



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TEXTO PARCIAL

UTILIZAÇÃO DE BRIÓFITAS COMO BIORSORVENTE NA REMOÇÃO DE  
METAIS EM MATRIZ DE ÁGUA SUPERFICIAL

THERRÉSE TESSER TORRES

PORTO ALEGRE

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL

**THERRÉSE TESSER TORRES**

**UTILIZAÇÃO DE BRIÓFITAS COMO BISSORVENTE NA REMOÇÃO DE  
METAIS EM MATRIZ DE ÁGUA SUPERFICIAL**

Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de mestre em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental na Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul

Orientadora: Dra. Lúcia Helena Ribeiro  
Rodrigues

Coorientadora: Dra. Cacinele Mariana da  
Rocha

Banca Examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Cristina de Almeida  
Silva

Prof<sup>a</sup> Dra. Juçara Bordin

Prof<sup>a</sup> Dra. Daiana Maffessoni

**PORTO ALEGRE**

**2023**

## CIP - Catalogação na Publicação

Torres, Therrése Tesser

UTILIZAÇÃO DE BRIÓFITAS COMO BIOSORVENTE NA  
REMOÇÃO DE METAIS EM MATRIZ DE ÁGUA SUPERFICIAL /  
Therrése Tesser Torres. -- 2023.

79 f.

Orientadora: Lucia Helena Ribeiro Rodrigues.

Coorientadora: Cacinele Mariana Da Rocha.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. bioissorção. 2. musgo. 3. adsorvente. 4.  
fitorremediação. 5. água. I. Rodrigues, Lucia Helena  
Ribeiro, orient. II. Da Rocha, Cacinele Mariana,  
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

## RESUMO

Os metais em água não se degradam ao longo do tempo, são contaminantes pertencentes ao grupo dos poluentes persistentes, e podem apresentar características de bioacumulação nos seres vivos e biomagnificação na teia trófica, sendo responsáveis pela geração de danos aos ecossistemas e, potencialmente, à saúde humana. A partir desta perspectiva, a aplicação de técnicas eficientes capazes de remover/reduzir metais presentes na água é fundamental para diminuir os impactos que estes elementos podem causar aos seres humanos e aos organismos aquáticos. Deste modo, a bioissorção é um processo que utiliza materiais biológicos no desenvolvimento de adsorventes alternativos e mais viáveis economicamente para remoção de contaminantes presentes em amostras de água, é considerada como uma técnica ecológica. Em nosso estudo a escolha pela utilização das espécies de briófitas *Sphagnum perichaetiale* Hampe e *Ricciocarpos natans* (L.) Corda, se deve ao fato destas pertencerem a um grupo de plantas cosmopolita, serem resistentes às alterações ambientais e espécies com possibilidade de cultivo para posterior utilização como bioissorventes, além de nativas do Rio Grande do Sul e já terem sido empregadas em outro estudo de bioissorção, conduzido pelo grupo de pesquisa, que reconhece a eficiente capacidade de absorção de ambas espécies. Assim, o presente trabalho: 1) avaliou os principais aspectos relacionados à aplicação ambiental de musgos na remoção de contaminantes através de mecanismos de bioissorção e fitorremediação, utilizando o *software VOSviewer* na elaboração de mapas bibliométricos acerca do tema e empregando informações obtidas na plataforma *Web of Science*; 2) analisou a capacidade de bioissorção da espécie de musgo *Sphagnum perichaetiale* Hampe na remoção de cádmio (Cd), e das espécies *R. natans* (L.) Corda e *S. perichaetiale*, em atuação sinérgica, observando o potencial de remoção dos metais ferro (Fe) e cromo (Cr), em amostras aquosas, visando a aplicabilidade posterior da técnica na remediação de águas contaminadas, contribuindo cientificamente e socialmente para o desenvolvimento de uma tecnologia ecológica em vista da melhoria na qualidade das águas. A busca relacionada a aplicação de musgos na fitorremediação e bioissorção encontrou mais de 300 publicações. Deste total, observou-se que a maioria dos estudos foram desenvolvidos a partir do ano de 2005 para ambas áreas de pesquisa, sendo que estudos empregando musgos na fitorremediação tiveram maior número de publicações (n=17) em 2020, demonstrando assim que o uso deste grupo está em crescente desenvolvimento e apresenta valioso potencial de aplicação nestes campos de aplicação. Em relação aos resultados experimentais, observou-se elevada capacidade da espécie *S. perichaetiale* na remoção do metal Cd. A partir destes resultados, é possível concluir a viabilidade de utilização de ambas espécies como agentes fitorremediadores e bioissorventes naturais na remoção de contaminantes metálicos presentes em amostras de água.

Palavras-chave: bioissorção; musgo; adsorvente, fitorremediação, mapa bibliométrico

## ABSTRACT

Metals in water do not degrade over time, are contaminants belonging to the group of persistent pollutants, and can present characteristics of bioaccumulation in living beings and biomagnification in the trophic web, being responsible for causing damage to ecosystems and, potentially, to health human. From this perspective, the application of efficient techniques capable of removing/reducing metals present in water is essential to reduce the impacts that these elements can cause to humans and aquatic organisms. Thus, biosorption is a process that uses biological materials in the development of alternative and more economically viable adsorbents for removing contaminants present in water samples, it is considered an ecological technique. In our study, the choice to use the bryophyte species *Sphagnum perichaetiale* Hampe and *Ricciocarpos natans* (L.) Corda is due to the fact that they belong to a cosmopolitan group of plants, are resistant to environmental changes and are species that can be cultivated for later use. as biosorbents, in addition to being native to Rio Grande do Sul and having already been used in another biosorption study conducted by the research group, which recognizes the efficient absorption capacity of both species. Thus, the present work: 1) evaluated the main aspects related to the environmental application of mosses in the removal of contaminants through biosorption and phytoremediation mechanisms, using the VOSviewer software in the elaboration of bibliometric maps on the subject and using information obtained from the Web of Science; 2) analyzed the biosorption capacity of the moss species *Sphagnum perichaetiale* Hampe in the removal of cadmium (Cd), and of the species *R. natans* (L.) Corda and *S. perichaetiale*, in synergistic action, observing the potential for removal of iron metals (Fe) and chromium (Cr), in aqueous samples, aiming at the subsequent applicability of the technique in the remediation of contaminated water, contributing scientifically and socially to the development of an ecological technology with a view to improving water quality. The search related to the application of mosses in phytoremediation and biosorption found more than 300 publications. Of this total, it was observed that most of the studies were developed from the year 2005 onwards for both areas of research, and studies using mosses in phytoremediation had the highest number of publications (n=17) in 2020, thus demonstrating that the use of this group is under increasing development and presents valuable application potential in these application fields. Regarding the experimental results, a high capacity of the species *S. perichaetiale* in the removal of Cd metal was observed. From these results, it is possible to conclude the viability of using both species as phytoremediation agents and natural biosorbents in the removal of metallic contaminants present in water samples.

Keywords: biosorption; moss; adsorbent, phytoremediation, bibliometric map

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS .....	7
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	8
1.1 QUALIDADE DA ÁGUA.....	8
1.2 CONTAMINAÇÃO DO AMBIENTE AQUÁTICO .....	8
1.2.1 Contaminação da água por metais pesados.....	8
1.3 REMOÇÃO DE CONTAMINANTES METÁLICOS .....	9
1.3.1 Briófitas aplicadas à fitorremediação e biossorção.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	11
4. CAPÍTULO 1: Bryophytes in removal of environmental contaminants: A review.....	12
5. CAPÍTULO 2: Remoção de metais em experimentos isolados e sinérgicos utilizando as briófitas <i>Sphagnum perichaetiale</i> e <i>Ricciocarpus natans</i> .....	366
REFERENCIAS.....	3Erro! Indicador não definido.

## LISTA DE FIGURAS

### 4. CAPÍTULO 1:

- Figura 1a** - Mapa de visualização em rede gerado no *VOSviewer* a partir das palavras “*moss AND phytoremediation*” no banco de dados *Web of Science*. As cores representam os clusters dos termos extraídos, agrupados pelo *software* de acordo com suas relações.....19
- Figura 1b** - Seleção do termo “*moss*” no mapa bibliométrico e os itens relacionados ao termo gerado no *VOSviewer*.....20
- Figura 2a** - Mapa de visualização em rede gerado no *VOSviewer* a partir das palavras “*moss AND biosorption*” no banco de dados *Web of Science*. As cores representam os clusters dos termos extraídos, agrupados pelo *software* de acordo com suas relações.....21
- Figura 2b** - Seleção do termo “*sorbent*” no mapa bibliométrico e os itens relacionados ao termo gerado no *VOSviewer*.....21
- Figura 3** - Aplicabilidade dos musgos (divisão *Bryophyta*) na bioindicação, bioissorção, biomonitoramento e fitorremediação considerando os principais ambientes, sistemas e contaminantes estudados, com destaque para o emprego nos setores de bioissorção e fitorremediação.....23

## LISTA DE TABELAS

### 4. CAPÍTULO 1:

- Tabela 1** - Comparação de diferentes materiais e métodos empregados na remoção de metais contaminantes presentes em amostras de água.....26

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1 QUALIDADE DA ÁGUA**

A água é um recurso natural de valor econômico, estratégico e social, essencial à existência e manutenção da vida. Além disso, os ciclos econômicos, sociais e humanos estão diretamente relacionados com a qualidade da água (CBRT 2005; Dariva 2011). Entre seus principais usos destacam-se a geração de energia, turismo e lazer, navegação, agricultura, pecuária, pesca, e abastecimentos urbano, rural e industrial (ANA 2019).

No entanto, a escala, a intensidade e a velocidade da urbanização influenciam a ocorrência de problemas nos ecossistemas aquáticos, especialmente nas áreas urbanas (Zhang et al. 2014). As águas superficiais são, em geral, um importante manancial de abastecimento público, mas também um dos mais expostos às fontes de contaminação devido, principalmente, ao lançamento de efluentes, em sua maioria sem tratamento, que reduz a disponibilidade hídrica, permite a proliferação de doenças, e contribui para degradação do ecossistema e da qualidade de vida humana (Galli and Abe 2010; Benassi et al. 2018; ANA 2019).

### **1.2 CONTAMINAÇÃO DO AMBIENTE AQUÁTICO**

O ambiente está continuamente exposto a diversos contaminantes químicos provenientes de fontes naturais e antrópicas, estas últimas, em geral, estão relacionadas com os processos de urbanização e industrialização (Wu et al. 2016; Marella et al. 2020).

Desta forma, os ecossistemas aquáticos são receptores finais de contaminantes de origem diversa, em sua maioria oriundos da atividade antrópica, principalmente devido ao crescimento populacional e ao avanço tecnológico (Costa et al. 2008). Dentre as inúmeras consequências destas atividades, o aumento na concentração de metais pesados e nutrientes nos corpos hídricos através do escoamento urbano, efluentes industriais e agrícolas e descargas domésticas é responsável por causar graves impactos ambientais (Cohen et al. 2001; Abdel-Baki et al. 2011).

#### **1.2.1 Contaminação da água por metais pesados**

A poluição por metais pesados altera os ciclos biogeoquímicos naturais contribuindo para degradação do ambiente e ocasionando efeitos adversos para as formas de vida aquática e terrestre, incluindo o ser humano (Singh et al. 2011; Ali et al. 2013a; Haldar and Ghosh 2020a). Ao contrário de outras classes de poluentes, os metais não são biodegradáveis, apresentam características bioacumulativas e, subsequentemente, são



biomagnificados através da teia trófica, representando assim, um dos contaminantes de maior risco à saúde ambiental e humana (Silva 2011; Wu et al. 2016; Haldar and Ghosh 2020a; Marella et al. 2020).

### **1.3 REMOÇÃO DE CONTAMINANTES METÁLICOS**

Devido às graves consequências que a contaminação da água por metais pode causar, a remediação destes contaminantes é necessária para minimizar os efeitos negativos à saúde humana e aos ecossistemas (Xu et al. 2015).

Para a remediação de metais, existem diversas técnicas utilizadas que compreendem métodos físicos, químicos e biológicos, como o uso de carvão ativado, óxido de grafeno, filtração e floculação, ozonização, reações de oxirredução, radiações ionizantes e tratamentos ultravioleta (UV) (Suresh Kumar et al. 2015; Marella et al. 2020).

Considerando o alto risco de contaminação por metais pesados e seus impactos no ambiente aquático, nas últimas décadas o desenvolvimento de técnicas ecológicas e sustentáveis, como a aplicação de biossorventes foi uma tendência, visando o uso e a aplicação de biossorventes de baixo custo e facilmente disponíveis para remoção destes contaminantes (Singh et al. 2015a).

As plantas são organismos capazes de absorver poluentes do meio ambiente através de inúmeros mecanismos biológicos (Ali et al. 2013b). Segundo Tavares (2013), a fitorremediação, processo de purificação de meios aquáticos e terrestres aplicando plantas, é uma técnica ecológica para remoção de contaminantes como metais.

A fitorremediação tem sido empregada utilizando-se de diversas espécies de plantas fanerogâmicas, que possuem as estruturas do sistema reprodutivo visíveis (sementes e flores), como *Sarcocornia ambigua* (Michx.) M.Á.Alonso & M.B.Crespo (Arrieta 2018), *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (Chaves 2008), e *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Palma-Silva et al. 2012; Baldovi 2019), porém pouco se conhece sobre seu uso com briófitas.

#### **1.3.1 Briófitas aplicadas à fitorremediação e biossorção**

As briófitas são o segundo maior grupo de plantas terrestres, possuem distribuição cosmopolita e como características apresentam alta adaptabilidade a diversas condições ambientais, são criptógamas avasculares, poiquilohídricas, têm ciclo de vida

caracterizado pela alternância de geração gametofítica e esporofítica, sem estruturas diferenciadas em raiz, caule e folhas (Frahm 2003).

Além destas características, as briófitas aquáticas são conhecidas pela sensibilidade, tolerância e capacidade acumulativa a uma ampla gama de metais pesados, radionuclídeos e nutrientes. Entre os fatores que favorecem este potencial estão propriedades morfológicas e fisiológicas como a ausência de cutícula bem desenvolvida, alta relação superfície/volume permitindo o aprisionamento de partículas, alta capacidade de troca catiônica que permite o acúmulo de grandes quantidades de elementos (Wehr and Whitton 1986; López and Carballeira 1993; Gerdol et al. 2002; Zechmeister et al. 2003).

Desta forma, as características deste grupo são importantes e permitem que seus espécimes sejam utilizados como potenciais bioindicadores e fitorremediadores de contaminantes ambientais (Frahm 2003; Barbosa and Carvalho 2016). Sendo que a análise de elementos-traço que se acumulam nas briófitas fornece muitas informações sobre os poluentes no ambiente, permitindo uma avaliação na mudança da qualidade do meio em que se encontra o contaminante (Klos et al. 2011). Além disto, Barbosa e Carvalho (2016) apontam que do total de publicações relacionando briófitas e qualidade ambiental, apenas 0,34 % foi desenvolvida no Brasil. Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento de estudos que utilizem espécies de briófitas na remoção de metais, ainda mais quando for possível explorar as características deste grupo de forma diferenciada.

Dentre os diversos gêneros deste grupo, destacam-se as espécies do gênero *Sphagnum* utilizadas mundialmente pelo seu conhecido potencial de absorção (Gutberlet 1989; Saxena and Srivastava 2002). *Sphagnum perichaetiale* Hampe, um musgo com aspecto compacto e rígido, em geral cresce formando tapetes. É uma espécie típica de ambientes úmidos e alagados, mas capaz de tolerar a dessecação do ambiente. Caracteriza-se pela estatura pequena e pelas células hialinas dos ramos com pseudoporos elípticos (Crum, H., Buck 1988).

*Ricciocarpos natans* (L.) Corda é uma hepática talosa com formas de vida terrestre e aquática. A forma aquática flutuante é típica de piscinas, valas e canais ricos em minerais, podendo eventualmente estar presente em córregos de fluxo lento (Kronstedt 1981; Long 2010).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar a utilização de briófitas como bioissorvente na remoção de metais em matriz aquosa enriquecida.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1- Analisar o estado da arte sobre as aplicações ambientais de musgos na fitorremediação e bioissorção através de revisão sistemática utilizando bibliometria;

2- Avaliar o uso da espécie de musgo *Sphagnum perichaetiale* na remoção do metal cádmio sob as formas de biomassa úmida e seca em amostras aquosas enriquecidas com o metal.

3- Analisar o potencial e a aplicabilidade das espécies de briófitas *Ricciocarpos natans* e *Sphagnum perichaetiale* em sinergia, como alternativa à remoção dos metais ferro e cromo em amostras aquosas enriquecidas, visando a aplicabilidade das mesmas como agentes fitorremediadores e bioissorventes naturais.

## **3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está estruturada no formato de dois artigos que se complementam. No primeiro artigo é feita uma revisão bibliométrica com o objetivo de definir um panorama completo sobre o emprego de musgos na fitorremediação e bioissorção, identificando as principais técnicas e tecnologias utilizadas neste campo de pesquisa para definir tendências com o emprego deste grupo de plantas na descontaminação ambiental. No segundo artigo, com uma abordagem experimental, foi avaliado o potencial da espécie de musgo *S. perichaetiale*, na remoção de cádmio sob a forma de biomassa úmida e seca, em diferentes granulometrias de moagem da biomassa seca, a aplicabilidade das espécies de briófitas *Ricciocarpos natans* e *Sphagnum perichaetiale* em sinergia na remoção dos metais ferro e cromo nas formas de biomassas úmida e seca. Em ambos experimentos foram avaliadas a variável concentração inicial dos metais, tendo como objetivo principal analisar a capacidade das biomassas em remover os metais contaminantes presentes nas amostras aquosas enriquecidas, visando sua futura aplicabilidade como bioissorventes naturais e ecológicos.

#### 4. CAPÍTULO 1

### **Musgos na remoção de contaminantes ambientais: Artigo de Revisão**

TESSER, T.T.<sup>1\*</sup>, RODRIGUES, L. H. R.<sup>1</sup>, DA ROCHA, C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, RS - Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos. Imbé, RS – Brasil

\*ttessertorres@gmail.com

#### **Resumo**

As briófitas, especialmente os musgos, vêm recebendo considerável atenção devido às diversas aplicações ambientais em que podem ser utilizados, como a bioissorção e a fitorremediação. De modo geral, este grupo é conhecido por sua sensibilidade às alterações ambientais e à presença de poluentes como metais, metaloides, poluentes orgânicos persistentes (POP), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), componentes que são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Considerando que as briófitas são um grupo de plantas cosmopolita, o desenvolvimento de abordagens empregando musgos apresenta grande potencial de utilização em diversos locais do mundo, com isso a presente revisão busca avaliar os principais aspectos relacionados à aplicação ambiental dos musgos na remoção de contaminantes através da bioissorção e fitorremediação. Para tanto, utilizou-se o *software* VOSviewer na elaboração de mapas bibliométricos acerca do assunto, empregando informações obtidas na plataforma *Web of Science*. A busca relacionada a aplicação de musgos na fitorremediação encontrou 174 publicações, a pesquisa relacionada à aplicação de musgos na bioissorção obteve 140 resultados. Deste total, observou-se que a maioria dos estudos foram desenvolvidos a partir do ano de 2005 para ambas áreas de pesquisa, sendo que estudos empregando musgos na fitorremediação tiveram maior número de publicações (n=17) em 2020, demonstrando assim que o uso deste grupo está em crescente desenvolvimento e apresenta valioso potencial de aplicação nos campos da bioissorção e fitorremediação.

Palavras-chave: Musgos, bioissorvente, biomassa, mapeamento bibliométrico

## **Abstract**

Bryophytes, especially mosses, have received considerable attention due to the various environmental applications in which they can be used, such as biosorption and phytoremediation. In general, this group is known for its sensitivity to environmental changes and the presence of pollutants such as metals, metalloids, persistent organic pollutants (POP), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), components that are harmful to the environment and human health. Considering that bryophytes are a cosmopolitan group of plants, the development of approaches using mosses has great potential for use in different parts of the world. biosorption and phytoremediation. For this purpose, the VOSviewer software was used to create bibliometric maps on the subject, using information obtained from the Web of Science platform. The search related to the application of mosses in phytoremediation found 174 publications, the research related to the application of mosses in biosorption obtained 140 results. Of this total, it was observed that most of the studies were developed from the year 2005 onwards for both areas of research, and studies using mosses in phytoremediation had the highest number of publications (n=17) in 2020, thus demonstrating that the use of this group is under increasing development and presents valuable potential for application in the fields of biosorption and phytoremediation.

Keywords: Mosses, sorbent, biomass, bibliometric mapping

## **1. Introdução**

O ambiente está continuamente exposto a diversos contaminantes provenientes de fontes naturais e antrópicas. As descargas de fontes antrópicas continuam sendo uma tendência indevida dos processos de urbanização e industrialização em muitas regiões do mundo, e a presença destes contaminantes no ambiente está associada a diversos efeitos negativos à saúde humana e aos ecossistemas (Ștefănuț et al. 2019; Wu et al. 2016). Deste modo, a conscientização sobre esta situação tem impulsionado mudanças na maneira como gerenciamos recursos, projetamos e utilizamos a tecnologia, e tomamos decisões na sociedade (Haddaway et al. 2018).

Ao longo dos anos, observa-se uma expansão contínua de pesquisas que visam novas abordagens e desenvolvimentos para garantir a descontaminação ambiental.

Embora existam métodos físicos e químicos estabelecidos para a remoção de contaminantes, métodos biológicos ganham força como uma alternativa confiável em comparação às tecnologias clássicas, que, em geral, são mais caras e menos adequadas ecologicamente (Brum et al. 2012; Hlihor et al. 2014).

No desenvolvimento e produção de bioSORVENTES, as briófitas têm apresentado elevado potencial na remoção de contaminantes. O termo briófitas, em geral, é empregado para designar musgos (Bryophyta), hepáticas (Marchantiophyta) e antóceros (Anthocerotophyta), plantas que possuem um ciclo de vida marcado pela alternância de gerações gametofítica (haploide) e esporofítica (diploide), sendo a geração gametofítica dominante (Vanderpoorten and Goffinet 2009). Em comparação com outros grupos de plantas, as briófitas são organismos pequenos que vivem em contato direto com o ambiente circundante, têm característica poiquilohídrica o que permite absorver elementos ao longo de toda a sua superfície (Ares et al. 2017; Zechmeister et al. 2003).

As briófitas são membros importantes de diversos ecossistemas e contribuem para a estabilidade do solo, prevenindo eventos erosivos e contribuindo para o aumento na taxa de infiltração de água no solo (Vukojevic et al. 2005). Sua aplicação na bioSORÇÃO e fitorremediação está relacionada à remoção, especialmente, de metais pesados presentes no ar, no solo e na água (Haynes et al. 2019; Sandhi et al. 2017; Suzuki et al. 2016).

A pesquisa bibliográfica revela que existem poucos artigos que aplicam conceitos sobre o emprego ambiental das briófitas nas técnicas de bioSORÇÃO e fitorremediação, sendo os principais estudos desenvolvidos sobre a aplicação de biomassas briofíticas em forma de *moss bags* para o biomonitoramento de poluentes ambientais (Ares et al. 2012; Debén et al. 2017; Limo et al. 2018; Shvetsova et al. 2019; Agostini et al. 2020). Uma abordagem que se relaciona com o tema do presente estudo, mas que demonstra um enfoque mais relacionado ao monitoramento e avaliação da qualidade ambiental, enquanto esta revisão aborda o desenvolvimento de técnicas para remoção de contaminantes ambientais, tema que ainda é pouco estudado com o emprego de espécies de briófitas.

Para aprofundar a investigação da literatura sobre as atuais e mais frequentes aplicações ambientais de espécies de musgos na fitorremediação e bioSORÇÃO, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura por meio da metodologia Bibliométrica, que consiste no uso de análise estatística quantitativa para descrever padrões de

publicações apresentando um quadro geral da literatura (Kilubi 2016). Desse modo, os objetivos deste artigo são três: (1) Definir um quadro completo do campo de pesquisa com emprego de espécies de musgos na fitorremediação e biossorção; (2) Identificar quais técnicas e tecnologias são mais usadas para definir tendências.

## 2. Protocolo para seleção de artigos

A busca literária foi realizada na plataforma *Web of Science*, que apresenta uma base de dados com artigos revisados por pares, foram selecionados na busca todos os anos de publicação da plataforma (1945-2021) publicados em todos os periódicos visando um maior alcance de publicações. Os itens do relatório preferidos para revisões sistemáticas e meta-análises (PRISMA) foram seguidos para a seleção dos artigos (Moher et al. 2009).

Os termos utilizados na busca foram “*moss AND biosorption*” e “*moss AND phytoremediation*”, analisando informações como o número de publicações por ano, os países em que os estudos foram publicados e os autores que publicaram mais artigos sobre cada assunto específico.

A partir das informações acessadas no banco de dados, foi realizado o mapeamento bibliométrico no *software VOSviewer* (versão 1.6.15), aplicando uma metodologia semelhante à recomendada por De Souza et al. (2019). As principais etapas no *software VOSviewer* consistiram em alimentar o mesmo com o banco de dados obtido para criar um mapa de termos de coocorrência, a partir de dados de texto, considerando palavras presentes nos campos de título e resumo. Os termos foram extraídos usando o método de “contagem binária”, em que apenas a presença ou ausência dos termos importa. O número mínimo de ocorrências do termo foi definido como 10, uma recomendação padrão do *software*.

Posteriormente, foram selecionados os termos mais relevantes para o tema da pesquisa, excluindo unidades de medida, itens repetidos e irrelevantes. O *software VOSviewer* gera mapas considerando o número de itens em grupos, de acordo com seus *links*. Assim, a partir do mapa original é possível gerar outros mapas selecionando um termo e obtendo destaque em suas respectivas ligações.

No mapa de visualização em rede, os itens são representados por seus rótulos e também por um círculo. O tamanho do rótulo e do círculo de um item é determinado pela relevância de cada item, ou seja, quanto maior a relevância do item, maior será o rótulo e

o círculo do mesmo. A cor de um item define a qual agrupamento o mesmo pertence, e as linhas entre eles representam suas ligações, sendo que em geral, quanto mais próximos os rótulos estiverem entre si, mais relacionados estão os termos (Eck and Waltman 2019).

Por fim, foi realizada uma revisão da literatura a partir de publicações disponíveis na plataforma *Web of Science* para melhor caracterizar as conexões entre os termos extraídos, embasar a discussão dos resultados e a composição do texto, avaliando as principais aplicações dos musgos, verificando às perspectivas para pesquisas e desenvolvimentos futuros nestas áreas de estudo.

## **Resultados e Discussão**

### **3.1 Cenário atual sobre publicações disponíveis na plataforma *Web of Science***

Baseado nos resultados obtidos na plataforma *Web of Science* com a pesquisa das palavras-chave “*moss AND phytoremediation*”, em 17 de fevereiro de 2021, para todos os anos disponíveis (1945-2021), foram obtidas 174 publicações. Deste total, 158 artigos científicos, 13 artigos de eventos, 11 revisões bibliográficas e três acessos antecipados. A primeira publicação registrada é do ano de 1997, e a partir de 2005 houve aumento nas publicações, sendo 2020 o ano com mais registros, 17 no total. O país com maior número de publicações é a China, representando 32,8 % de todas as publicações relacionadas ao assunto. O Brasil apresenta um total de sete publicações sobre o tema, sendo a primeira em 2005 e as demais entre os anos de 2014 e 2020, indicando que o desenvolvimento desta temática é recente no país.

Entre os autores que mais publicam está Wong, M. H., com 12 publicações, seguido de Wu, S. C., com oito publicações, destas muitas são em parceria com assuntos relacionados à remediação de solos por fungos micorrízicos arbusculares na remoção de metais, em especial Cd, Zn e As, e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos PAHs (Wu et al. 2007, 2014; Hu et al. 2013).

Buscando as palavras-chave “*moss AND biosorption*”, considerando todos os anos permitidos pela plataforma (1945-2021), 140 resultados foram obtidos, destes 134 artigos científicos, 9 publicações de eventos, duas cartas e um material editorial. O primeiro ano com registro de publicação sobre o assunto foi 1995, em 2002 aumentou o número de publicações sobre o tema, sendo 2005 o ano com mais registros, 13 publicações, enquanto nos demais anos (2006-2020), as publicações seguiram uma média próxima a sete

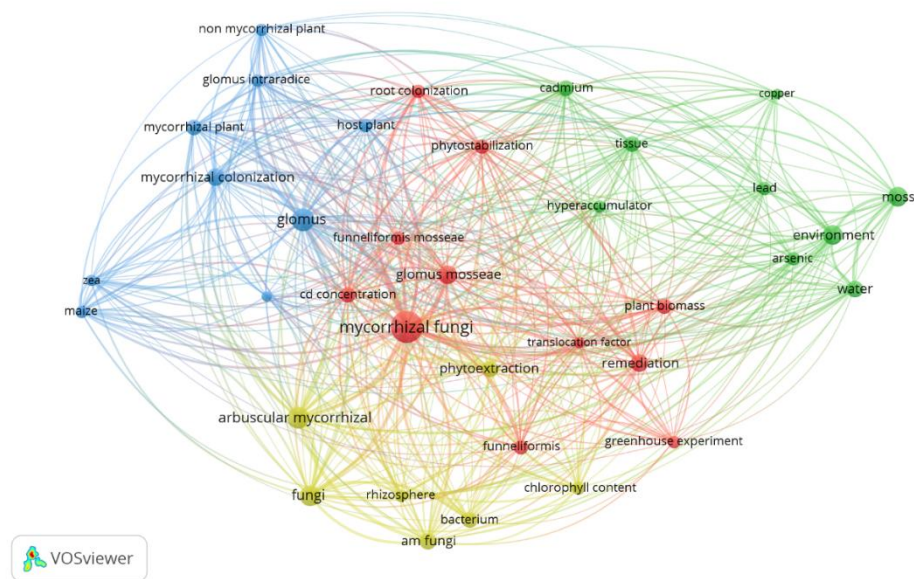


produções ao ano. Os países com maior número de publicações são Romênia e Turquia, com 17 publicações cada, totalizando juntos 24,3 % das produções científicas para esta abordagem.

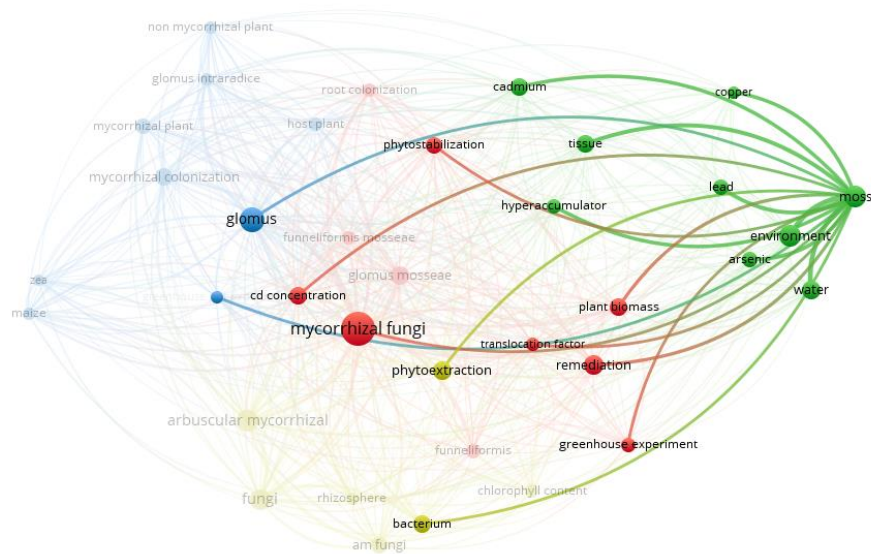
Os autores com maior número de publicações são Macoveanu, M. e Bulgariu, L., com 13 e 9 publicações, respectivamente, sendo a maioria dos trabalhos publicados conjuntamente, e tendo como abordagens principais equilíbrio e cinética da sorção de íons metálicos por musgos de turfeira, em diferentes faixas de pH, temperatura e tempo de contato, analisando os modelos isotérmicos de Freundlich, Langmuir, Tempkin e Dubinin-Radushkevich (Bulgariu et al. 2012a, 2009; Kicsi et al. 2010).

### 3.2 Mapeamento bibliométrico através do *software VOSviewer*

A busca pelas palavras-chave “*moss\* AND phytoremediation*” resultou em um total de 174 publicações na base de dados *Web of Science*, em 17 de fevereiro de 2021, gerando assim um mapa de rede apresentado nas Figuras 1a e 1b.



**Figura 1a** - Mapa de visualização em rede gerado no *VOSviewer* a partir das palavras “*moss AND phytoremediation*” no banco de dados *Web of Science*. As cores representam os clusters dos termos extraídos, agrupados pelo *software* de acordo com suas relações.



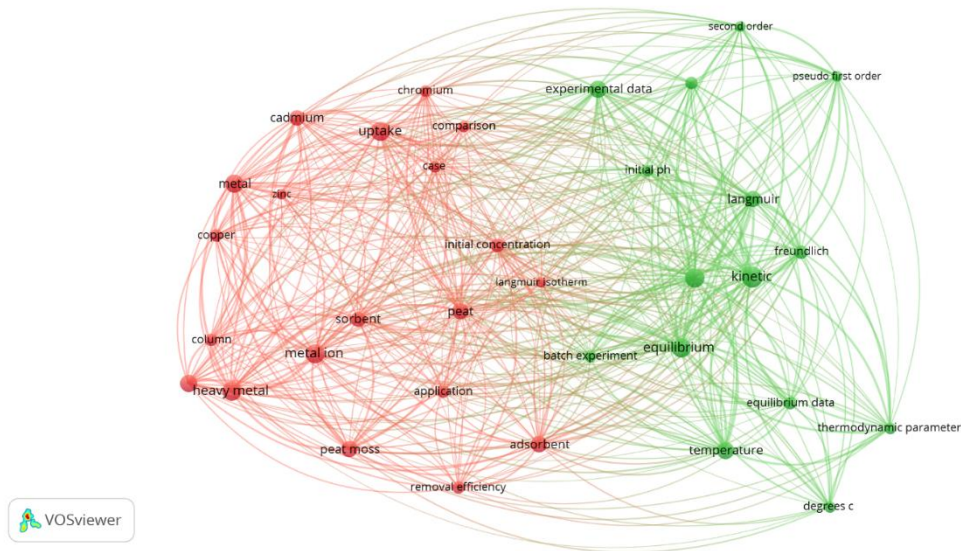
**Figura 1b** - Seleção do termo “*moss*” no mapa bibliométrico e os itens relacionados ao termo gerado no *VOSviewer*.

Com a análise da Figura 1a é possível observar que o *software* agrupou os termos em quatro grupos. A maioria dos termos apresenta relevâncias bem próximas, sendo os rótulos de maior relevância *mycorrhizal fungi* e *glomus*. O agrupamento verde compreende termos mais relacionados a utilização de musgos na fitorremediação, especialmente em estudos relacionados com a remediação de metais como, cádmio, chumbo, cobre e arsênio, sendo a água o principal meio remediado nos estudos (Papadia et al. 2020). Os agrupamentos azul e amarelo estão principalmente relacionados a utilização de fungos e bactérias nos processos de remediação, especialmente associados às raízes das plantas (Lu et al. 2020). O grupo vermelho apresenta mais termos associados aos metabolismos da fitorremediação, como fitoestabilização e fitoextração, além de estudos conduzidos a partir de experimentos em estufas e casas de vegetação utilizando biomassas florísticas e abordando as formas de transporte dos compostos nas mesmas (Matzen et al. 2020).

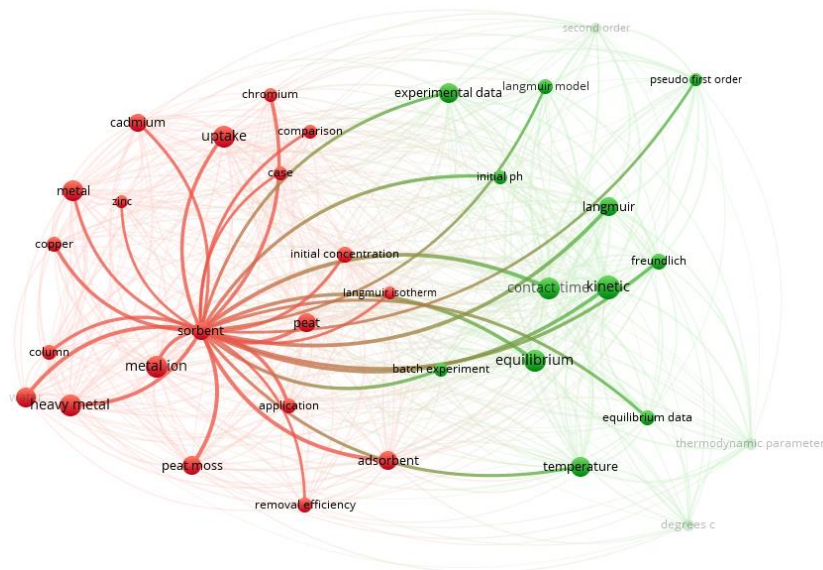
Na Figura 1b destacou-se o rótulo *moss* presente na figura anterior, a partir disso, é possível observar a associação deste termo com todos os itens do grupo verde, principalmente relacionados à remediação de metais na água (Sandhi et al. 2017), também sua ligação com experimentos em estufas e estudos que associam a eficiência conjunta de musgos, fungos micorrizais e bactérias (Mushtaq et al. 2020). Além de estudos sobre o funcionamento metabólico da remediação, fitoestabilização e fitoextração, os tecidos e

fatores de translocação em estudos que avaliam como os compostos agem na planta após a exposição (Bellini et al. 2020).

A busca pelas palavras-chave “*moss\* AND biosorption\**” resultou em um total de 140 resultados na base de dados *Web of Science*, em 17 de fevereiro de 2021, gerando assim um mapa de rede apresentado nas Figuras 2a e 2b.



**Figura 2a** - Mapa de visualização em rede gerado no *VOSviewer* a partir das palavras “*moss AND biosorption*” no banco de dados *Web of Science*. As cores representam os clusters dos termos extraídos, agrupados pelo software de acordo com suas relações.



**Figura 2b** - Seleção do termo “*sorbent*” no mapa bibliométrico e os itens relacionados ao termo gerado no *VOSviewer*.

Analisando a Figura 2a é possível observar que o *software* agrupou os termos em dois grupos, onde a maioria destes apresentam relevâncias bem próximas, sendo os rótulos mais relevantes *heavy metal*, *equilibrium*, *kinetic*, *peat moss* e *uptake*. O grupo verde compreende termos principalmente relacionados aos modelos de absorção/adsorção, como dinâmica e cinéticas de acumulação, modelos (Langmuir), equilíbrio e dados experimentais e experimentos em batelada. O grupo vermelho agrupa termos mais relacionados aos metais, como absorção, máxima capacidade de sorção, zinco, cobre, cádmio e cromo, e os tipos de experimentos e sorventes, compreendendo termos como resultados experimentais, musgos de turfa, eficiência de remoção e experimentos em coluna.

Considerando a forte relação entre os termos dos diferentes *clusters* agrupados pelo *software*, Ucarli et al. (2020), Žukauskaitė et al. (2019) e Wang et al. (2016) empregaram em seus estudos de adsorção o ajuste dos resultados através do modelo da isoterma de Langmuir, e também obtiveram melhor ajuste dos dados cinéticos através do modelo de pseudo-segunda ordem. Como adsorventes, Ucarli et al. (2020) e Žukauskaitė et al. (2019) testaram espécies de *peat moss*, enquanto Wang et al. (2016) utilizou carvão ativado modificado com ferro. Os metais destacados com maior relevância no mapa da Figura 2a foram testados nestes estudos e os tipos de experimentos empregados pelos autores Ucarli et al. (2020) e Wang et al. (2016) foram sistemas em batelada, enquanto Žukauskaitė et al. (2019) realizou experimentos em sistema contínuo em coluna de leito fixo preenchida com musgo.

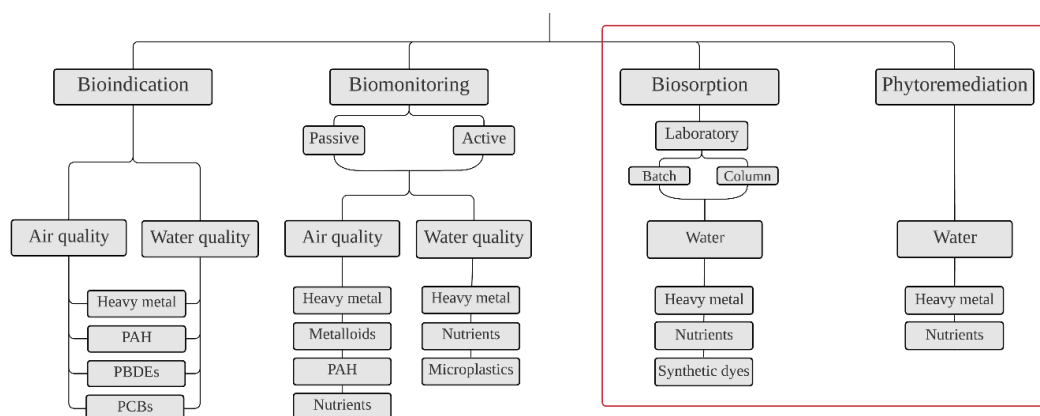
Na Figura 2b o termo “*sorbent*” foi selecionado e destacado devido sua importância relacionada à remoção de contaminantes, especialmente metálicos. Os mais relevantes e mais próximos termos do rótulo selecionado foram metal pesado, absorção, musgos de turfa, equilíbrio, cádmio e adsorvente.

Neste contexto, a maioria dos estudos que empregam sorventes apresentam experimentos em laboratório, em condições controladas e otimizadas para definir os melhores rendimentos. Kicsi et al. (2010b) e Balan et al. (2008; Balan et al. 2009) realizaram experimentos de adsorção em batelada, empregando musgos de turfa pertencentes ao gênero *Sphagnum*, na remoção dos metais zinco (Zn (II)), cromo (Cr (VI)) e Cd. Os dados de equilíbrio de sorção foram analisados usando as isotermas de Freundlich e Langmuir, e os três estudos apresentaram resultados de remoção próximos

a 100 %, demonstrando o grande potencial deste grupo na remoção de metais presentes em amostras de água.

### 3.3 Biossorção e Fitorremediação

Em relação à leitura e análise bibliográfica dos artigos científicos relacionados às fitorremediação e biossorção, a Figura 3 apresenta as principais aplicabilidades ambientais dos musgos, com destaque para os setores mencionados acima, considerando os ambientes ou sistemas, e contaminantes em que são mais frequentemente estudadas.



**Figura 3** - Aplicabilidade dos musgos (divisão Bryophyta) na bioindicação, biomonitoramento, biossorção e fitorremediação, considerando os principais ambientes, sistemas e contaminantes estudados, com destaque para o emprego nos setores de biossorção e fitorremediação.

Entre os representantes da divisão Bryophyta mais utilizados em estudos relacionados a biossorção e fitorremediação, destaca-se o emprego dos gêneros: *Hypnum*, *Fontinalis*, *Sphagnum*, *Leptodictyum* e *Vesicularia*.

#### 3.3.1 Biossorção

A biossorção é um processo em que materiais biológicos são empregados em mecanismos de adsorção, acumulação e enriquecimento para remoção de contaminantes, especialmente metais, em amostras aquosas (Hlihor et al. 2014; Rizzuti et al. 2017). Assim, o processo de biossorção é composto por interações eletrostáticas e formações de complexos entre íons e grupos funcionais presentes no material (Silva 2014).

No tratamento por adsorção, que é um processo físico-químico, com o emprego de musgos, os principais contaminantes removidos são corantes (Pipíška et al. 2018), compostos metálicos (Šušnovská et al. 2015) e nutrientes (Zhang et al. 2018). Nesse

processo, ocorre a transferência de massa e retenção de um ou mais constituintes de um soluto (adsorvato), presente em uma etapa fluída, na superfície de uma fase sólida e porosa (adsorvente) através de interações físicas e/ou químicas (Araújo et al. 2018; Nascimento et al. 2014).

A Tabela 1 apresenta uma compilação de dados considerando estudos que utilizaram musgos, musgos de turfeira, algas, plantas vasculares e também métodos físico-químicos na remoção de metais. A partir da exposição dos dados apresentados, observa-se que os estudos que empregaram amostras de musgos obtiveram capacidade de sorção dos metais maior do que outros bio sorventes. Também, apresentam desempenho próximo ou superior quando comparadas a métodos mais tradicionais que também são utilizados com frequência comercialmente.

Para um entendimento completo do potencial de bio sorção, a análise de todos os fatores que influenciam o processo é de grande importância. Entre estes, destacam-se as características do bio sorvente, as propriedades físico-químicas da solução (temperatura, pH, força iônica), as concentrações iniciais do soluto e de biomassa na solução (dosagem de bio sorvente/volume de solução), e também a especiação dos metais (Hlihor et al. 2014; Nascimento et al. 2014; Šušnovská et al. 2015).

Entre as vantagens que as briófitas apresentam em comparação a outros bio sorventes alternativos, sua alta relação superfície/volume e à presença de uma fina cutícula são importantes características que facilitam sua aplicação como bio sorventes e aumentam a capacidade de acumular contaminantes, especialmente metálicos (Basile et al. 2013).

Além disso, os musgos têm sido utilizados em biomonitoramentos relacionados à poluição das águas superficiais como bio indicadores e biomonitores (Favas et al. 2018), dada sua ampla distribuição geográfica e características que os tornam sensíveis aos poluentes ambientais. Nesse contexto, a biomassa de musgos representa um potencial bio sorvente para a remoção de contaminantes presentes em amostras de água e efluentes (Martins et al. 2014; Okoli et al. 2017; Šušnovská et al. 2015).

Entre as principais aplicabilidades das briófitas como bio sorventes, destaca-se seu emprego em experimentos de laboratório, em testes de batelada (Ozdes and Duran 2015) e também em fluxo contínuo (Žukauskaitė et al. 2019), especialmente em amostras

aquosas com abordagem focada principalmente na aplicação de biomassa seca (Olu-Owolabi et al. 2012; Sari et al. 2009).

De forma geral, a biomassa seca pode ser mais vantajosa em comparação à biomassa viva, pois não sofre efeito da toxicidade dos contaminantes, não necessita a adição de nutrientes e do monitoramento das demandas química e bioquímica de oxigênio em solução (Hlihor et al. 2014). No entanto, a biomassa úmida pode apresentar maior eficiência na remoção em curtos períodos de exposição, por sofrer ação de mecanismos de absorção e adsorção conjuntamente, enquanto a biomassa seca está sujeita apenas ao processo de adsorção (Sandhi et al. 2017).

**Tabela 1** - Comparação de diferentes materiais e métodos empregados na remoção de metais contaminantes presentes em amostras de água.

Material	Tipo/Espécie	Método	Contaminante	Concentração inicial	Capacidade de absorção	Eficiência de remoção	Referencia
Musgo	<i>Pleurozium schreberi</i>	Biosorção	Cu	0.08 mmol/dm <sup>3</sup>	0.030 mmol/g	37.2 %	Klos 2018
Alga de água doce	<i>Spirogyra</i> sp.			0.017 mmol/dm <sup>3</sup>	0.0031 mmol/g	18.23 %	
Musgo	<i>Sphagnum</i> sp.	Biosorção	Cu	16 mg/L	6.83 mg/g	85.4 %	Ivanova et al. 2016
				160 mg/L	30.16 mg/g	37.7 %	
Musgo	<i>Polytrichum commune</i>			16 mg/L	6.33 mg/g	79.5 %	
				160 mg/L	21.2 mg/g	39 %	
Alga	<i>Parachlorella kessleri</i>			16 mg/L	7.42 mg/g	92.8 %	
				160 mg/L	46 mg/g	57.5 %	
Trocador iônico comercial	Amberlite IR 120	Troca iônica		16 mg/L	7.4 mg/g	96.1 %	
				160 mg/L	71 mg/g	95.3%	
Turfa	Seis tipos de turfa	Biosorção	Cr	-	-	92-100 %	Rizzuti et al. 2017
Angiosperma	Mostarda	Biosorção	Cd	-	33.56 mg/g	80 %	Bulgariu et al. 2012
Fungo	<i>Aspergillus niger</i>	Bioliexiviação	Cu, Ni, Co, Mn, Fe	-	-	97% (Cu) 98% (Ni) 86% (Co) 91% (Mn) 36% (Fe)	Mehta et al. 2010
Resíduo cervejeiro	-	Biosorção	Cr	-	132.6 mg/g	-	Šillerová et al. 2013
Musgo de turfeira	-			-	154 mg/g	-	
Descarte produção uva	-			-	428 mg/g	-	
Serragem	-			-	46.7 mg/g	-	
Dolomita	-	Precipitação química	Fe, Cu	250 mg/L	-	98.4% (Fe) 3.18% (Cu)	Hu et al. 2020
Zeolita	Bimetallic Oxide Nano Fe-Al	Co-precipitação	Cr	20 mg/L	44.74 mg/g	89.5 %	Kong et al. 2020
Membrana de troca iônica	PVDF/SnNPs	Inversão de fase	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	8.5 mg/L	-	70.7% (Cd) 92.8% (Cu) 63.9% (Ni) 93.9% (Pb) 82.3% (Zn)	Ibrahim et al. 2020
Resina quelante	Resina quelante Fe(III)	Remoção seletiva	Fe	1248 ppb	1121.9 ppb/g	89.9%	Feng et al. 1997
Carvão ativado	Carvão ativado granular	Adsorção	Cr	5 mg/L	0.054 mg/g	97%	Souza et al. 2009
				20 mg/L		99%	



### 3.3.2 Fitorremediação

Fitorremediação refere-se ao uso de plantas na remediação de contaminantes através da remoção, degradação, armazenamento ou imobilização dos contaminantes de ambientes poluídos, redução dos teores destes a níveis seguros à saúde humana, e também ao ecossistema, atuando na melhoria das características físicas, químicas e biológicas destas áreas (Brum et al. 2012; Tavares 2013).

As plantas possuem uma enorme capacidade de absorver os poluentes do meio ambiente e realizar sua desintoxicação através de diversos mecanismos (Ali et al. 2013b). Assim, em comparação com outras técnicas de remediação, a fitorremediação é considerada como um método ecológico, mais econômico e sustentável e, em geral, não necessita de grandes volumes de absorventes e da adição de químicos (Hettick et al. 2015; Singh et al. 2015a; Haldar and Ghosh 2020b; Marella et al. 2020).

Na fitorremediação, os vegetais podem atuar de forma direta ou indireta na redução e/ou remoção dos contaminantes. Na remediação direta, os compostos são absorvidos e acumulados ou metabolizados nos tecidos, através da mineralização dos mesmos. Na forma indireta, os vegetais extraem contaminantes do ambiente, reduzindo assim a fonte de contaminação ou quando a presença de plantas propicia meio favorável ao aumento da atividade microbiana, que degrada o contaminante (Tavares 2013).

A capacidade de absorção dos poluentes ocorre através dos mecanismos de fitoextração (Shtangeeva et al. 2016), fitofiltração (Sandhi et al. 2017), fitotransformação (Li et al. 2016), fitovolatilização (Limmer and Burken 2016), fitodegradação (Al-baldawi et al. 2015), fitoestabilização (Pedro et al. 2013) e fitoestimulação (Hajabbasi et al. 2016). No entanto, a maioria destes mecanismos são estudados e reconhecidos principalmente em outros grupos de plantas não briofíticas.

Deste modo, poucos estudos já foram desenvolvidos com a aplicação de musgos na fitorremediação. De forma geral, a fitorremediação é um processo que envolve o metabolismo da planta e muitas vezes, também está associada a relações interespecíficas com outros seres vivos, como fungos que auxiliam na remoção dos poluentes e outras plantas na qual a espécie fitorremediadora pode se fixar.

Entre os trabalhos já desenvolvidos, os principais contaminantes fitorremediados por musgos são metais (Papadia et al. 2020) e nutrientes (Hallin et al. 2015). As principais espécies

empregadas nesse processo são *Warnstorfia fluitans* (Sandhi et al. 2018), *Sanionia uncinata* (Wojtuń et al. 2019) e *Leptodictyum riparium* (Bellini et al. 2020), e embora a fitorremediação seja uma técnica promissora e versátil, que pode ser empregada na remediação de contaminantes presentes no ar, solo e água, com o emprego de musgos a aplicação principal ocorre no ambiente aquático (Suzuki et al. 2016).

### **Conclusão e Perspectivas**

As aplicações ambientais dos musgos representam uma abordagem emergente e promissora para a recuperação de ambientes contaminados, especialmente relacionada ao seu uso como bioabsorventes e fitorremediadores.

A partir da análise bibliométrica e revisão da literatura pode-se perceber que os campos de pesquisa com utilização de musgos na bioabsorção e fitorremediação são áreas de crescente interesse que visam ampliar e aprimorar a aplicabilidade deste grupo na remoção de contaminantes, especialmente presentes na água.

## REFERÊNCIAS

- Abdel-Baki AS, Dkhil MA, Al-Quraishy S (2011) Bioaccumulation of some heavy metals in tilapia fish relevant to their concentration in water and sediment of Wadi Hanifah, Saudi Arabia. *African J Biotechnol* 10:2541–2547. <https://doi.org/10.5897/ajb10.1772>
- Agostini A De, Cortis P, Cogoni A (2020) Monitoring of Air Pollution by Moss Bags around an Oil Refinery : A Critical Evaluation over 16 Years. 1–14
- Aksu Z (1998) Biosorption of Heavy Metals by Microalgae in Batch
- Al-baldawi IA, Rozaimah S, Abdullah S, Anuar N (2015) Phytodegradation of total petroleum hydrocarbon ( TPH ) in diesel-contaminated water using *Scirpus grossus*. *Ecol Eng* 74:463–473. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.007>
- Ali H, Khan E, Anwar M (2013a) Chemosphere Phytoremediation of heavy metals — Concepts and applications. *Chemosphere* 91:869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Ali H, Khan E, Anwar M (2013b) Phytoremediation of heavy metals — Concepts and applications. *Chemosphere* 91:869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Ali S, Abbas Z, Rizwan M, et al (2020) Application of Floating Aquatic Plants in Phytoremediation of Heavy Metals Polluted Water : A Review. <https://doi.org/10.3390/su12051927>
- ANA AN de Á (2019) *Conjuntura Recursos Hídricos Brasil*. Brasília - DF
- Antunes A, Mello FT de, Arpini CA de A, et al (2016) Avaliação da potencialidade de adsorção da bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) para remoção de corante de meios aquosos. *Tecno-Lógica* 20:72–79. <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v20i2.6397>
- Araújo RCS, Costa RLT, Silva DF, et al (2018) Influência da granulometria do talo de açáí na adsorção do corante têxtil rodamina 6G em leito fixo
- Ares A, Aboal JR, Carballeira A, et al (2012) Moss bag biomonitoring: A methodological review. *Sci Total Environ* 432:143–158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.087>
- Ares Á, Itouga M, Kato Y, Sakakibara H (2017) Differential Metal Tolerance and Accumulation Patterns of Cd , Cu , Pb and Zn in the Liverwort *Marchantia polymorpha* L . *Bull Environ Contam Toxicol* 0:0. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2241-0>
- Arrieta AD (2018) O uso da halófito *Sarcocornia ambigua* (Michx.) M.A.Alonso & M.B.Crespo para fitorremediação de Tributilestanho (TBT) em sedimentos costeiros
- ATSDR A for TS and DR (2009) *Toxicological profile for Cadmium*. Atlanta, Georgia
- Balan C, Bilba D, Macoveanu M (2009) Sphagnum moss peat as a potential sorbent and reductant for chromium (VI) removal from aqueous solutions. *Cellul Chem Technol* 43:99–104
- Baldovi AA (2019) Influência do tempo de detenção hidráulica na remoção de nitrogênio e fósforo em sistema de alagados construídos cultivados com *Eichhornia crassipes*

- Barbosa F da S, Carvalho MAS (2016) Análise cienciométrica da utilização de briófitas como bioindicadores. *Cad Pesqui* 28:34–47
- Basile A, Sorbo S, Conte B, et al (2013) Ultrastructural changes and Heat Shock Proteins 70 induced by atmospheric pollution are similar to the effects observed under in vitro heavy metals stress in *Conocephalum conicum* ( Marchantiales e Bryophyta ). *Environ Pollut* 182:209–216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.014>
- Bellini E, Maresca V, Betti C, et al (2020) The Moss *Leptodictyum riparium* Counteracts Severe Cadmium Stress by Activation of Glutathione Transferase and Phytochelatin Synthase , but Slightly by Phytochelatin. <https://doi.org/10.3390/ijms21051583>
- Benassi RF, Subtil EL, Coelho LH, De Jesus TA (2018) Manual de sistemas de Wetlands construídas para o tratamento de esgotos sanitário: implantação, operação e manutenção. Editora UFABC, São Paulo
- Bertacco TDC, Ceron LP, Liks LA dos S (2019) Verification of adsorption capacity of rice husk ash in continuous flow hexavalent chromium effluent. *Engevista* 21:114–125
- Brum J, Buzinari N, Ferraz S, Polidoro T (2012) Biorremediação e Fitorremediação. 1–31
- Bulgariu L (2012) Characteristics of sorption of uncomplexed and complexed Pb ( II ) from aqueous solutions onto peat. 66:239–247. <https://doi.org/10.2478/s11696-012-0149-z>
- Bulgariu L, Hlihor R, Bulgariu D, Gavrilesu M (2012) Sorptive removal of cadmium (II) ions from aqueous solution by mustard biomass. *Environ Eng Manegement J* 11:1969–1976. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.246>
- Bulgariu L, Ratoi M, Bulgariu D, Macoveanu M (2009) Adsorption potential of mercury (II) from aqueous solutions onto Romanian peat moss. *J Environ Sci Heal , Part A Toxic / Hazard Subst Environ Eng* 44:700–706. <https://doi.org/10.1080/10934520902847836>
- CBRT C de G da BH do RT (2005) Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí - Relatório da Bacia do Tramandaí
- Chaves EV (2008) Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de manaus pelas espécies de plantas *Senna multijuca*, *Schizolobium amazonicum* E *Caesalpinia echinata*
- Cohen T, Hee SSQ, Ambrose RF (2001) Trace metals in fish and invertebrates of three California Coastal Wetlands. *Mar Pollut Bull* 42:224–232. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00146-6)
- Costa CR, Olivi P, Botta CMR, Espindola ELG (2008) A toxicidade em Ambientes Aquáticos: discussão e métodos de Avaliação. *Quim Nova* 31:1820–1830
- Crum, H., Buck WR (1988) A contribution to the Sphagnum (Sphagnaceae) flora of Paraguay. *Brittonia* 188–194
- D. M. Ruthven (1984) Principals of Adsorption and Adsorption Processes
- Dariva FG (2011) Qualidade da água para consumo humano e seus resíduos em Tramandaí, RS

- De Souza MP, Hoeltz M, Benitez LB, et al (2019) Microalgae and Clean Technologies: A Review. *Clean Soil Water* 1–18. <https://doi.org/10.1002/clen.201800380>
- Debén S, Aboal JR, Carballeira A, et al (2017) Monitoring river water quality with transplanted bryophytes : A methodological review. *Ecol Indic* 81:461–470. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.014>
- Eck NJ Van, Waltman L (2019) VOSviewer Manual
- Favas PJC, Pratas J, Rodrigues N, et al (2018) Chemosphere Metal(loid ) accumulation in aquatic plants of a mining area: Potential for water quality biomonitoring and biogeochemical prospecting. *Chemosphere* 194:158–170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.139>
- Feng M, Mei J, Hu S, et al (1997) Selective removal of iron from grape juice using an iron (III) chelating resin. *Sep Purif Technol* 11:127–135
- Frahm J-P (2003) *Manual of Tropical Bryology*
- Galli CS, Abe DS (2010) Disponibilidade, poluição e eutrofização das águas. In: BICUDO CE de M., TUNDISI JG., SCHEUENSTUHL MCB (ORG). (eds) *Águas do Brasil - Análise Estratégica*, 1ª. Instituto de Botânica, São Paulo, pp 165–174
- Gerdol R, Bragazza L, Marchesini R, et al (2002) Use of moss (*Tortula muralis* Hedw.) for monitoring organic and inorganic air pollution in urban and rural sites in Northern Italy. *Atmos Environ* 36:4069–4075. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00298-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00298-4)
- Gutberlet J (1989) Uso de *Sphagnum recurvum* P. Beauv. como biofiltro no monitoramento de poluição aérea industrial de metais pesados. *Acta Bot Brasilica* 2:103–114
- Haddaway NR, McConville J, Piniewski M (2018) How is the term ‘ ecotechnology ’ used in the research literature? A systematic review with thematic synthesis. *Ecohydrol Hydrobiol*. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.06.008>
- Hajabbasi MA, Zamani J, Asadollahi A, Schulin R (2016) Using maize (*Zea mays* L.) and sewage sludge to remediate a petroleum contaminated calcareous soil. *Soil Sediment Contam An Int J* 1–30. <https://doi.org/10.1080/15320383.2016.1085835>
- Haldar S, Ghosh A (2020a) Microbial and plant - assisted heavy metal remediation in aquatic ecosystems : a comprehensive review. *3 Biotech* 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02195-4>
- Haldar S, Ghosh A (2020b) Microbial and plant-assisted heavy metal remediation in aquatic ecosystems: a comprehensive review. *3 Biotech* 10:1–13. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02195-4>
- Hallin S, Hellman M, Choudhury MI, Ecke F (2015) Relative importance of plant uptake and plant associated denitrification for removal of nitrogen from mine drainage in sub-arctic wetlands. *Water Res*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.060>
- Haynes A, Popek R, Boles M, et al (2019) Roadside Moss Turfs in South East Australia Capture More Particulate Matter Along an Urban Gradient than a Common Native Tree Species. *Atmosphere (Basel)* 10:1–16. <https://doi.org/doi:10.3390/atmos10040224>

- Hettick BE, Can JE, French AD, Klein DM (2015) Arsenic: A Review of the Element ' s Toxicity, Plant Interactions, and Potential Methods of Remediation. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02487>
- Hlihor RM, Sobariu DL, Diaconu M, et al (2014) RECENT ADVANCES IN BIOSORPTION OF HEAVY METALS: SUPPORT TOOLS FOR BIOSORPTION EQUILIBRIUM, KINETICS AND MECHANISM. *Rev Roum Chim* 59:527–538
- Hu H, Zhang Q, Li X, et al (2020) Efficient heterogeneous precipitation and separation of iron in copper-containing solution using dolomite. *Sep Purif Technol* 248:117–121. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117021>
- Hu J, Wu S, Wu F, et al (2013) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance both absorption and stabilization of Cd by Alfred stonecrop (*Sedum alfredii* Hance) and perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) in a Cd-contaminated acidic soil. *Chemosphere* 93:1359–1365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.089>
- IARC IA for R on C (2016) Iron
- Ibrahim Y, Naddeo V, Banat F, Hasan SW (2020) Preparation of Novel Polyvinylidene fluoride (PVDF)-Tin(IV) Oxide (SnO<sub>2</sub>) Ion Exchange Mixed Matrix Membranes for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions. *Sep Purif Technol*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117250>
- Ivanova D, Sedlakova-kadukova J, Kavulicová J (2016) Comparison of biosorbents and ion-exchanger efficiency for copper ions removal. *J os Polish Miner Eng Soc* 129–133
- Kicsi A, Bilba D, Macoveanu M (2010a) Equilibrium and kinetic modeling of Zn (II) sorption from aqueous solutions by Sphagnum moss peat. *Environ Eng Manegement J* 9:341–349
- Kicsi A, Cojocaru C, Macoveanu M, Bilba D (2010b) Response surface methodology applied for zinc removal from aqueous solutions using Sphagnum peat moss as sorbent. *J Environ Prot Ecol* 11:614–622
- Kilubi I (2016) Investigating current paradigms in supply chain risk management - A bibliometric study. *Bus Process Manag J* 22:662–692
- Klos A (2018) DETERMINATION OF SORPTION PROPERTIES OF HEAVY METALS IN VARIOUS BIOSORBENTS. *Ecol Chem Eng S* 25:201–216. <https://doi.org/10.1515/eces-2018-0013>
- Klos A, Rajfur M, Waclawek M (2011) Application of enrichment factor (EF) to the interpretation of results from the biomonitoring studies. *Ecol Chem Eng* 18:171–183
- Kong F, Zhang Y, Wang H, et al (2020) Removal of Cr (VI) from wastewater by artificial zeolite spheres loaded with nano Fe e Al bimetallic oxide in constructed wetland. *Chemosphere* 257:. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127224>
- Kronstedt E (1981) Anatomy of *Ricciocarpus natans* ( L . ) Corda , Studied by Scanning Electron Microscopy. 817–827
- Li Y, Zhang J, Zhu G, et al (2016) Phytoextraction, phytotransformation and rhizodegradation of ibuprofen associated with *Typha angustifolia* in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Water Res* 102:294–304.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.049>

- Limmer MA, Burken JG (2016) Phytovolatilization of Organic Contaminants. *Environ Sci Technol* 1–40. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04113>
- Limo J, Paturi P, Mäkinen J (2018) Magnetic biomonitoring with moss bags to assess stop-and-go traffic induced particulate matter and heavy metal concentrations. *Atmos Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.062>
- Long D (2010) *Ricciocarpos natans*. In: *Mosses and Liverworts of Britain and Ireland: A Field Guide*. p 260
- López J, Carballeira A (1993) Interspecific differences in metal bioaccumulation and plant-water concentration ratios in five aquatic bryophytes. *Hydrobiologia* 263:95–107. <https://doi.org/10.1007/BF00006206>
- Lu R, Hu Z, Zhang Q, et al (2020) The effect of *Funneliformis mosseae* on the plant growth, Cd translocation and accumulation in the new Cd-hyperaccumulator *Sphagneticola calendulacea*. *Ecotoxicol Environ Saf* 203:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110988>
- Maghri I, Kenz A, Elkouali M, et al (2012) Textile Dyes removal from industrial waste water by *mytilus edulis* shells. *J Mater Res* 3:121–136
- Marella TK, Saxena A, Tiwari A (2020) Diatom mediated heavy metal remediation: a review. *Bioresour Technol* 123068. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123068>
- Martins RJE (2004) *Acumulação e Liberação de Metais Pesados por Briófitas Aquáticas*. Universidade do Porto
- Martins RJE, Vilar VJP, Boaventura RAR (2014) Kinetic modelling of Cadmium and Lead removal by aquatic mosses. *Brazilian J Chem Eng* 31:229–242
- Matzen S, Fakra S, Nico P, Pallud C (2020) *Pteris vittata* Arsenic Accumulation Only Partially Explains Soil Arsenic Depletion during Field-Scale Phytoextraction. *Soil Syst* 71:1–20. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040071>
- Mehta KD, Das C, Pandey BD (2010) Leaching of copper, nickel and cobalt from Indian Ocean manganese nodules by *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy* 105:89–95. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.08.002>
- Mendonca VGB, Sobrinho MAM, Pernambuco UF De, Sucroalcooleira DT (2016) Descontaminação de efluentes industriais por bioissorção com algas verdes encontradas no litoral nordestino
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, et al (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med* 6:e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mota JD, Cunha RSS, Rodrigues MGF (2015) Análise estatística da adsorção de íons Pb<sup>2+</sup> pela argila chocolate B (natural e modificada) avaliando os efeitos da concentração inicial e pH em sistema de banho finito
- Mushtaq MU, Iqbal A, Nawaz I, et al (2020) Enhanced uptake of Cd, Cr, and Cu in

- Catharanthus roseus (L.) G. Don by Bacillus cereus: application of moss and compost to reduce metal availability. *Environ Sci Pollut Res*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-020-08839-5>
- Nascimento RF, Lima ACA, Vidal CB, et al (2014) ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais
- Okoli CP, Diagboya PN, Anigbogu IO, et al (2017) Competitive biosorption of Pb (II) and Cd (II) ions from aqueous solutions using chemically modified moss biomass (*Barbula lambarenensis*). *Environ Earth Sci* 76:1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6368-9>
- Olu-Owolabi BI, Diagboya PN, Ebaddan WC (2012) Mechanism of Pb<sup>2+</sup> removal from aqueous solution using a nonliving moss biomass. *Chem Eng J* 195–196:270–275. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.004>
- Ozdes D, Duran C (2015) Equilibrium , Kinetics , and Thermodynamic Evaluation of Mercury (II) Removal from Aqueous Solutions by Moss (*Homalothecium sericeum*) Biomass. *Environ Prog Sustain Energy* 34:1620–1628. <https://doi.org/10.1002/ep>
- Palma-Silva C, Albertoni EF, Trindade CR, et al (2012) Uso de *Eichhornia crassipes* para fitorremediação de ambientes eutrofizados subtropicais no sul do Brasil. *Perspectiva* 36:73–81
- Papadia P, Barozzi F, Migoni D, et al (2020) Aquatic Mosses as Adaptable Bio-Filters for Heavy Metal Removal from Contaminated Water. *Int J Mol Sci* 21:1–14
- Pedro CA, Santos MSS, Ferreira SMF, Gonçalves SC (2013) The influence of cadmium contamination and salinity on the survival , growth and phytoremediation capacity of the saltmarsh plant *Salicornia ramosissima*. *Mar Environ Res* 92:197–205. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.09.018>
- Pi N, Ng JZ, Kelly BC (2017) Bioaccumulation of pharmaceutically active compounds and endocrine disrupting chemicals in aquatic macrophytes : Results of hydroponic experiments with *Echinodorus horemanii* and *Eichhornia crassipes*. *Sci Total Environ* 602:812–820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.137>
- Pipíška M, Valica M, Partelová D, et al (2018) Removal of Synthetic Dyes by Dried Biomass of Freshwater Moss *Vesicularia Dubyana*: A Batch Biosorption Study. *Environments* 5:1–12. <https://doi.org/10.3390/environments5010010>
- Pires KAD, Lacerda NM, Paniagua CE da S, Amorim E (2009) Estudo das capacidades de adsorção dos metais pesados Cd, Cu, Cr e Pb sobre adsorventes naturais (*Moringa oleifera* e argila) – Efeito da massa do adsorvente, do tempo de contato e sinergia. In: IX ENCONTRO INTERNO & XIII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. pp 1–10
- Ravikumar K, Krishnan S, Ramalingam S, Balu K (2007) Optimization of process variables by the application of response surface methodology for dye removal using a novel adsorbent. 72:66–74. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.07.018>
- Rebello FM, Caldas ED (2016) Arsenic, lead, mercury and cadmium: Toxicity, levels in breast milk and the risks for breastfed infants. *Environ Res* 151:671–688. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.027>



- Rizzuti AM, Newkirk CR, Wilson KA, et al (2017) Biosorption of hexavalent chromium from aqueous solutions using highly characterised peats. *Int Mire Conserv Gr Int Peatl Soc* 19:1–10. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.248>
- Rocha CHB, Ferreira R da C, Alonso M, Oliveira M de (2018) Capacidade de resiliência da represa de São Pedro, Juiz de Fora (MG), Brazil. 1–10
- Sandhi A, Landberg T, Greger M (2017) Phytofiltration of arsenic by aquatic moss (*Warnstorfiافلuitans*). *Environ Pollut* 2:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.038>
- Sandhi A, Landberg T, Greger M (2018) Effect of pH, temperature, and oxygenation on arsenic phytofiltration by aquatic moss (*Warnstorfiافلuitans*). *J Environ Chem Eng*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.044>
- Sari A, Mendil D, Tuzen M, Soylak M (2009) Biosorption of palladium (II) from aqueous solution by moss (*Racomitrium lanuginosum*) biomass: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *J Hazard Mater* 162:874–879. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.112>
- Saxena DK, Srivastava HS (2002) The influence of glutathione on physiological effects of lead and its accumulation in moss. 351–361
- Shtangeeva I, Niemelä M, Perämäki P, et al (2016) Phytoextraction of bromine from contaminated soil. *J Geochemical Explor* 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.03.012>
- Shvetsova MS, Kamanina IZ, Frontasyeva M V, et al (2019) Active Moss Biomonitoring Using the “Moss Bag Technique” in the Park of Moscow. *Phys Part Nucleu Lett* 16:994–1003. <https://doi.org/10.1134/S1547477119060293>
- Šillerová H, Komárek M, Chrastný V, et al (2013) Brewers draff as a new low-cost sorbent for chromium (VI): Comparison with other biosorbents. *J Colloid Interface Sci* 396:227–233. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.029>
- Silva LM (2011) Metais pesados em tecidos de *Chelonia mydas* encalhadas no Litoral do Rio Grande do Sul, Brasil
- Silva NCR (2014) Utilização da casca de banana como biossorvente para adsorção de Chumbo(II) em solução aquosa. Universidade Tecnológica Federal do Pará
- Singh R, Gautam N, Mishra A, Gupta R (2011) Heavy metals and living systems : An overview. 43:. <https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505>
- Singh R, Singh S, Parihar P, et al (2015a) Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicol Environ Saf* 112:247–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>
- Singh R, Singh S, Parihar P, Pratap V (2015b) Ecotoxicology and Environmental Safety Arsenic contamination , consequences and remediation techniques : A review. *Ecotoxicol Environ Saf* 112:247–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>
- Souza RS, Carvalho SML, Garcia Júnior MRL, Sena RSF (2009) Adsorção de cromo (VI) por carvão ativado granular de soluções diluídas utilizando um sistema batelada sob pH controlado. *Acta Amaz* 39:661–668

- Ștefănuț S, Öllerer K, Manole A, et al (2019) National environmental quality assessment and monitoring of atmospheric heavy metal pollution - A moss bag approach. *J Environ Manage* 248:109–224. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.125>
- Šušnovská A, Hasíková V, Horník M, et al (2015) Removal of Cd by dried biomass of freshwater moss *Vesicularia dubyana*: batch and column studies. *Desalin Wter Treat* 1–12. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1026281>
- Suresh Kumar K, Dahms HU, Won EJ, et al (2015) Microalgae - A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicol Environ Saf* 113:329–352. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>
- Suzuki Y, Takenaka C, Tomioka R, et al (2016) Accumulation of Arsenic and Copper by Bryophytes Growing in an Aquatic Environment near Copper Mine Tailings. *Mine Water Environ* 35:265–272. <https://doi.org/10.1007/s10230-015-0335-7>
- Tavares SR de L (2013) Técnicas de Remediação. In: Remediação de Solos e Águas Contaminadas Por Metais Pesados: Conceitos Básicos e Fundamentos. Embrapa Solos (CNPQ), Rio de Janeiro, pp 61–89
- Tesser TT, Bordin J, Rocha CM Da, Silva A Da (2021) Application of the dry and wet biomass of bryophytes for phytoremediation of metals : Batch experiments. *Environ Challenges* 5:100382. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100382>
- Ucarli O, Yayintas O, Engin MS, et al (2020) Investigation of competitive and non-competitive adsorption of some heavy metal on *Leucodon sciuroides* (Hedw.) Schwägr. *Langmuir* 1–23. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01403>
- Vanderpoorten A, Goffinet B (2009) Introduction to Bryophytes. Cambridge University Press
- Vukojevic V, Sabovljevic M, Jovanovic S (2005) Mosses accumulate heavy metals from the substrata of coal ash. *Arch Biol Sci* 57:101–106
- Wang Y, Liu Q, Shu L, et al (2016) Removal of Cr (VI) from aqueous solution using Fe-modified activated carbon prepared from luffa sponge: kinetic, thermodynamic, and isotherm studies. *Desalin Water Treat* 13:1–12. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1185745>
- Wehr JD, Whitton BA (1986) Ecological factors relating to morphological variation in the aquatic moss *Rhynchostegium riparioides* (Hedw.) C. Jens. *J Bryol* 14:269–280. <https://doi.org/10.1179/jbr.1986.14.2.269>
- WHO WHO (2013) Inorganic Chromium (VI) Compounds
- WHO WHO (2017) 571. Iron. In: Food Addit. Ser. 18. <http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v18je18.htm>. Accessed 27 Nov 2022
- Wojtuń B, Polechońska L, Pech P, et al (2019) *Sanionia uncinata* and *Salix polaris* as bioindicators of trace element pollution in the High Arctic: a case study at Longyearbyen, Spitsbergen, Norway. *Polar Biol* 42:1287–1297. <https://doi.org/10.1007/s00300-019-02517-0>
- Wu F, Yu X, Wu S, Wong M (2014) Effects of Inoculation of PAH-degrading Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Responses of Ryegrass to Phenanthrene and Pyrene.

- Int J Phytoremediation 16:109–122. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.759526>
- Wu FY, Ye ZH, Wu SC, Wong MH (2007) Metal accumulation and arbuscular mycorrhizal status in metallicolous and nonmetallicolous populations of *Pteris vittata* L. and *Sedum alfredii* Hance. *Planta* 226:1363–1378. <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0575-2>
- Wu X, Cobbina SJ, Mao G, et al (2016) A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment. *Environ Sci Pollut Res* 8244–8259. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6333-x>
- Xu J, Garcia A, Lagerkvist A, et al (2015) Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil. *Environ Int* 74:42–53. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.007>
- Xu YY, Zhen YY, Yu J, et al (2012) Experimental Studies on the Potential of Two Terrestrial Mosses in Monitoring Water Contaminated by Cd and Cr. 21:1453–1459
- Zechmeister HG, Grodzi K, Ł GS- (2003) Bryophytes
- Zhang Q, Ding C, Achal V, et al (2014) Potential for nutrient removal by integrated remediation methods in a eutrophicated artificial lake – a case study in Dishui Lake, Lingang New City, China. *Water Sci Technol* 70:2031–2040. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.453>
- Zhang R, Leiviskä T, Taskila S, Tanskanen J (2018) Iron-loaded *Sphagnum* moss extract residue for phosphate removal. *J Environ Manage* 218:271–279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.055>
- Žukauskaitė Z, Lukšienė B, Filistovič V, et al (2019) Experimental and modelling studies of radiocesium sorption/desorption processes in the fixed-bed moss column. *J Environ Radioact* 203:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.007>
- (2008) REMOVAL OF CADMIUM ( II ) FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY SPHAGNUM MOSS PEAT : EQUILIBRIUM STUDY. 7:2008

## 5. CAPÍTULO 2 – Texto parcial

Formatado de acordo com as normas da revista *Environmental Science and Pollution Research* (ESPR).

### **Remoção de metais em experimentos de batelada utilizando as briófitas**

#### ***Sphagnum perichaetiale e Ricciocarpus natans***

TESSER, T.T.<sup>1\*</sup>, RODRIGUES, L. H. R.<sup>1</sup>, DA ROCHA, C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, RS - Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos. Imbé, RS – Brasil

\*ttessorres@gmail.com

Keywords: biosorption; moss; hepatic; adsorbent, phytoremediation

## REFERÊNCIAS

- Abdel-Baki AS, Dkhil MA, Al-Quraishy S (2011) Bioaccumulation of some heavy metals in tilapia fish relevant to their concentration in water and sediment of Wadi Hanifah, Saudi Arabia. *African J Biotechnol* 10:2541–2547. <https://doi.org/10.5897/ajb10.1772>
- Agostini A De, Cortis P, Cogoni A (2020) Monitoring of Air Pollution by Moss Bags around an Oil Refinery : A Critical Evaluation over 16 Years. 1–14
- Aksu Z (1998) Biosorption of Heavy Metals by Microalgae in Batch
- Al-baldawi IA, Rozaimah S, Abdullah S, Anuar N (2015) Phytodegradation of total petroleum hydrocarbon ( TPH ) in diesel-contaminated water using *Scirpus grossus*. *Ecol Eng* 74:463–473. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.007>
- Ali H, Khan E, Anwar M (2013a) Chemosphere Phytoremediation of heavy metals — Concepts and applications. *Chemosphere* 91:869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Ali H, Khan E, Anwar M (2013b) Phytoremediation of heavy metals — Concepts and applications. *Chemosphere* 91:869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Ali S, Abbas Z, Rizwan M, et al (2020) Application of Floating Aquatic Plants in Phytoremediation of Heavy Metals Polluted Water : A Review. <https://doi.org/10.3390/su12051927>
- ANA AN de Á (2019) Conjuntura Recursos Hídricos Brasil. Brasília - DF
- Antunes A, Mello FT de, Arpini CA de A, et al (2016) Avaliação da potencialidade de adsorção da bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) para remoção de corante de meios aquosos. *Tecno-Lógica* 20:72–79. <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v20i2.6397>
- Araújo RCS, Costa RLT, Silva DF, et al (2018) Influência da granulometria do talo de açaí na adsorção do corante têxtil rodamina 6G em leito fixo
- Ares A, Aboal JR, Carballeira A, et al (2012) Moss bag biomonitoring: A methodological review. *Sci Total Environ* 432:143–158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.087>
- Ares Á, Itouga M, Kato Y, Sakakibara H (2017) Differential Metal Tolerance and Accumulation Patterns of Cd , Cu , Pb and Zn in the Liverwort *Marchantia polymorpha* L . *Bull Environ Contam Toxicol* 0:0. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2241-0>
- Arrieta AD (2018) O uso da halófito *Sarcocornia ambigua* (Michx.) M.A.Alonso & M.B.Crespo para fitorremediação de Tributilestanho (TBT) em sedimentos costeiros
- ATSDR A for TS and DR (2009) Toxicological profile for Cadmium. Atlanta, Georgia

- Balan C, Bilba D, Macoveanu M (2009) Sphagnum moss peat as a potential sorbent and reductant for chromium (VI) removal from aqueous solutions. *Cellul Chem Technol* 43:99–104
- Baldovi AA (2019) Influência do tempo de detenção hidráulica na remoção de nitrogênio e fósforo em sistema de alagados construídos cultivados com *Eichhornia crassipes*
- Barbosa F da S, Carvalho MAS (2016) Análise cienciométrica da utilização de briófitas como bioindicadores. *Cad Pesqui* 28:34–47
- Basile A, Sorbo S, Conte B, et al (2013) Ultrastructural changes and Heat Shock Proteins 70 induced by atmospheric pollution are similar to the effects observed under in vitro heavy metals stress in *Conocephalum conicum* ( Marchantiales e Bryophyta ). *Environ Pollut* 182:209–216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.014>
- Bellini E, Maresca V, Betti C, et al (2020) The Moss *Leptodictyum riparium* Counteracts Severe Cadmium Stress by Activation of Glutathione Transferase and Phytochelatin Synthase , but Slightly by Phytochelatins. <https://doi.org/10.3390/ijms21051583>
- Benassi RF, Subtil EL, Coelho LH, De Jesus TA (2018) Manual de sistemas de Wetlands construídas para o tratamento de esgotos sanitário: implantação, operação e manutenção. Editora UFABC, São Paulo
- Bertacco TDC, Ceron LP, Liks LA dos S (2019) Verification of adsorption capacity of rice husk ash in continuous flow hexavalent chromium effluent. *Engevista* 21:114–125
- Brum J, Buzinari N, Ferraz S, Polidoro T (2012) Biorremediação e Fitorremediação. 1–31
- Bulgariu L (2012) Characteristics of sorption of uncomplexed and complexed Pb ( II ) from aqueous solutions onto peat. 66:239–247. <https://doi.org/10.2478/s11696-012-0149-z>
- Bulgariu L, Hlihor R, Bulgariu D, Gavrilescu M (2012) Sorptive removal of cadmium (II) ions from aqueous solution by mustard biomass. *Environ Eng Manegement J* 11:1969–1976. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.246>
- Bulgariu L, Ratoi M, Bulgariu D, Macoveanu M (2009) Adsorption potential of mercury (II) from aqueous solutions onto Romanian peat moss. *J Environ Sci Heal , Part A Toxic / Hazard Subst Environ Eng* 44:700–706. <https://doi.org/10.1080/10934520902847836>
- CBRT C de G da BH do RT (2005) Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí - Relatório da Bacia do Tramandaí
- Chaves EV (2008) Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de plantas *Senna multijuca*, *Schizolobium amazonicum* e *Caesalpinia echinata*

- Cohen T, Hee SSQ, Ambrose RF (2001) Trace metals in fish and invertebrates of three California Coastal Wetlands. *Mar Pollut Bull* 42:224–232.  
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00146-6)
- Costa CR, Olivi P, Botta CMR, Espindola ELG (2008) A toxicidade em Ambientes Aquáticos: discussão e métodos de Avaliação. *Quim Nova* 31:1820–1830
- Crum, H., Buck WR (1988) A contribution to the Sphagnum (Sphagnaceae) flora of Paraguay. *Brittonia* 188–194
- D. M. Ruthven (1984) *Principals of Adsorption and Adsorption Processes*
- Dariva FG (2011) *Qualidade da água para consumo humano e seus resíduos em Tramandaí, RS*
- De Souza MP, Hoeltz M, Benitez LB, et al (2019) Microalgae and Clean Technologies: A Review. *Clean Soil Water* 1–18. <https://doi.org/10.1002/clen.201800380>
- Debén S, Aboal JR, Carballeira A, et al (2017) Monitoring river water quality with transplanted bryophytes : A methodological review. *Ecol Indic* 81:461–470.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.014>
- Eck NJ Van, Waltman L (2019) *VOSviewer Manual*
- Favas PJC, Pratas J, Rodrigues N, et al (2018) Chemosphere Metal(loid ) accumulation in aquatic plants of a mining area: Potential for water quality biomonitoring and biogeochemical prospecting. *Chemosphere* 194:158–170.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.139>
- Feng M, Mei J, Hu S, et al (1997) Selective removal of iron from grape juice using an iron (III) chelating resin. *Sep Purif Technol* 11:127–135
- Frahm J-P (2003) *Manual of Tropical Bryology*
- Galli CS, Abe DS (2010) Disponibilidade, poluição e eutrofização das águas. In: BICUDO CE de M., TUNDISI JG., SCHEUENSTUHL MCB (ORG). (eds) *Águas do Brasil - Análise Estratégica*, 1ª. Instituto de Botânica, São Paulo, pp 165–174
- Gerdol R, Bragazza L, Marchesini R, et al (2002) Use of moss (*Tortula muralis* Hedw.) for monitoring organic and inorganic air pollution in urban and rural sites in Northern Italy. *Atmos Environ* 36:4069–4075. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00298-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00298-4)
- Gutberlet J (1989) Uso de *Sphagnum recurvum* P. Beauv. como biofiltro no monitoramento de poluição aérea industrial de metais pesados. *Acta Bot Brasilica* 2:103–114
- Haddaway NR, McConville J, Piniewski M (2018) How is the term ‘ ecotechnology ’ used in the research literature? A systematic review with thematic synthesis. *Ecohydrol*

- Hydrobiol. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.06.008>
- Hajabbasi MA, Zamani J, Asadollahi A, Schulin R (2016) Using maize (*Zea mays* L.) and sewage sludge to remediate a petroleum contaminated calcareous soil. *Soil Sediment Contam An Int J* 1–30. <https://doi.org/10.1080/15320383.2016.1085835>
- Haldar S, Ghosh A (2020a) Microbial and plant - assisted heavy metal remediation in aquatic ecosystems : a comprehensive review. *3 Biotech* 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02195-4>
- Haldar S, Ghosh A (2020b) Microbial and plant-assisted heavy metal remediation in aquatic ecosystems: a comprehensive review. *3 Biotech* 10:1–13. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02195-4>
- Hallin S, Hellman M, Choudhury MI, Ecke F (2015) Relative importance of plant uptake and plant associated denitrification for removal of nitrogen from mine drainage in sub-arctic wetlands. *Water Res.* <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.060>
- Haynes A, Popek R, Boles M, et al (2019) Roadside Moss Turfs in South East Australia Capture More Particulate Matter Along an Urban Gradient than a Common Native Tree Species. *Atmosphere (Basel)* 10:1–16. <https://doi.org/doi:10.3390/atmos10040224>
- Hettick BE, Can JE, French AD, Klein DM (2015) Arsenic: A Review of the Element ' s Toxicity, Plant Interactions, and Potential Methods of Remediation. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02487>
- Hlihor RM, Sobariu DL, Diaconu M, et al (2014) RECENT ADVANCES IN BIOSORPTION OF HEAVY METALS: SUPPORT TOOLS FOR BIOSORPTION EQUILIBRIUM, KINETICS AND MECHANISM. *Rev Roum Chim* 59:527–538
- Hu H, Zhang Q, Li X, et al (2020) Efficient heterogeneous precipitation and separation of iron in copper-containing solution using dolomite. *Sep Purif Technol* 248:117–121. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117021>
- Hu J, Wu S, Wu F, et al (2013) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance both absorption and stabilization of Cd by Alfred stonecrop (*Sedum alfredii* Hance) and perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) in a Cd-contaminated acidic soil. *Chemosphere* 93:1359–1365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.089>
- IARC IA for R on C (2016) Iron
- Ibrahim Y, Naddeo V, Banat F, Hasan SW (2020) Preparation of Novel Polyvinylidene fluoride (PVDF)-Tin(IV) Oxide (SnO<sub>2</sub>) Ion Exchange Mixed Matrix Membranes for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions. *Sep Purif Technol.*



- <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117250>
- Ivanova D, Sedlakova-kadukova J, Kavulicová J (2016) Comparison of biosorbents and ion-exchanger efficiency for copper ions removal. *J os Polish Miner Eng Soc* 129–133
- Kicsi A, Bilba D, Macoveanu M (2010a) Equilibrium and kinetic modeling of Zn (II) sorption from aqueous solutions by Sphagnum moss peat. *Environ Eng Manegement J* 9:341–349
- Kicsi A, Cojocar C, Macoveanu M, Bilba D (2010b) Response surface methodology applied for zinc removal from aqueous solutions using Sphagnum peat moss as sorbent. *J Environ Prot Ecol* 11:614–622
- Kilubi I (2016) Investigating current paradigms in supply chain risk management - A bibliometric study. *Bus Process Manag J* 22:662–692
- Klos A (2018) DETERMINATION OF SORPTION PROPERTIES OF HEAVY METALS IN VARIOUS BIOSORBENTS. *Ecol Chem Eng S* 25:201–216.  
<https://doi.org/10.1515/eces-2018-0013>
- Klos A, Rajfur M, Waclawek M (2011) Application of enrichment factor (EF) to the interpretation of results from the biomonitoring studies. *Ecol Chem Eng* 18:171–183
- Kong F, Zhang Y, Wang H, et al (2020) Removal of Cr (VI) from wastewater by artificial zeolite spheres loaded with nano Fe e Al bimetallic oxide in constructed wetland. *Chemosphere* 257:.. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127224>
- Kronstedt E (1981) Anatomy of *Ricciocarpus natans* ( L . ) Corda , Studied by Scanning Electron Microscopy. 817–827
- Li Y, Zhang J, Zhu G, et al (2016) Phytoextraction, phytotransformation and rhizodegradation of ibuprofen associated with *Typha angustifolia* in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Water Res* 102:294–304.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.049>
- Limmer MA, Burken JG (2016) Phytovolatilization of Organic Contaminants. *Environ Sci Technol* 1–40. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04113>
- Limo J, Paturi P, Mäkinen J (2018) Magnetic biomonitoring with moss bags to assess stop-and-go traffic induced particulate matter and heavy metal concentrations. *Atmos Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.062>
- Long D (2010) *Ricciocarpus natans*. In: *Mosses and Liverworts of Britain and Ireland: A Field Guide*. p 260
- López J, Carballeira A (1993) Interspecific differences in metal bioaccumulation and plant-water concentration ratios in five aquatic bryophytes. *Hydrobiologia* 263:95–107.

- <https://doi.org/10.1007/BF00006206>
- Lu R, Hu Z, Zhang Q, et al (2020) The effect of *Funneliformis mosseae* on the plant growth, Cd translocation and accumulation in the new Cd-hyperaccumulator *Sphagneticola calendulacea*. *Ecotoxicol Environ Saf* 203:1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110988>
- Maghri I, Kenz A, Elkouali M, et al (2012) Textile Dyes removal from industrial waste water by *mytilus edulis* shells. *J Mater Res* 3:121–136
- Marella TK, Saxena A, Tiwari A (2020) Diatom mediated heavy metal remediation: a review. *Bioresour Technol* 123068. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123068>
- Martins RJE (2004) *Acumulação e Liberação de Metais Pesados por Briófitas Aquáticas*. Universidade do Porto
- Martins RJE, Vilar VJP, Boaventura RAR (2014) Kinetic modelling of Cadmium and Lead removal by aquatic mosses. *Brazilian J Chem Eng* 31:229–242
- Matzen S, Fakra S, Nico P, Pallud C (2020) *Pteris vittata* Arsenic Accumulation Only Partially Explains Soil Arsenic Depletion during Field-Scale Phytoextraction. *Soil Syst* 71:1–20. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040071>
- Mehta KD, Das C, Pandey BD (2010) Leaching of copper, nickel and cobalt from Indian Ocean manganese nodules by *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy* 105:89–95.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.08.002>
- Mendonca VGB, Sobrinho MAM, Pernambuco UF De, Sucroalcooleira DT (2016) *Descontaminação de efluentes industriais por biossorção com algas verdes encontradas no litoral nordestino*
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, et al (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med* 6:e1000097.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mota JD, Cunha RSS, Rodrigues MGF (2015) *Análise estatística da adsorção de íons Pb<sup>2+</sup> pela argila chocolate B (natural e modificada) avaliando os efeitos da concentração inicial e pH em sistema de banho finito*
- Mushtaq MU, Iqbal A, Nawaz I, et al (2020) Enhanced uptake of Cd, Cr, and Cu in *Catharanthus roseus* (L.) G. Don by *Bacillus cereus*: application of moss and compost to reduce metal availability. *Environ Sci Pollut Res*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-020-08839-5>
- Nascimento RF, Lima ACA, Vidal CB, et al (2014) *ADSORÇÃO: aspectos teóricos e*

aplicações ambientais

- Okoli CP, Diagboya PN, Anigbogu IO, et al (2017) Competitive biosorption of Pb (II) and Cd (II) ions from aqueous solutions using chemically modified moss biomass (*Barbula lambarenensis*). *Environ Earth Sci* 76:1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6368-9>
- Olu-Owolabi BI, Diagboya PN, Ebaddan WC (2012) Mechanism of Pb<sup>2+</sup> removal from aqueous solution using a nonliving moss biomass. *Chem Eng J* 195–196:270–275. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.004>
- Ozdes D, Duran C (2015) Equilibrium , Kinetics , and Thermodynamic Evaluation of Mercury (II) Removal from Aqueous Solutions by Moss (*Homalothecium sericeum*) Biomass. *Environ Prog Sustain Energy* 34:1620–1628. <https://doi.org/10.1002/ep>
- Palma-Silva C, Albertoni EF, Trindade CR, et al (2012) Uso de *Eichhornia crassipes* para fitorremediação de ambientes eutrofizados subtropicais no sul do Brasil. *Perspectiva* 36:73–81
- Papadia P, Barozzi F, Migoni D, et al (2020) Aquatic Mosses as Adaptable Bio-Filters for Heavy Metal Removal from Contaminated Water. *Int J Mol Sci* 21:1–14
- Pedro CA, Santos MSS, Ferreira SMF, Gonçalves SC (2013) The influence of cadmium contamination and salinity on the survival , growth and phytoremediation capacity of the saltmarsh plant *Salicornia ramosissima*. *Mar Environ Res* 92:197–205. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.09.018>
- Pi N, Ng JZ, Kelly BC (2017) Bioaccumulation of pharmaceutically active compounds and endocrine disrupting chemicals in aquatic macrophytes : Results of hydroponic experiments with *Echinodorus horemanii* and *Eichhornia crassipes*. *Sci Total Environ* 602:812–820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.137>
- Pipíška M, Valica M, Partelová D, et al (2018) Removal of Synthetic Dyes by Dried Biomass of Freshwater Moss *Vesicularia Dubyana*: A Batch Biosorption Study. *Environments* 5:1–12. <https://doi.org/10.3390/environments5010010>
- Pires KAD, Lacerda NM, Paniagua CE da S, Amorim E (2009) Estudo das capacidades de adsorção dos metais pesados Cd, Cu, Cr e Pb sobre adsorventes naturais (*Moringa oleifera* e argila) – Efeito da massa do adsorvente, do tempo de contato e sinergia. In: IX ENCONTRO INTERNO & XIII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. pp 1–10
- Ravikumar K, Krishnan S, Ramalingam S, Balu K (2007) Optimization of process variables by the application of response surface methodology for dye removal using a novel adsorbent. *72:66–74*. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.07.018>

- Rebello FM, Caldas ED (2016) Arsenic, lead, mercury and cadmium: Toxicity, levels in breast milk and the risks for breastfed infants. *Environ Res* 151:671–688.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.027>
- Rizzuti AM, Newkirk CR, Wilson KA, et al (2017) Biosorption of hexavalent chromium from aqueous solutions using highly characterised peats. *Int Mire Conserv Gr Int Peatl Soc* 19:1–10. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.248>
- Rocha CHB, Ferreira R da C, Alonso M, Oliveira M de (2018) Capacidade de resiliência da represa de São Pedro, Juiz de Fora (MG), Brazil. 1–10
- Sandhi A, Landberg T, Greger M (2017) Phytofiltration of arsenic by aquatic moss (*Warnstorfia fluitans*). *Environ Pollut* 2:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.038>
- Sandhi A, Landberg T, Greger M (2018) Effect of pH, temperature, and oxygenation on arsenic phytofiltration by aquatic moss (*Warnstorfia fluitans*). *J Environ Chem Eng*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.044>
- Sari A, Mendil D, Tuzen M, Soylak M (2009) Biosorption of palladium (II) from aqueous solution by moss (*Racomitrium lanuginosum*) biomass: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *J Hazard Mater* 162:874–879.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.112>
- Saxena DK, Srivastava HS (2002) The influence of glutathione on physiological effects of lead and its accumulation in moss. 351–361
- Shtangeeva I, Niemelä M, Perämäki P, et al (2016) Phytoextraction of bromine from contaminated soil. *J Geochemical Explor* 1–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.03.012>
- Shvetsova MS, Kamanina IZ, Frontasyeva M V, et al (2019) Active Moss Biomonitoring Using the “Moss Bag Technique” in the Park of Moscow. *Phys Part Nucleu Lett* 16:994–1003. <https://doi.org/10.1134/S1547477119060293>
- Šillerová H, Komárek M, Chrastný V, et al (2013) Brewers draff as a new low-cost sorbent for chromium (VI): Comparison with other biosorbents. *J Colloid Interface Sci* 396:227–233. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.029>
- Silva LM (2011) Metais pesados em tecidos de *Chelonia mydas* encalhadas no Litoral do Rio Grande do Sul, Brasil
- Silva NCR (2014) Utilização da casca de banana como biossorvente para adsorção de Chumbo(II) em solução aquosa. Universidade Tecnológica Federal do Pará
- Singh R, Gautam N, Mishra A, Gupta R (2011) Heavy metals and living systems : An

- overview. 43:.. <https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505>
- Singh R, Singh S, Parihar P, et al (2015a) Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicol Environ Saf* 112:247–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>
- Singh R, Singh S, Parihar P, Pratap V (2015b) *Ecotoxicology and Environmental Safety Arsenic contamination , consequences and remediation techniques : A review.* *Ecotoxicol Environ Saf* 112:247–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>
- Souza RS, Carvalho SML, Garcia Júnior MRL, Sena RSF (2009) Adsorção de cromo (VI) por carvão ativado granular de soluções diluídas utilizando um sistema batelada sob pH controlado. *Acta Amaz* 39:661–668
- Ștefănuț S, Öllerer K, Manole A, et al (2019) National environmental quality assessment and monitoring of atmospheric heavy metal pollution - A moss bag approach. *J Environ Manage* 248:109–224. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.125>
- Šušnovská A, Hasíková V, Horník M, et al (2015) Removal of Cd by dried biomass of freshwater moss *Vesicularia dubyana*: batch and column studies. *Desalin Wter Treat* 1–12. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1026281>
- Suresh Kumar K, Dahms HU, Won EJ, et al (2015) Microalgae - A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicol Environ Saf* 113:329–352. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>
- Suzuki Y, Takenaka C, Tomioka R, et al (2016) Accumulation of Arsenic and Copper by Bryophytes Growing in an Aquatic Environment near Copper Mine Tailings. *Mine Water Environ* 35:265–272. <https://doi.org/10.1007/s10230-015-0335-7>
- Tavares SR de L (2013) Técnicas de Remediação. In: *Remediação de Solos e Águas Contaminadas Por Metais Pesados: Conceitos Básicos e Fundamentos.* Embrapa Solos (CNPQ), Rio de Janeiro, pp 61–89
- Tesser TT, Bordin J, Rocha CM Da, Silva A Da (2021) Application of the dry and wet biomass of bryophytes for phytoremediation of metals : Batch experiments. *Environ Challenges* 5:100382. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100382>
- Ucarli O, Yayintas O, Engin MS, et al (2020) Investigation of competitive and non-competitive adsorption of some heavy metal on *Leucodon sciuroides* (Hedw.) Schwägr. *Langmuir* 1–23. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01403>
- Vanderpoorten A, Goffinet B (2009) *Introduction to Bryophytes.* Cambridge University Press
- Vukojevic V, Sabovljevic M, Jovanovic S (2005) Mosses accumulate heavy metals from the

- substrata of coal ash. *Arch Biol Sci* 57:101–106
- Wang Y, Liu Q, Shu L, et al (2016) Removal of Cr (VI) from aqueous solution using Fe-modified activated carbon prepared from luffa sponge: kinetic, thermodynamic, and isotherm studies. *Desalin Water Treat* 13:1–12.  
<https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1185745>
- Wehr JD, Whitton BA (1986) Ecological factors relating to morphological variation in the aquatic moss *Rhynchostegium riparioides* (Hedw.) C. Jens. *J Bryol* 14:269–280.  
<https://doi.org/10.1179/jbr.1986.14.2.269>
- WHO WHO (2013) Inorganic Chromium (VI) Compounds
- WHO WHO (2017) 571. Iron. In: *Food Addit. Ser.* 18.  
<http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v18je18.htm>. Accessed 27 Nov 2022
- Wojtuń B, Polechońska L, Pech P, et al (2019) *Sanionia uncinata* and *Salix polaris* as bioindicators of trace element pollution in the High Arctic: a case study at Longyearbyen, Spitsbergen, Norway. *Polar Biol* 42:1287–1297.  
<https://doi.org/10.1007/s00300-019-02517-0>
- Wu F, Yu X, Wu S, Wong M (2014) Effects of Inoculation of PAH-degrading Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Responses of Ryegrass to Phenanthrene and Pyrene. *Int J Phytoremediation* 16:109–122. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.759526>
- Wu FY, Ye ZH, Wu SC, Wong MH (2007) Metal accumulation and arbuscular mycorrhizal status in metallicolous and nonmetallicolous populations of *Pteris vittata* L. and *Sedum alfredii* Hance. *Planta* 226:1363–1378. <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0575-2>
- Wu X, Cobbina SJ, Mao G, et al (2016) A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment. *Environ Sci Pollut Res* 8244–8259.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-6333-x>
- Xu J, Garcia A, Lagerkvist A, et al (2015) Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil. *Environ Int* 74:42–53. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.007>
- Xu YY, Zhen YY, Yu J, et al (2012) Experimental Studies on the Potential of Two Terrestrial Mosses in Monitoring Water Contaminated by Cd and Cr. *21:1453–1459*
- Zechmeister HG, Grodzi K, Ł GS- (2003) Bryophytes
- Zhang Q, Ding C, Achal V, et al (2014) Potential for nutrient removal by integrated remediation methods in a eutrophicated artificial lake – a case study in Dishui Lake, Lingang New City, China. *Water Sci Technol* 70:2031–2040.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2014.453>

Zhang R, Leiviskä T, Taskila S, Tanskanen J (2018) Iron-loaded Sphagnum moss extract residue for phosphate removal. *J Environ Manage* 218:271–279.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.055>

Žukauskaitė Z, Lukšienė B, Filistovič V, et al (2019) Experimental and modelling studies of radiocesium sorption/desorption processes in the fixed-bed moss column. *J Environ Radioact* 203:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.007>

(2008) REMOVAL OF CADMIUM ( II ) FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY SPHAGNUM MOSS PEAT : EQUILIBRIUM STUDY. 7:2008