Biosorption of Cu²⁺ and Zn²⁺ from aqueous solutions by dried marine green macroalga *Chaetomorpha linum*. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 11, p. 3485–3489. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.001>

Australia. Australian drinking water guidelines. National Health and Medical Research Council – NHMRC, 2011. (Acessado em 13 de outubro de 2024) em: www.nhmrc.gov.au/guidelines/publications/eh52.

Barboza, N. R.; Amorim, S. S.; Santos, P. A.; Reis, F. D.; Cordeiro, M. M.; Guerra-Sá, R.; Leão, V. A., 2015. Indirect manganese removal by *Stenotrophomonas* sp. and *Lysinibacillus* sp. isolated from Brazilian Mine Water. *BioMed Research International*. <https://doi.org/10.1155/2015/925972>

Barka, N.; Ouzaouit, K.; Abdennouri, M.; Makhfouk, M. El; Qourzal, S.; Assabbane, A.; Ait-ichou, Y.; Nounah, A., 2012. Kinetics and equilibrium of cadmium removal from aqueous solutions by sorption onto synthesized hydroxyapatite. *Desalination and Water Treatment*, v. 43 (1–3), 8–16. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.672189>

Bello, A. S.; Saadaoui, I.; Ben-Hamadou, R., 2021. “Beyond the Source of Bioenergy”: Microalgae in Modern Agriculture as a Biostimulant, Biofertilizer, and Anti-Abiotic Stress. *Agronomy*, v. 11 (8), 1610. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081610>



Bilal, M.; Ihsanullah, I.; Younas, M.; Ul Hassan Shah, M., 2022. Recent advances in applications of low-cost adsorbents for the removal of heavy metals from water: A critical review. *Separation and Purification Technology*, v. 278 (119510). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119510>

Brar, K. K.; Eteieb, S.; Magdoui, S.; Calugaru, L.; Brar, S. K., 2022. Novel approach for the management of acid mine drainage (AMD) for the recovery of heavy metals along with lipid production by *Chlorella vulgaris*. *Journal of Environmental Management*, v. 308 (114507). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114507>

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2011. Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011.

Brasil. Ministério da Saúde, 2021. Diário oficial da União, Portaria GM/MS n. 888, de 4 de maio de 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>

Bule, H. M.; Ahmed, I.; Maqbool, F.; Bilal, M.; Iqbal, H. M. N., 2018. Microalgae as a source of high-value bioactive compounds. *Frontiers in Bioscience*, n. 10 (2), 197–216. <https://doi.org/10.2741/s509>

Cameron, H.; Mata, M. T.; Riquelme, C., 2018. The effect of heavy metals on the viability of *Tetraselmis marina* AC16- MESO and an evaluation of the potential use of this microalga in bioremediation. *PeerJ*, v. 2018 (7). PeerJ 6:e5295. <https://doi.org/10.7717/peerj.5295>

Cândido, G. C.; Santos, A. A.; Santiago, A. F.; Leão, V. A., 2024. Insights into manganese removal from mine water by *Chlorella vulgaris*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 21 (5), 4715–4726. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05290-0>

Choi, H.-J., 2015. Biosorption of heavy metals from acid mine drainage by modified sericite and microalgae hybrid system. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 226 (185). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2433-3>

Crini, G.; Lichtfouse, E.; Wilson, L. D.; Morin-Crini, N., 2019. Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters Springer Verlag*, v. 17, 195–213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>

Ding, Z.; Hu, X.; Morales, V. L.; Gao, B., 2014. Filtration and transport of heavy metals in graphene oxide enabled sand columns. *Chemical Engineering Journal*, v. 257, 248–252. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.034>

El-Sheekh, M. M.; Farghl, A. A.; Galal, H. R.; Bayoumi, H. S., 2016. Bioremediation of different types of polluted water using microalgae. *Rendiconti Lincei*, v. 27 (2), 401–410. <https://doi.org/10.1007/s12210-015-0495-1>

European Union. Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption, de 3 de novembro de 1998. (Acessado em 13 de outubro de 2024) em: <http://data.europa.eu/eli/dir/1998/83/2015-10-27>

Farias, S. L.; Ruas, G.; Serejo, M. L.; Boncz, M. Á., 2023. Evaluation of the effect of the feeding regime on the removal of metals and pathogens in microalgae–bacterial systems. *Water Science and Technology*, v. 88 (1), 11–22. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.194>



Felix, F. Da S.; Barros, R. De C. M. De; Lichtig, J.; Masini, J. C.; Ferreira, N. G., 2005. Determinação de Manganês em material particulado atmosférico de ambientes de trabalho utilizado eletrodo de diamante dopado com Boro e voltametria de onda quadrada com redissolução catódica. *Quim. Nova*, v. 28 (6), 1000–1005. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000600013>

Fischer, L.; Falta, T.; Koellensperger, G.; Stojanovic, A.; Kogelnig, D.; Galanskib, M. S.; Krachler, R.; Keppler, B. K.; Hann, S., 2011. Ionic liquids for extraction of metals and metal containing compounds from communal and industrial waste water. *Water Research*, v. 45 (15), 4601–4614. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.011>

Fitch, M., 2015. Mine-Impacted Water and Biochemical Reactors. *Food, Energy and Water: The Chemistry Connection*, 129-159. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800211-7.00005-3>

Flores-Chaparro, C. E.; Chazaro Ruiz, L. F.; Alfaro De La Torre, M. C.; Huerta-Diaz, M. A.; Rangel-Mendez, J. R., 2017. Biosorption removal of benzene and toluene by three dried macroalgae at different ionic strength and temperatures: Algae biochemical composition and kinetics. *Journal of Environmental Management*, v. 193, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.005>

Garcia, M. A. A., 1999. O Manganês e seus usos industriais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.1999.173623>

Gong, X.; Peng, Q.; Jiang, R.; Yang, N.; Xing, C.; Wang, R., 2025. Mn-oxidizing microalgae and woodchip-denitrifying bioreactor system for recovering manganese and removing nitrogen from electrolytic manganese metal industrial tailwater. *Journal of Hazardous Materials*, v. 488, 137383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137383>

Guilarte, T. R., 2011. Manganese and Parkinson's disease: A critical review and new findings. *Ciênc. saúde coletiva*, v. 16 (11). <https://doi.org/10.1590/S1413-81232011001200028>

He, J.; Chen, J. P., 2014. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource Technology*, v. 160, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.068>

Health Canada. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - Manganese. Ottawa, Ontario: Editions Universitaires E, de maio de 2019. (Acessado em 10 de setembro de 2024) em: <http://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/water-quality.html>

Hussain S.; Rengel, Z.; Qaswar, M.; Amir, M.; Zafar-UI-Hye, M., 2019. Arsenic and heavy metal (cadmium, lead, mercury and nickel) contamination in plant-based foods. *Plant and Human Health*, v. 2, 447-490. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03344-6_20

Hwang, J-H.; Church, J.; Lee, S-J.; Park, J.; Lee, W. H., 2016. Use of microalgae for advanced wastewater treatment and sustainable bioenergy generation *Environ. Eng. Sci.*, v. 33 (11), 882- 897. <https://doi.org/10.1089/ees.2016.0132>

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), 2020. Encarte especial sobre a qualidade das águas do rio doce após 5 anos do rompimento da barragem de Fundão: 2015/2020. Belo Horizonte, 74p. <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4387>



IMNI. International Manganese Institute. (Acessado em 30 de outubro de 2025) em: <https://www.manganese.org/en/about-manganese/>

IMNI. International Manganese Institute. (Acessado em 10 de setembro de 2024) em: <https://www.manganese.org/what-is-manganese/>

Kerur, S. S.; Bandekar, S.; Hanagadakar, M. S.; Nandi, S. S.; Ratnamala, G. M.; Hegde, P. G., 2020. Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review Materialstoday: Proceedings, v. 42 (2), 1112–1121. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.492>

Khairuddin, N. F. M.; Khan, N.; Sankaran, S.; Farooq, W.; Ahmad, I.; Aljundi, I. H., 2024. Produced water treatment by semi-continuous sequential bioreactor and microalgae photobioreactor. Bioresources and Bioprocessing, v. 11 (56). <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00775-3>

Lee, J. D., 2003. Química inorgânica não tão concisa. Editora Blucher, v. 5a Edição. ISBN: 9788521201762

Li, H.; Zhang, Y.; Liu, J.; Shen, Z.; Li, A.; Ma, T.; Feng, Q.; Sun, Y., 2019. Treatment of high-nitrate wastewater mixtures from MnO₂ industry by *Chlorella vulgaris*. Bioresource Technology, v. 291, 121836. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121836>

Li, Y.; Zhou, C.; Chen, L.; Deng, R.; Wong, M.; Shan, S., 2024. Effects of biochar on the manganese enrichment and oxidation by a microalga *Scenedesmus quadricauda* in the aquatic environment. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 271, 115961. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115961>

Liu, Y.; Zhan, J. Jing; Hong, Y., 2017. Effects of metal ions on the cultivation of an oleaginous microalga *Chlorella* sp. Environmental Science and Pollution Research, v. 24, 26594–26604. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0258-x>

Martini, S.; Roni, K. A., 2021. The existing technology and the application of digital artificial intelligent in the wastewater treatment area: A review paper. Journal of Physics: Conference Series. 1858, 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012013>

Mishra, S.; Cheng, L.; Maiti, A., 2021. The utilization of agro-biomass/byproducts for effective bio-removal of dyes from dyeing wastewater: A comprehensive review. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9 (1), 104901. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104901>

Mohebi, M.; Parashkoochi, M. G.; Mohammadi, A., 2024. A comparison of biofilm and suspension methods in removing heavy metals (chromium) from industrial wastewater with *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*. Results in Engineering, v. 24, 103397. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103397>

Moreira, L. M.; Lyon, J. P.; Pereira, C.; Silva, R. De S.; Schultz, M. S., 2024. Manganês (Mn): Propriedades redox, química de coordenação e implicações biológicas. Research, Society and Development, v. 13 (2). <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i2.45186>

Nascimento, T. F. V. O.; Gonzalez, F. G., 2018. Impactos do manganês na saúde pública. Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade, v. 11 (3). <https://doi.org/10.22280/revintervol11ed3.367>



O'Hogain, S.; McCarton, L., 2018. Nature-Based Solutions. In: A Technology Portfolio of Nature Based Solutions. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73281-7_1

Oyebamiji, O. O.; Boeing, W. J.; Holguin, F. O.; Ilori, O.; Amund, O., 2019. Green microalgae cultured in textile wastewater for biomass generation and biotransformation of heavy metals and chromogenic substances. *Bioresource Technology Reports*, v. 7, 100247. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100247>

Pavasant, P.; Apiratikul, R.; Sungkhum, V.; Suthiparinyanont, P.; Wattanachira, S.; Marhaba, T. F., 2006. Biosorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , and Zn^{2+} using dried marine green macroalgae *Caulerpa lentillifera*. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 18, p. 2321–2329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.032>

Petersková, M.; Valderrama, C.; Gibert, O.; Cortina, J. L., 2012. Extraction of valuable metal ions (Cs, Rb, Li, U) from reverse osmosis concentrate using selective sorbents. *Desalination*, v. 286, 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.042>

Priyadarshani, I.; Sahu, D.; Rath, B., 2011. Microalgal bioremediation: current practices and perspectives. *J Biochem Technol*, v. 3 (3), 299–304. <https://jbiochemtech.com/article/microalgal-bioremediation-current-practices-and-perspectives>

Qiu, B.; Tao, X.; Wang, H.; Li, W.; Ding, X.; Chu, H., 2021. Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 155, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081>

Queiroz, H. M.; Ying, S. C.; Abernathy, M.; Barcellos, D.; Gabriel, F. A.; Otero, X. L.; Nóbrega, G. N.; Bernardino, A. F.; Ferreira, T. O., 2021. Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse. *Environment International Journal*, v. 146, 106284. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106284>

Queiroz, P. S.; Barboza, N. R.; Cordeiro, M. M.; Leão, V. A.; Guerra-Sá, R., 2018. Rich growth medium promotes an increased on Mn(II) removal and manganese oxide production by *Serratia marcescens* strains isolates from wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, v. 140, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.09.018>

Richards, S.; Dawson, J.; Stutter, M., 2019. The potential use of natural vs commercial biosorbent material to remediate stream waters by removing heavy metal contaminants. *J. Environ. Manag.*, v. 231, 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.019>

Rugnini, L.; Costa, G.; Congestri, R.; Bruno, L., 2017. Testing of two different strains of green microalgae for Cu and Ni removal from aqueous media. *Science of the Total Environment*, v. 601–602, 959–967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.222>

Saavedra, R.; Muñoz, R.; Taboada, M. E.; Vega, M.; Bolado, S., 2018. Comparative uptake study of arsenic, boron, copper, manganese and zinc from water by different green microalgae. *Bioresource Technology*, v. 263, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.101>

Safdar, M.; Mustafa, S.; Naeem, A.; Mahmood, T.; Waseem, M.; Tasleem, S.; Ahmad, T.; Siddique, M. T., 2011. Effect of sorption on Co (II), Cu (II), Ni (II) and Zn(II) ions precipitation. *Desalination*, v. 266 (1–3), 171–174. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.021>



Salimi, A.; Ghanbarizadeh, P.; Mirvakili, A.; Moheimani, N. R., 2025. Optimizing heavy metal remediation of synthetic wastewater using *Chlorella vulgaris* and *Sargassum angustifolium*: A comparative analysis of biosorption and bioaccumulation techniques. *Science of the Total Environment*, v. 992, 179938. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179938>

Santos, Alberto Meireles; Santos, Aline Meireles; Sartori, R. B.; Queiroz, L. Z.; Barin, J. S.; Jacob-Lopes, E., 2017. Nutrient cycling in meat processing industry by microalgae-based processes. *Desalination and Water Treatment*, v. 100, 91–99. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21719>

Şentürk, T.; Yildiz, Ş., 2016. Adsorbent effect of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus* sp. (Chlorophyta) for the removal of some heavy metals and nutrients. *Turkish Journal of Biochemistry*, v. 41 (2), 87–95. <https://doi.org/10.1515/tjb-2016-0015>

Sim, L. N.; Ho, J. S.; Khaswan, N. B.; Wu, B.; Chong, T. H., 2021. Membrane filtration of manganese (II) remediated-microalgae: Manganese (II) removal, extracellular organic matter, and membrane fouling. *Algal Research*, v. 55, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102279>

Singh, J.; Saxena, R. C., 2015. An Introduction to Microalgae: Diversity and Significance. Diversity and Significance. In: *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*. [s.l.] Elsevier Inc., 11–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00002-9>

Sulaymon, A. H.; Sharif, A. O.; Al-Shalchi, T. K., 2011. Removal of cadmium from simulated wastewaters by electrodeposition on stainless steel tubes bundle electrode. *Desalination and Water Treatment*, v. 29 (1–3), 218–226. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2099>

Thongpitak, J.; Pekkoh, J.; Pumas, C., 2018. Simple medium formulation for manganese remediation by green Microalga *Pediastrum duplex* AARLG060. *Chiang Mai J. Sci.*, 45 (3), 1247–1256. <http://epg.science.cmu.ac.th/ejournal/>

Thongpitak, J.; Pekkoh, J.; Pumas, C., 2019. Remediation of Manganese-Contaminated Coal-Mine Water Using Bio-Sorption and Bio-Oxidation by the Microalga *Pediastrum duplex* (AARLG060): A Laboratory-Scale Feasibility Study. *Frontiers in Microbiology*, v. 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02605>

Thoré, E. S. J.; Muylaert, K.; Bertram, M. G.; Brodin, T., 2023. Microalgae. *Current Biology*, v. 33 (3), PR91–PR95. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.032>

Tounsadi, H.; Khalidi, A.; Abdennouri, M.; Barka, N., 2016. Activated carbon from *Diploptaxis harra* biomass: Optimization of preparation conditions and heavy metal removal. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 59, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.08.014>

USEPA. Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals. (Acessado em 10 de setembro de 2024) em: <https://www.epa.gov/sdwa/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals#table-of-secondary>.

Wang, M.; Gui, H.; Chen, J.; Li, C.; Wang, C.; Chen, C.; Zhao, C.; Li, Y., 2022. Experimental Study on Removal of Iron, Manganese and Copper from Water by Microalgae. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 31 (2), 1847–1855. <https://doi.org/10.15244/pjoes/142483>

Wang, R.; Wang, S.; Tai, Y.; Tao, R.; Dai, Y.; Guo, J.; Yang, Y.; Duan, S., 2017. Biogenic manganese oxides generated by green algae *Desmodesmus* sp. WR1 to improve bisphenol A removal. *Journal of Hazardous Materials*, v. 339, 310–319. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.026>



Wang, Q.; Liao, C.; Zhao, J.; Zeng, G.; Liu, W.; Gao, P.; Sun, D.; Du, J., 2022. Combined Process of Biogenic Manganese Oxide and Manganese-Oxidizing Microalgae for Improved Diclofenac Removal Performance: Two Different Kinds of Synergistic Effects. *Toxics*, v. 10 (5), 230. <https://doi.org/10.3390/toxics10050230>

World Health Organization (WHO)., 2022. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the First and Second Addenda. Table 8.9, Guideline values for naturally occurring chemicals that are of health significance in drinking water. (Acessado em: 30 nov. 2025), em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK579467/table/ch8.tab9/?utm_source

Wong, C. W.; Barford, J. P.; Chen, G.; McKay, G., 2014. Kinetics and equilibrium studies for the removal of cadmium ions by ion exchange resin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 2 (1), 698–707. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.11.010>

Yehia, S.; El-Saadi, A.; Galal, M. M., 2021. Application of algae to free surface wetlands for effluent reuse. *Water and Environment Journal*, v. 35 (2), 748–758. <https://doi.org/10.1111/wej.12667>

Yi, Z. Ji; Yao, J.; Chen, H. Lun; Wang, F.; Yuan, Z. Min; Liu, X., 2016. Uranium biosorption from aqueous solution onto *Eichhornia crassipes*. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 154, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.01.012>

Zhou, G. J.; Peng, F. Q.; Zhang, L. J.; Ying, G. G., 2012. Biosorption of zinc and copper from aqueous solutions by two freshwater green microalgae *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 19, 2918–2929. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0800-9>

Zhu, M. X.; Lee, L.; Wang, H. H.; Wang, Z., 2007. Removal of an anionic dye by adsorption/precipitation processes using alkaline white mud. *Journal of Hazardous Materials*, v. 149 (3), 735–741. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.037>