

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E
TECNOLOGIA AMBIENTAL**

LETÍCIA MESACASA

**COMUNIDADE FÚNGICA EM SISTEMA INTEGRADO
DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS E BIOCHAR**

Letícia Mesacasa

**COMUNIDADE FÚNGICA EM SISTEMA INTEGRADO DE
WETLANDS CONSTRUÍDOS E BIOCHAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Ambiental – Mestrado ou Doutorado,
Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como
requisito parcial para o título de Doutora em
Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Leandro Machado

Co-orientador: Prof. Dr. Odorico Konrad

Santa Cruz do Sul

2025

Dedico a todas as pessoas que lutam por um meio ambiente sadio para a atual e futuras gerações.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder forças, sabedoria, coragem e saúde ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Plínio e Léa, por sempre estarem ao meu lado, me oferecendo apoio incondicional, conselhos valiosos e amor em todos os momentos dessa caminhada. Ao meu irmão, Daniel, pelo carinho e suporte constantes.

Ao meu companheiro de vida, Deison, que enfrentou essa trajetória ao meu lado, oferecendo todo o apoio, carinho e incentivo. Sem a sua ajuda, não teria sido possível realizar este sonho.

Ao meu orientador, Dr. Ênio Leandro Machado, pela amizade, ensinamentos e orientação ao longo desses anos. A experiência adquirida com sua orientação será sempre uma referência em minha vida.

À professora e amiga Dra. Adriane L. Rodriguez, pelo incentivo contínuo e pelo apoio fundamental na realização deste trabalho, especialmente com o auxílio do laboratório para a execução das análises.

Ao colega e compadre Maurício, por sua parceria, amizade e generosidade ao ajudar nas análises laboratoriais. Você foi fundamental nesse processo e sempre esteve disposto a contribuir.

Às minhas queridas amigas Fernanda, Samara e Natália, sou imensamente grata por todo o apoio, carinho e incentivo ao longo desta jornada. Vocês foram essenciais não apenas no apoio acadêmico, mas principalmente no apoio emocional, estando sempre ao meu lado nos momentos de desafio e celebração. A amizade de vocês foi, sem dúvida, uma das maiores fontes de motivação para a conclusão deste trabalho.

A todos os bolsistas do LATTAE que participaram dos experimentos ao longo dos anos, meu sincero agradecimento pela colaboração e empenho.

À CAPES, pela bolsa concedida, que tornou possível a realização deste doutorado.

À UNISC, por proporcionar um ambiente de aprendizado e crescimento ao longo desses anos.

E, finalmente, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, mas que, por alguma razão, não foram citadas. O meu muito obrigada!

RESUMO

As Soluções baseadas na Natureza (SbN) tem se tornado uma alternativa promissora para o enfrentamento de desafios ambientais relacionados ao tratamento de efluentes e à recuperação de ecossistemas. Uma das SbNs amplamente reconhecidas e com excelentes resultados no tratamento de efluentes são os *Wetlands Construídos* (WCs). Esses sistemas, por meio de processos biológicos reduz e remove eficientemente os poluentes e nutrientes dos efluentes domésticos e industriais. Além disso, é um dos pontos dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) que merecem pesquisas para efetividade em sistemas descentralizados unifamiliares ou de núcleos de contribuintes. Nesse contexto, a busca pelo aprimoramento desses sistemas, por meio da integração de diferentes unidades, meios filtrantes e comunidades microbiológicas, é fundamental para alcançar melhores desempenhos e eficiências no tratamento. Diante disso, o objetivo geral do estudo foi investigar a composição taxonômica da comunidade fúngica de um sistema integrado de *Wetlands* construídos (RA+ WCFV +WFHSS +WCF +FILTRAÇÃO/ADSORÇÃO) e o seu potencial de remoção de nutrientes de efluentes sanitários. Primeiramente com o auxílio da base de dados SCOPUS foi analisada por meio de uma revisão bibliométrica quais são as relações dos principais tipos de *Wetlands* construídos utilizados para o tratamento de efluentes sanitários e a composição de sua comunidade fúngica, para dar embasamento para a pesquisa experimental. Assim, com o apoio dos dados bibliométricos, foi realizada uma investigação sobre qual a diversidade de fungos associadas a macrófita *Canna generalis* em duas diferentes unidades de WCs, utilizados para o controle e remoção de nutrientes de efluentes sanitários de uma universidade no sul do Brasil. Somando-se a isto, com as unidades dos WCs do estudo anterior, foi realizada a avaliação da eficiência da integração de diferentes unidades de WCs, com diferentes cargas hidráulicas, associados a filtros de cerâmica vermelha e biochar de eucalipto para a remoção de nutrientes presentes nos efluentes sanitários do campus universitário. Por fim, por meio dos resultados obtidos, pode-se concluir que as SbNs, especificamente os WCs, demonstram grande potencial na remoção de poluentes e nutrientes de efluentes, além de se mostrarem eficazes na recuperação e preservação de ecossistemas.

Palavras-chave: SbNs, fungos, macrófitas, tratamento de efluentes, tratamento descentralizado.

ABSTRACT

DIVERSITY OF THE FUNGAL COMMUNITY AND ANALYSIS OF POLLUTANT LOAD PARAMETERS OF URBAN EFFLUENTS IN AN INTEGRATED CONSTRUCTED WETLANDS SYSTEM

Nature-based solutions (NBS) have become a promising alternative for tackling environmental challenges related to wastewater treatment and ecosystem recovery. One of the widely recognized NBSs with excellent results in effluent treatment is the Constructed Wetlands (WCs). Through biological processes, these systems efficiently reduce and remove pollutants and nutrients from domestic and industrial effluents. In addition, it is one of the points of the Sustainable Development Goals (SDGs) that merit research for effectiveness in decentralized single-family systems or in taxpayer groups. In this context, the quest to improve these systems by integrating different units, filter media and microbiological communities is fundamental to achieving better treatment performance and efficiency. In view of this, the general objective of the study was to investigate the taxonomic composition of the fungal community of an integrated system of constructed wetlands (RA+WCFV +WFHSS +WCF +FILTRATION/ADSORPTION) and its potential for removing nutrients from sanitary effluents. Firstly, using the SCOPUS database, a bibliometric review was carried out to analyze the relationship between the main types of constructed wetlands used to treat sanitary effluents and the composition of their fungal community, in order to provide a basis for the experimental research. Thus, with the support of bibliometric data, an investigation was carried out into the diversity of fungi associated with the macrophyte *Canna generalis* in two different WC units used for the control and removal of nutrients from sanitary effluents at a university in southern Brazil. In addition, with the WC units from the previous study, an assessment was made of the efficiency of integrating different WC units, with different hydraulic loads, associated with red ceramic filters and eucalyptus biochar for the removal of nutrients present in the sanitary effluent from the university campus. Finally, from the results obtained, it can be concluded that SBNs, specifically WCs, show great potential in removing pollutants and nutrients from effluents, as well as being effective in recovering and preserving ecosystems.

Keywords: NBS, fungi, macrophytes, effluent treatment, decentralized treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de benefícios tratados pelas Soluções Baseadas na Natureza. Adaptado de CALLIARI et al., 2019	13
Figura 2. Benefícios dos fungos associados as macrófitas em <i>Wetlands</i> Construídos ...	15
Figura 3. Principais integrações de <i>Wetlands</i> Construídos e seus potenciais de remoção. Adaptado de Kiflay et al., 2021.....	18
Figura 4. Benefícios da incorporação de biochar em <i>Wetlands</i> construídos	21
Figura 5. Fluxograma de detalhamento geral das etapas de desenvolvimento da tese....	23
Figura 6. Desenho simplificado da ETE UNISC: 1) Sistema de gradeamento. 2) Tanque equalizador com bombas submersas. 3) Reator UASB. 4) Biofiltro anaeróbio. 5) <i>Wetland</i> Construído de Fluxo Vertical. 6) <i>Wetland</i> Construído de Fluxo Horizontal. 7) Bomba de recirculação. 8) <i>Wetland</i> construído flutuante. 9) Filtro com material cerâmico sem biochar. 10) Filtro com material cerâmico com biochar	24
Figura 7. Bibliometric mapping of the terms “ <i>Constructed Wetlands</i> ” AND “ <i>fungi</i> ” generated from the SCOPUS database. The colors represent the groups of terms extracted and grouped by the VOSviewer software.....	33
Figura 8. Bibliometric map generated in the VOSviewer software showing the expansion of research related to the terms “ <i>Constructed Wetlands</i> ” AND “ <i>fungi</i> ” generated from the SCOPUS database.....	34
Figura 9. Breakdowns for fungi, microbial community, and arbuscular mycorrhizal fungi. Where: A) Association of the terms “ <i>Constructed Wetlands</i> ” AND “ <i>microbial community</i> ”; B) Association of the terms “ <i>Constructed Wetlands</i> ” AND “ <i>arbuscular mycorrhizal fungi</i> ” and C) Association of the terms “ <i>Constructed Wetlands</i> ” AND “ <i>fungi</i> ”	36
Figura 10. Possible interactions between macrophytes and AMF in a Constructed <i>Wetland</i> or Treatment <i>Wetland</i> (TW). SFCW: Surface Flow Constructed <i>Wetland</i> , SSFCW: Subsurface Flow Constructed <i>Wetland</i> , SSVFCW: Subsurface Vertical Flow Constructed	

<i>Wetland</i> , SSHFCW: Subsurface Horizontal Flow Constructed <i>Wetland</i>	3
--	---

Figura 11. Principal Coordinate Analysis (PCA) to verify the spatial distribution and similarity of the different constructed <i>Wetland</i> systems. WCFS: Surface flow constructed <i>Wetland</i> , WCFSS: Subsurface flow constructed <i>Wetland</i> , WCFSSV: Vertical subsurface flow constructed <i>Wetland</i> , WCFSSH: Horizontal subsurface flow constructed <i>Wetland</i>	4
---	---

Figura 12. Integrated unit of constructed wetlands for the study of fungal phyla associated with the macrophyte <i>C. generalis</i> . UASB/Biofilter + VFCW (vertical flow constructed <i>Wetland</i>) + SSHFCW (subsurface horizontal flow constructed <i>Wetland</i>) + FCW (constructed <i>Wetland floating</i> system)	57
--	----

Figura 13. Fungal phyla found in the units and seasons associated with the macrophyte <i>C. generalis</i>	63
---	----

Figura 14. Fungal genera associated with macrophyte <i>C. generalis</i>	65
---	----

Figura 15. Desenho simplificado da ETE UNISC: 1) Sistema de gradeamento. 2) Tanque equalizador com bombas submersas. 3) Reator UASB. 4) Biofiltro anaeróbico. 5) <i>Wetland</i> Construído de Fluxo Vertical. 6) <i>Wetland</i> Construído de Fluxo Horizontal. 7) Bomba de recirculação. 8) <i>Wetland</i> construído flutuante. 9) Filtro com material cerâmico sem biochar. 10) Filtro com material cerâmico com biochar	80
---	----

Figura 16. Taxa de remoção de N-NH ₄ ⁺ para o estágio 2. Os boxplots representam a mediana (linha preta) e o primeiro e o terceiro quartis (linhas inferior e superior, respectivamente). Letras diferentes indicam diferenças significativas (p < 0,05)	87
--	----

Figura 17. Taxa de remoção de DBO ₅ (Estágio 2). Os boxplots representam a mediana (linha preta) e o primeiro e o terceiro quartis (linhas inferior e superior, respectivamente). Letras diferentes indicam diferenças significativas (p < 0,05)	87
---	----

Figura 18. Taxa de remoção de DQO para os estágios 1 e 2. Os boxplots representam a mediana (linha preta) e o primeiro e o terceiro quartis (linhas inferior e superior, respectivamente). Letras diferentes indicam diferenças significativas (p < 0,05)	88
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

As	Arsênio
APHA	<i>American Public Health Association</i>
BLAST	Ferramenta de busca de alinhamento local
BC	Biochar
Ca	Cálcio
Ca (OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CCB	Centro de Ciências Biológicas
Cd	Cádmio
CdCl ₂	Cloreto de Cádmio
CE	Condutividade elétrica
CFA	Clima úmido subtropical
CO ₂	Dióxido de carbono
CPETS	Centro de Pesquisa de Energia e Tecnologias Sustentáveis
COT/TOC	Carbono Orgânico Total (do inglês <i>Total Organic Carbon</i>)
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO ₅ /BOD	Demanda bioquímica de oxigênio (do inglês <i>Biochemical Oxygen Demand</i>)
DQO/COD	Demanda química de oxigênio (do inglês <i>Chemical Oxygen Demand</i>)
DSE	Fungos endófitos septados (do inglês <i>septate endophytic fungi</i>)
EPA	Agência de Proteção Ambiental (do inglês <i>Environmental Protection Agency</i>)
ETE	Estação de tratamento de esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FCB	Filtro cerâmico e biochar
FMA/AMF	Fungos micorrízicos arbusculares (do inglês <i>Arbuscular mycorrhizal fungi</i>)
GLM	Modelo Linear Generalizado
HLR	Taxa de carga hidráulica (do inglês <i>hydraulic loading rate</i>)

HRT	Tempo de retenção hídrica (do inglês <i>Water retention time</i>)
HTC	Carbonização hidrotérmica
HTL	Liquefação hidrotérmica
INCT-SbN	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de potássio
LAMEB	Laboratório Multiusuários em Biologia
N	Nitrogênio
N-NH ₄ ⁺	Nitrogênio amoniacal
NPs	Nanopartículas
NT/TN	Nitrogênio Total
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
OD/DO	Oxigênio dissolvido
OTUs	Unidades Taxonômicas Operacionais
P	Fósforo
PAH	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
Pb	Chumbo
PbCl ₂	Cloreto de chumbo
PCA	Análise de Coordenadas Principais
PCR	Reação em cadeia da polimerase
PE	Equivalente populacional
ppm	Parte por milhão
PO ₄	Fosfato de cálcio
PPGTA	Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental
PT	Fósforo Total
SbN/NBS	Soluções Baseadas na Natureza (do inglês <i>Nature-based Solutions</i>)
SMX	Sulfametoxazol
SST	Sólidos suspensos totais
STD	Sólidos totais dissolvidos
TC	Tetraciclina

UASB	Reator anaeróbio de fluxo ascendente (do inglês <i>Upflow anaerobic reactor</i>)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNISC	Universidade de Santa Cruz do Sul
WC/CW	Wetland Construído (do inglês <i>Constructed Wetland</i>)
WCF/CWFT	Wetland construído flutuante (do inglês <i>Floating Treatment Wetlands</i>)
WCF/FC	Wetland construído flutuante com filtro cerâmico
WCF/FCB	Wetland construído flutuante com filtro cerâmico e biochar
WCH	Wetland construído híbrido
WCFHSS/ SSHFCW	Wetland construído de fluxo horizontal subsuperficial (do inglês <i>Wetland constructed from subsurface horizont flow</i>)
WCFS	Wetland construído de fluxo subterrâneo
WCFVSS/SSVFCW	Wetland construído de fluxo vertical subsuperficial (do inglês <i>Wetland constructed from subsurface vertical flow</i>)
WCFH/ SHFCW	Wetland construído de Fluxo Horizontal (do inglês <i>Horizontal Flow Constructed Wetland</i>)
WCFV/ VFCW	Wetland construído de Fluxo Vertical (do inglês <i>Vertical Flow Constructed Wetlands</i>)
WCMFV/VFCW	Wetland construído de microfluxo vertical (do inglês <i>Wetland constructed of vertical microflow</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1	Soluções Baseadas na Natureza e comunidades microbianas voltadas ao tratamento de efluentes.....	13
3.2	Sistemas integrados de <i>Wetlands</i> construídos como novos avanços para o tratamento de efluentes.....	17
3.2.1	Filtros adsorventes com biochar	19
4	METODOLOGIA.....	23
4.1	Delineamento da pesquisa.....	23
4.2	Local de estudo.....	23
	ARTIGO 1 – CONSTRUCTED WETLANDS AND THE ROLE OF THE FUNGAL COMMUNITY FOR WASTEWATER TREATMENT: A REVIEW	25
5	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o tratamento de esgoto tem sido uma grande problemática mundial e há uma busca crescente por alternativas de tratamento viáveis e que sejam sustentáveis, especialmente com paisagismo integrador, que possibilite convívio e análise de ciclo de vida com pegadas positivas (CRIPPA et al., 2024). As chamadas Soluções Baseadas na Natureza (SbN), podem contribuir muito nessa busca, pois elas são conhecidas por serem soluções que de alguma forma, irão se inspirar, copiar ou tomar como base processos naturais para gerar uma série de benefícios para a sociedade (BULKELEY et al., 2017; XIE & BULKELEY, 2020; FRAGA & SAYAGO, 2020, CHAIRAT & GHEEWALA, 2024). Além disso, as SbN são conhecidas como ações que visam proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar os ecossistemas naturais ou modificados, abordam os desafios sociais de uma forma em que proporcionem o bem-estar humano e benefícios a biodiversidade (COHEN-SHACHAM et al., 2016).

Dentre desse contexto de alternativas eficazes, sustentáveis e baseada na natureza, aparecem os *Wetlands* construídos (WCs). Conhecidos como sistemas de engenharia projetados que imitam processos naturais, envolvendo vegetação, solo e os microrganismos associados para o tratamento de águas residuárias (PARDE et al., 2021). Além disso, são eficientes na remoção de diversos compostos presentes nas águas residuárias, principalmente os sólidos suspensos totais (SST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), demanda química de oxigênio (DQO), metais pesados, patógenos e produtos farmacêuticos (ALUFASI et al., 2017; GIKAS & RANIERI, 2013; LAKHO et al., 2021; CHEN et al., 2024). Esses sistemas possuem também a vantagem das transformações microbiológicas, proporcionando assim a mineralização do carbono orgânico, a nitrificação, a desnitrificação, a redução de sulfatos etc. (BEZBARUAH & ZHANG, 2004; SETH et al., 2024).

Os *Wetlands* Construídos são utilizados para tratar efluentes domésticos e industriais, através dos processos físicos, físico-químicos, químicos e bioquímicos que ocorrem no sistema. Esses sistemas são classificados de acordo com o fluxo do efluente e as formas de crescimento das macrófitas. Os principais tipos são as unidades de fluxo horizontal subsuperficial (WCFSSH), as de fluxo vertical subsuperficial (WCFSSV) e os *Wetlands* construídos flutuantes (WCF) ou sistemas flutuantes (KIFLAY et al., 2021). Além disso, é importante ser levado em conta para o bom funcionamento dos WCs os substratos, os

meios filtrantes, as macrófitas e a comunidade microbiana associada. Assim, independentemente do sistema utilizado os resultados de remoção de contaminantes como a demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), sólidos em suspensão e nutrientes como fósforo e nitrogênio serão eficazes e promissores (NANDAKUMAR et al., 2019).

No entanto, os WCs podem apresentar uma limitação que é a exigência de uma grande área de terra para se atingir o nível adequado de remoção de poluentes devido à baixa taxa de carga hidráulica (HLR) (WU et al., 2013; ZHAO et al., 2023). Mas isto é relativo, tendo demandas de 0,1 até 5 m²/equivalente habitacional, ou como taxa de aplicação orgânica superficial máxima de 6 a 15 gDBO₅.m⁻².d⁻¹ para o WCFHSS. No caso do WCFV de 10 a 20 gDBO₅.m⁻².d⁻¹ (VON SPERLING E SEZERINO, 2018). Com isso, iniciaram-se estudos buscando a integração de diferentes sistemas de WCs para superar esse obstáculo, sendo que as primeiras pesquisas foram realizadas na Europa e na China (PERFLER et al., 1999; LIANG et al., 2003). Após muitas outras aplicações práticas de projetos integrando WCs em larga escala foram implementados também na China para tratamento e reabilitação de águas superficiais poluídas e como parte de restaurações ecológicas de corpos d'água eutróficos (WU et al., 2013; LIU et al., 2024).

Além disso, vale se destacar que apesar da eficiência nas taxas de remoção de compostos orgânicos e inorgânicos, existe uma preocupação quanto as condições operacionais dos sistemas, principalmente as dimensões, que as vezes exigem grandes áreas para instalação. Com isso, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) tem recomendado diminuir a pegada para 1 m²/PE (equivalente populacional) para tratamento terciário e 0,5 m²/PE para tratamento de águas pluviais. Entretanto, alguns operadores sugerem tamanhos maiores de 10 e 5 m²/PE para tratamentos secundários e terciários, respectivamente (ILYAS & MASIHI, 2017). A Europa tem o projeto da pegada que varia de 1 a 3 m²/PE para WCs de fluxo vertical (WCFV), 2 a 5 m² /PE para WCs de fluxo horizontal (WCFH) e um pouco menor para sistemas híbridos de WCs (WCH) (WCFH + WCFV ou vice-versa) (FU et al., 2023).

Com isso, levando em consideração as condições operacionais exigidas e os avanços nas pesquisas sobre as integrações de WCs, é notório que as taxas de remoção de contaminantes e nutrientes melhoram consideravelmente.

Além da integração de diferentes modelos de WCs, a utilização de meios filtrantes apropriados é fundamental para a remoção de contaminantes presentes nos efluentes e

redução de custos com o tratamento (POLIŃSKA et al., 2021; YANG et al., 2022). Um exemplo de meio filtrante com ótimos resultados em questão de remoção de contaminantes é o biochar. Esse substrato pode ser obtido de diversas matérias primas, dentre elas resíduos agrícolas, alimentares, de plantas, de madeira etc. É uma matéria prima rica em carbono, com grande volume de poros e alta superfície para adsorção, assim esse material irá remover eficientemente os contaminantes presentes nos efluentes (TOMCZYK et al., 2020; EL BARKAOUI et al., 2023).

Outro ponto importante a ser destacado para o bom funcionamento dos WCs é a escolha das macrófitas, pois elas podem influenciar na remoção dos contaminantes, uma vez que elas precisam se adaptar e tolerar os compostos presentes no efluente. Além disso, os processos biogeoquímicos que ocorrem dentro dos sistemas e nos sedimentos podem ser afetados pela espécie (REJMANKOVA, 2011; BEDOUH et al, 2023). Desse modo, é importante observar as características biológicas e as funções da espécie da macrófita, o que resultará em uma eficiência melhor na remoção de compostos nos WCs (BERMÚDEZ et al., 2022). Além disso, ressalta-se que ao escolher a espécie das macrófitas, é importante se observar um dos objetivos das SbN de integrar o paisagismo ao tratamento de efluentes com a utilização de espécies ornamentais nos sistemas criam um ambiente mais harmônico com áreas urbanas (COHEN-SHACHAM et al., 2016).

Juntamente com os pontos destacados acima, é fundamental lembrar que associadas as macrófitas e aos meios filtrantes estão as comunidades microbianas que também desempenham um papel essencial na remoção de contaminantes. Os processos biológicos como oxidação do amônio/ amônia, a desnitrificação e a fixação do nitrogênio que ocorrem dentro dos WCs, são possíveis devido a presença de diferentes bactérias no meio (FERNANDES et al., 2015; KHALID & ELSHERIF, 2023). Além das bactérias, outros microrganismos são responsáveis por processos de degradação de contaminantes e matéria orgânica, como as algas, fungos e protozoários (SAUER & KIMBER, 2001). Atualmente existem diversos trabalhos voltados a identificação e funções das bactérias associadas aos WCs, mas estudos envolvendo essa linha com os fungos ainda são escassos (HE et al., 2021).

Os fungos, ao se associarem às macrófitas, contribuem para seu desenvolvimento, promovendo o crescimento, aumentando a absorção de nutrientes e melhorando a tolerância a fatores abióticos e bióticos, entre outros benefícios (HU et al., 2021). Além disso, alguns tipos de fungos, como os endófitos, que vivem dentro de tecidos vegetais e

os fungos na zona do solo da rizosfera, ou seja, solo que está em contato com raízes de plantas, passaram a ser mais estudados, demonstrando que são comunidades ricas e diversas, onde a sua cuja ecologia e funções são críticas para plantas de WCs (FARRER et al. 2022; ZHAO et al., 2022).

Diante do exposto, a presente tese buscou preencher as seguintes lacunas de pesquisa: a integração de diferentes WCs consorciados a filtros adsorventes, voltados a diferentes padrões de cargas hidráulicas, visando reduzir assim as áreas de implantação dos sistemas em escala real; estudar a taxonomia fúngica a nível de espécie associadas as macrófitas comumente utilizadas. Uma vez que com esse conhecimento, a utilização de inóculos de fungos específicos poderão auxiliar em uma maior degradação de matéria orgânica e poluentes nos WCs, tornando os sistemas mais eficientes e até mesmo facilitando a remoção de poluentes específicos.

Norteando essa pesquisa e com base na revisão bibliométrica realizada primeiramente foi proposta a hipótese que a taxonomia fúngica associada as raízes de *Canna generalis* L.H. Bailey, presente em duas unidades de *Wetlands* construídos seria constituída principalmente por fungos micorrízicos. E como segunda hipótese é de que a configuração composta por um reator anaeróbio, seguido da integração de um WCFV, WCFHSS e um WCF + filtração/adsorção seriam capazes de tratar os efluentes sanitários ao nível exigido pelas normas vigentes para descarte de efluentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar a composição taxonômica da comunidade fúngica de um sistema integrado de *Wetlands* construídos (RA+ WCFV +WFHSS +WCF +FILTRAÇÃO/ADSORÇÃO) e o seu potencial de remoção de nutrientes de efluentes sanitários.

2.2 Objetivos específicos

1. Analisar por meio de uma revisão bibliométrica quais são as relações dos principais tipos de *Wetlands* construídos utilizados para o tratamento de efluentes sanitários e a composição de sua comunidade fúngica, para dar embasamento para a pesquisa experimental.
2. Realizar a investigação da taxonomia da comunidade fúngica associada à macrófita *Canna generalis* L.H. Bailey utilizada em um sistema integrado de *Wetlands* construídos utilizado para a remoção de nutrientes de efluentes sanitários de uma universidade.
3. Avaliar a eficiência da integração de diferentes unidades de *Wetlands* construídos combinados com filtração/adsorção dos sistemas com cerâmica e cerâmica/biochar no processo de controle e remoção de nutrientes em efluentes sanitários de uma universidade localizada no município de Santa Cruz do Sul/RS.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Soluções Baseadas na Natureza e comunidades microbianas voltadas ao tratamento de efluentes

Com a grande demanda de investimentos voltados ao tratamento de efluentes, nos últimos anos há uma busca constante por tecnologias em sistemas de tratamento, que sejam mais acessíveis e atendam as particularidades de cada local. A implementação de sistemas de tratamento descentralizados (associados com as ideias do saneamento estruturante) que não precisam de captação e tratamento em um único ponto tem ganhado destaque, onde reduzem os custos para o transporte dos esgotos e pode ser uma solução viável para elevar o percentual de população atendida pela coleta e tratamento de esgotos (DEVI & DAHIYA, 2008; JASSAL et al., 2023).

Diversos métodos alternativos para o tratamento de esgotos têm surgido a partir dos anos 2000, dentre eles, as chamadas Soluções Baseadas na Natureza. As SbN são entendidas como soluções que de alguma maneira se inspiram, copiam ou se baseiam em processos naturais para gerar benefícios sociais, ambientais e econômicos para a sociedade (NESSHOVER et al., 2017; LEAH et al., 2021; WENDLING et al., 2021) (Figura 1).

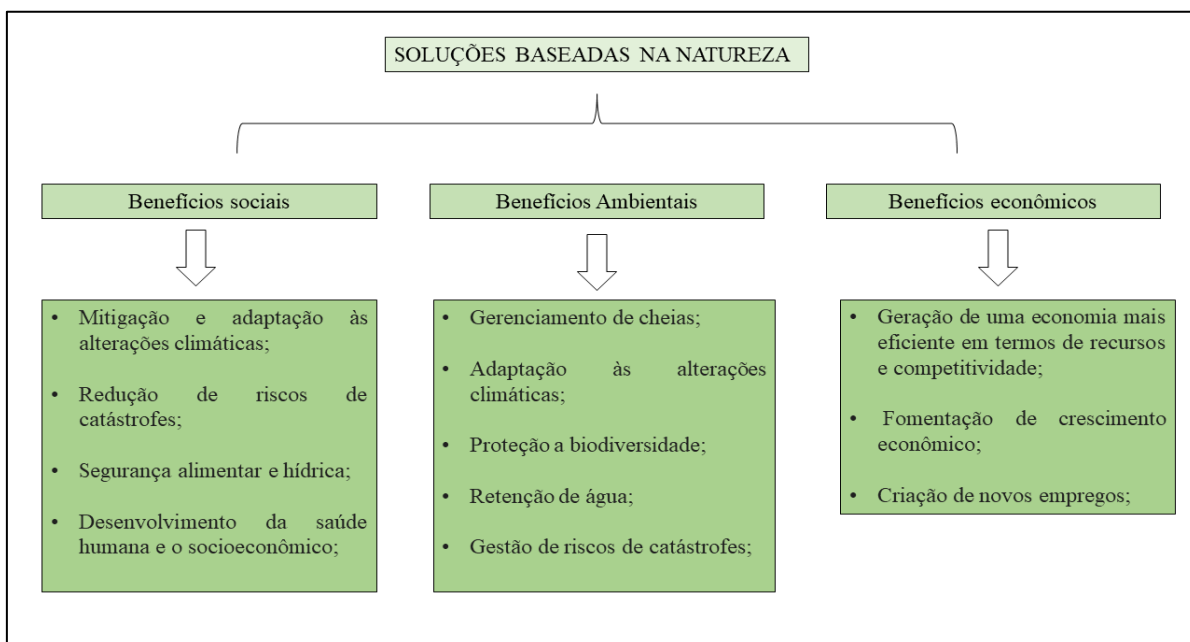


Figura 1. Exemplos de benefícios tratados pelas Soluções Baseadas na Natureza. Adaptado de CALLIARI et al., 2019.

No Brasil em 2023, foi criado o INCT-SbN (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza), com o propósito de pesquisar diagnósticos e prognósticos para infraestrutura, habitações, rios urbanos, qualidade da água e controle da poluição. Algumas publicações do INCT-SbN podem ser citadas como exemplos das pesquisas que estão sendo feitas: Mesacasa et al. (2024) e Oliveira et al. (2025). Traz, por exemplo, de *Wetlands* integrados com *Wetlands* construídos e a microbiologia dos sistemas integrados de *Wetlands*. Também são referenciadas em outras publicações a ideia com as cidades esponja, e o conceito que com a ecotecnologia, ocorram as mudanças significativas que devem ser priorizadas nas cidades, áreas periurbanas e rurais (INCT-SbN, 2023).

Os WCs são vistos como uma SbN e trata-se de uma tecnologia consolidada e amplamente adotada como tratamento secundário de águas residuárias, oferecendo baixos custos de operação e manutenção, quando comparados aos sistemas convencionais (CORBELLA et al., 2016; DOTRO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2021). Além disso, eles prestam importantes serviços ecossistêmicos, como melhorias na qualidade da água, proteção contra inundações e a promoção da biodiversidade, os quais são os princípios das SbN (AGATON & GUILA, 2023).

Atuando em conjunto com essa abordagem das SbN e associadas aos WCs, estão as comunidades microbianas. Devido a sua versatilidade metabólica e a capacidade de adaptação em diversos ambientes, os microrganismos exercem um papel essencial nos ecossistemas, onde transformam os poluentes em nutrientes essenciais ou em subprodutos inofensivos a natureza (TURBÉ et al., 2010; CARACCILO et al., 2020; JUSTINO et al., 2023). Nos WCs essas comunidades microbianas, compostas principalmente por fungos, algas, bactérias e protozoários, atuam na remoção dos poluentes e auxiliam na nutrição e no desenvolvimento das macrófitas nos sistemas (MASTRETTA et al., 2009). Em águas residuárias as plantas e bactérias por exemplo, interagem simbioticamente. É nessa simbiose, que as plantas, por meio da fotossíntese, fornecem a maior parte do oxigênio utilizado pelas bactérias aeróbias na degradação da matéria orgânica. Com isso, as bactérias, por sua vez, liberam pela respiração o CO₂, que juntamente com outros produtos auxiliam no desenvolvimento vegetal. A presença de fungos, especialmente os micorrízicos, estabelece uma simbiose essencial que potencializa a eficiência do tratamento de águas residuárias, favorecendo a maior absorção de água e compostos orgânicos pelas plantas (ANDRADE et al., 2007; WAHAB et al., 2023).

Os fungos são importantes microrganismos encontrados principalmente no solo e em associações simbióticas com 80% das plantas, trazendo benefícios para as plantas hospedeiras (TRAPPE, 1988; ANSARI et al., 2013; ZHOUYING et al., 2016) (Figura 2). Estes microrganismos garantem uma melhor nutrição das plantas hospedeiras, auxiliando no desenvolvimento de seu crescimento, aumentando assim a resistência aos metais pesados, a estresses abióticos e bióticos como a salinidade, seca, algumas doenças, sistemas alagados, ambientes frios, dentre outros fatores (ZHOUYING et al., 2016; HU et al., 2021).

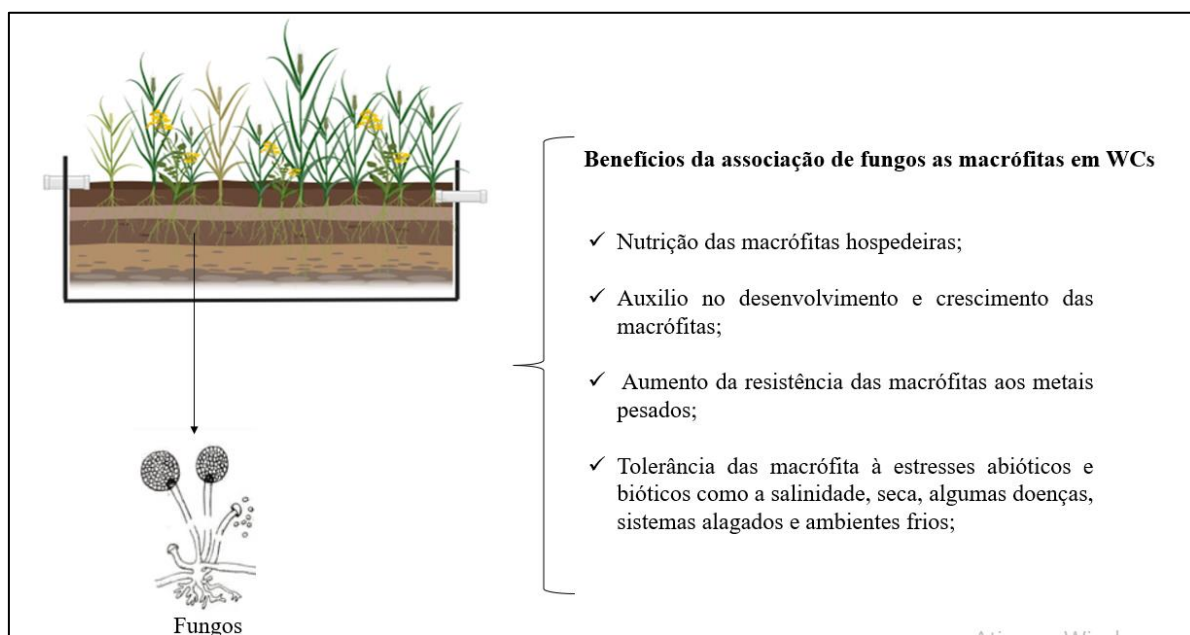


Figura 2. Benefícios dos fungos associados as macrófitas em *Wetlands* Construídos.

Além disso, os fungos são microrganismos que decompõem a maior parte dos produtos químicos orgânicos no ambiente e são utilizados na biorremediação por décadas, devido a sua morfologia, a capacidade metabólica e facilidade de adaptação a diversos habitats. Os fungos também são mais eficazes para a biorremediação dos que as bactérias, principalmente por suas funções enzimáticas e eficiência em multiplicar em uma ampla faixa de pH (TOMASINI & LEÓN-SANTIESTEBAN, 2019; AKERMAN-SANCHE & ROJAS-JIMENEZ, 2021; VAKSMAA et al., 2023; MALIK et al., 2023).

Os estudos envolvendo o papel dos fungos em *Wetlands* construídos tem crescido nos últimos anos e tem demonstrado resultados promissores na remoção dos mais diversos tipos de poluentes. Um exemplo de espécies de fungos utilizadas para a biorremediação de diversos compostos poluentes são aqueles conhecidos como “fungos da podridão

branca” (*Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium* etc.) pertencentes ao filo Basidiomycota (MALIK et al., 2023). De acordo com diversos estudos, esses microrganismos possuem a capacidade de secretar enzimas em abundância e essas enzimas por sua vez, conseguem degradar diversos poluentes ambientes, como fármacos, metais pesados, corantes e contaminantes orgânicos (pesticidas, solventes orgânicos etc.) (MIR-TUTUSAUS et al., 2014; ASIF et al., 2017; LUCAS et al., 2018; STENHOLM et al., 2019; MALIK et al., 2023).

Além dos fungos que já ocorrem naturalmente nos WCs, pesquisas envolvendo ensaios de inoculação de fungos nos sistemas tem se expandido e apresentado resultados satisfatórios. Em um estudo desenvolvido por Xu et al. (2024), fungos micorrízicos arbusculares (AMF) foram inoculados em raízes de *Pteris vittata* L. para aumentar a remoção de As dos WCFVs. Os resultados mostraram que com a inoculação de AMF intensificou o efeito de acumulação de arsênio (As) (33,28–58,66%) na macrófita *P. vittata*. Além disso, os autores apontaram que com a inoculação dos fungos nas raízes da planta, o tratamento das águas residuárias contendo As foram superiores aos testes sem a inoculação dos AMF.

Ainda com foco na inoculação de fungos em sistemas de WCs, destaca-se a pesquisa desenvolvida por Xu et al. (2023), onde foram investigados o crescimento, as características fisiológicas e a colonização por AMF associados a planta *Canna indica* L. vivendo em WCFV, para a remoção de Cu e tetraciclina (TC). Os autores constataram que o Cu e a TC inibiram o crescimento da planta e diminuíram a colonização por AMF. Entretanto, as taxas de remoção de TC e Cu pelo WCFV foram de 99,13–99,80% e 93,17–99,64%, respectivamente. Com isso, puderam indicar que as absorções de Cu e TC pela planta *C. indica* e as taxas de remoção de Cu foram aumentadas devido a inoculação de AMF. Além disso, os estresses de TC e Cu reduziram e a inoculação de AMF aumentou as unidades taxonômicas operacionais bacterianas (OTUs), onde Proteobacteria, Bacteroidetes, Firmicutes e Acidobacteria foram as bactérias dominantes. Portanto, os AMF podem aumentar a remoção de poluentes em WCFV, promovendo o crescimento das plantas e alterando as estruturas da comunidade microbiana.

Por fim, ressalta-se que ao mesmo tempo em que os fungos desempenham um papel crucial nos sistemas de WCs, é necessário que o sistema forneça condições para sua sobrevivência, como a disponibilidade de nutrientes no substrato, como o carbono total, o nitrogênio total e o fósforo total, pois sem esses nutrientes o crescimento dos fungos

pode ser afetado (CAO et al., 2022; LIN et al., 2023; YAN et al., 2024). Além disso, manter a umidade do WCs é determinante para as atividades enzimáticas das comunidades fúngicas, pois a baixa umidade no substrato afeta a estrutura e as funções das comunidades microbianas (WU et al., 2016; MA et al., 2018; ZHAO et al., 2023).

3.2 Sistemas integrados de *Wetlands* construídos como novos avanços para o tratamento de efluentes

Os *Wetlands* construídos imitam os processos naturais, através da utilização de plantas e solo para tratar as águas residuais em um ambiente controlado (PARDE et al., 2021). Eles são uma tecnologia eficiente para a remoção de micropoluentes orgânicos através de um processo sinérgico, que envolve interações entre a vegetação e os microrganismos, como a hidrólise, volatilização, sorção, biodegradação e fotólise (KAUR et al., 2020, FANG et al., 2022). Quando comparado a outros ecossistemas, nos WCs existe uma elevada taxa de atividade biológica que tem o potencial de transformar diversos poluentes comuns em inofensivos, além da remoção de matéria orgânica, nutrientes e sólidos em suspensão (LAVRNIC' et al., 2020).

Atualmente existem diversos modelos de sistemas de WCs, contudo alguns exemplares têm sido mais utilizados, dentre eles as unidades de fluxo horizontal subsuperficial (WCFHSS), as de fluxo vertical subsuperficial e os *Wetlands* construídos flutuantes (WCF) ou sistemas flutuantes (MITTAL et al., 2023). Essas unidades são classificadas conforme o sentido de escoamento do efluente e as formas de crescimento das macrófitas. Nos WCFHSS, o efluente move-se pela horizontal através da gravidade. Já, nos *Wetlands* construídos de fluxo vertical subsuperficial (WCFVSS), o efluente desloca-se verticalmente da camada plantada para baixo, através do substrato e os WCF são plataformas que permitem o crescimento das macrófitas, onde as raízes delas espalham-se pela unidade formando um denso sistema de raízes (BENASSI et al., 2018; KAUR et al., 2020).

Com os avanços nas pesquisas e a expansão na utilização dos WCs, as integrações entre os diferentes modelos de sistemas têm ganhado destaque em estudos nos últimos anos (Figura 3). Por exemplo, Ávila et al. (2013), destacaram que a integração entre as unidades de WCFV + WCFH + *Wetland* de superfície de água livre, são eficientes nos processos de nitrificação/desnitrificação de efluentes urbanos domésticos. Os autores

relevam que o WCFV que atingiu alta retenção de matéria orgânica (77% DBO₅) e grande capacidade de nitrificação (remoção de 74% N-NH₄⁺), concluindo assim que o sistema integrado pode ser utilizado para o tratamento de efluentes urbanos domésticos com potencial de reutilização. Outra pesquisa com a integração de sistemas é a de Colares et al. (2021), integrando um sistema de reator UASB, seguido de WCs híbridos e célula de combustível microbiana para tratamento descentralizado de águas residuárias (esgoto doméstico de campus universitário) que como resultado dessa integração, foram atingidas reduções de até 71% para DQO, além de as células de combustível microbianas produzirem picos de tensão de até 225mV, comprovando que a integração tem a possibilidade de geração de bioenergia. Na pesquisa de Kiflay et al. (2021) um reator anaeróbio com defletor, com unidade de fluxo subterrâneo horizontal e *Wetland* construído flutuante integrados para estudar a remoção de poluentes de águas residuais de produção de sementes. As eficiências médias de remoção obtidas foram 95,5% DBO₅, 94,6% DQO, 86,2% SST, 76,6% turbidez, 82,4% nitrato, 76% fosfato e 32,9% do íon amônio. Concluindo assim que a integração entre um reator anaeróbio e unidades de WCs melhoram a remoção de poluentes de águas residuais de produção de sementes.

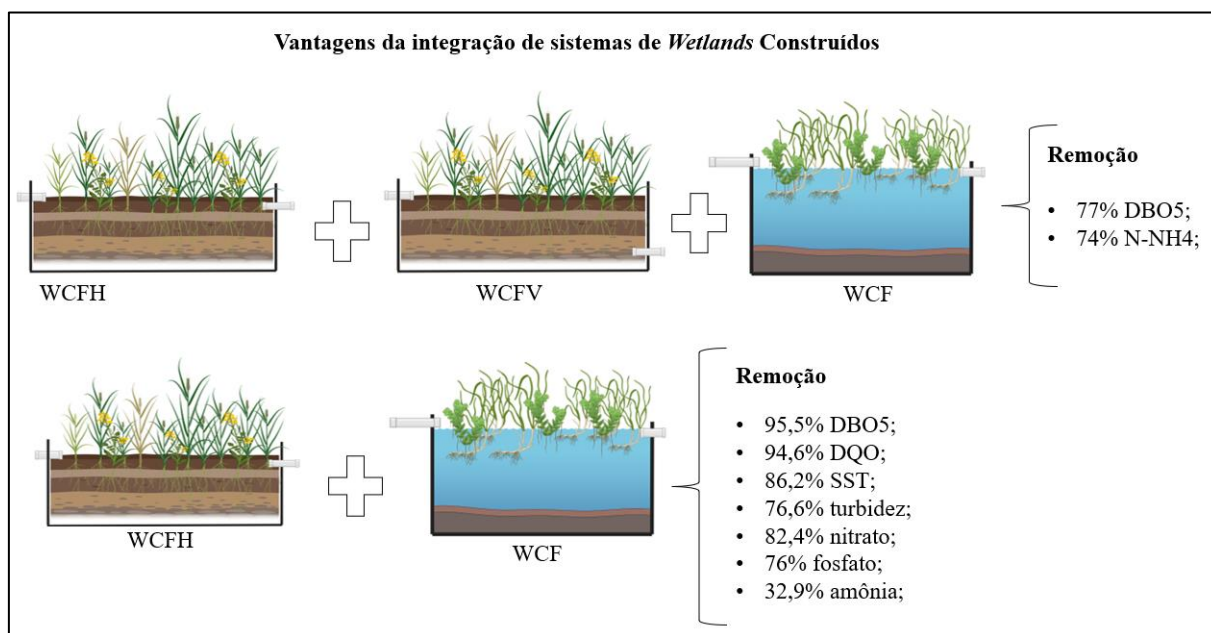


Figura 3. Principais integrações de *Wetlands* Construídos e seus potenciais de remoção. Adaptado de Kiflay et al., 2021.

Além da integração de sistemas de WCs, diferentes meios filtrantes têm sido pesquisados e incorporados aos sistemas para se atingir maiores resultados de eficiência. A inclusão de meios filtrantes como tijolos quebrados, britas, biochar e pirita natural, por

exemplo, apresentaram um potencial de remoção de fósforo em até 94% (LIMA et al., 2018; BOLTON et al., 2019; GE et al., 2019).

Por exemplo, para testar a eficiência de remoção de metais pesados IRSHAD et al. (2024) criaram uma água residual sintética composta por CdCl_2 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ e PbCl_2 que foram usados como fonte de estresse de metais pesados para fazer concentrações individuais de 5, 10 e 10 mg/L, respectivamente. Após isso, desenvolveram um filtro formado por carvão ativado de casca de coco agregado a um *Wetland* construído de fluxo vertical. Como resultados, observaram a eficiência de remoção em cerca de 32, 21 e 34% de Cd, Cr e Pb respectivamente. Concluindo assim, que com o filtro ocorreu uma possível redução a exposição da macrófita *Salvinia cucullata* aos metais Cd e Pb, pois a adsorção de cromo pela camada de filtro foi da metade (apenas 25% da entrada total) do Cd e Pb.

Outro exemplo de material utilizado como meio filtrante, são os enchimentos plásticos e minerais utilizados no estudo de Tao et al. (2023), que relatam o uso combinando dos meios filtrantes citados para tratamento secundário de efluentes em um WC, resultou em uma taxa de remoção superior a 3,9% de NT, 8% de PT e 3,5% de DQO. Resultados esses que foram comparados a um sistema de WC com meio filtrante de brita. Além disso, o sistema com os filtros plásticos e minerais, aumentaram a atividade bacteriana com maior número de gêneros e espécies dominantes. Os microrganismos responsáveis pela desnitrificação *Pseudorhodobacter* sp., *Zoogloea* sp. e *Pseudarthrobacter* sp. e os responsáveis pela nitrificação *Devosia* sp. e *Nitrospira* sp. forneceram diversas vias de metabolizar o nitrogênio, resultando assim na maior remoção do composto.

3.2.1 Filtros adsorventes com biochar

Uma nova ecotecnologia de tratamento que tem ganhado destaque é o biochar, considerado um material estável, poroso, rico em carbono, de produção barata, pois pode ser obtido de diversas matérias primas (bambu, resíduos agrícolas, madeira etc.) (EL BARKAOUI et al., 2023). Ele é obtido através da conversão termoquímica de biomassa residual por meio de vários processos termoquímicos, como carbonização hidrotérmica (HTC), liquefação hidrotérmica (HTL), gaseificação e pirólise (DENG et al., 2021; EL BARKAOUI et al., 2023). A produção de biochar variar de pequena escala a grande escala usando sistema de pirólise. A pirólise por sua vez, é uma tecnologia termoquímica para transformar biomassa em biochar, bio-óleo e gás de síntese entre 350 e 700°C de

temperatura na ausência de ar (VARMA et al., 2018; ONI et al., 2019). Além disso, o biochar pode variar com granulometrias que variam de 0,01 até 1000 μm , densidade de volume de até 5%, podem ter alta área superficial, de até 400 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ e tamanho médio de poro de aproximadamente 2,34 nm (ZEPEDA et al., 2023).

Como o biochar é um substrato formado pela decomposição térmica de biomassa, ele é rico em grupos carboxílicos, grupos hidroxílicos fenólicos, grupos hidroxílicos, ligações duplas alifáticas, estruturas aromáticas. Com isso, a estrutura de poros finos do material tem forte capacidade de adsorção, baixa solubilidade, propriedades físicas e químicas estáveis, estrutura de poros rica e grande área de superfície específica (YU et al., 2019). Diversos estudos destacam que ele é um ótimo adsorvente e remove eficientemente N e P (GAO et al., 2019; ZHANG et al., 2021; DAI et al., 2023), possui uma maior capacidade de sorção dos poluentes orgânicos e inorgânicos (WANG & WANG, 2019) e algumas pesquisas têm relatado que a combinação entre WCs e biochar possuem o potencial de redução na DQO, nos compostos orgânicos e na turbidez dos efluentes (ZHOU et al., 2017; KAETZL et al., 2018; KASAK et al., 2018), aumentando assim o nível de purificação do efluente no WCs (NGUYEN et al., 2020) (FIGURA 4).

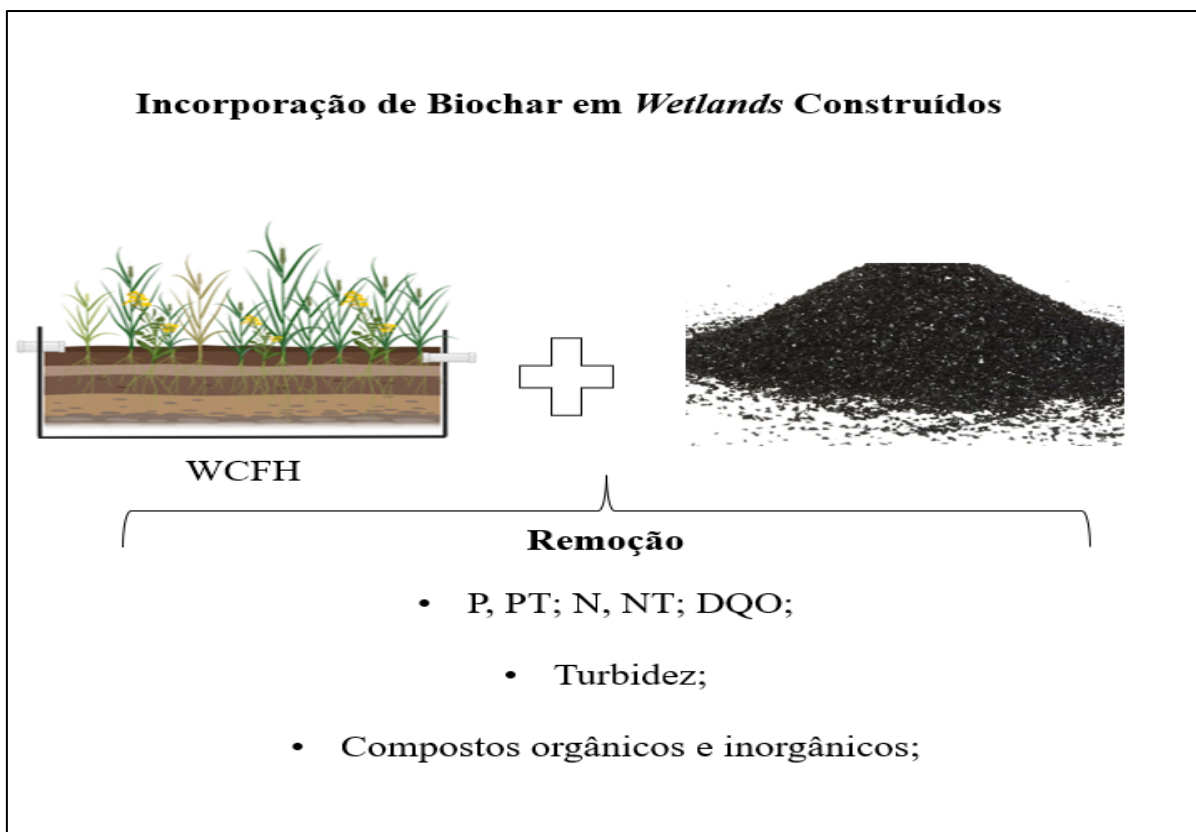


Figura 4. Benefícios da incorporação de biochar em *Wetlands* construídos.

Contudo, apesar dos benefícios observados com a incorporação do biochar em WCs, pode existir um ponto negativo que é a sua suscetibilidade a erosão hídrica, que pode resultar em perda do composto e poluição ambiental (LIAO et al., 2022). Além disso, a granulometria do biochar pode influenciar na remoção de nutrientes, onde pequenas partículas de biochar possuem o potencial de reter mais nutrientes, devido ao aumento de áreas de superfície específicas e alta capacidade de retenção hídrica (MAJOR et al., 2009; RAZZAGHI et al., 2020). No entanto, proporcionalmente mais nutrientes podem ser liberados dessas pequenas partículas de biochar, por sua superfície externa possuir maior área e os poros pequenos são facilmente acessíveis (MAJOR et al., 2009; ANGST & SOHI, 2013).

Com a incorporação de biochar como meio filtrante em WCs, é possível se observar que os sistemas apresentam maiores eficiências na remoção de compostos orgânicos. Por exemplo no estudo de Saeed et al. (2019), onde foi incorporado substrato de biochar sob um meio filtrante de pedras grossas, onde foi verificada uma remoção de 91% de fósforo total e remoções de 95% e 99,7% para DBO e SST, em efluentes municipais. Outro estudo que relata a eficácia do biochar é o de Gupta et al. (2016), que

testaram o composto em um WCFH e compararam com uma unidade com apenas cascalho, os resultados mostram que a unidade apenas com o biochar foi mais eficiente na redução de vários poluentes orgânicos e inorgânicos. No trabalho de Zhang et al (2021), foram desenvolvidos quatro conjuntos em escala de laboratório de WCs de fluxo vertical aerado (VF) com diferentes proporções de biochar (0%, 25%, 50%, 75%) para avaliar a influência da dosagem do composto no desempenho do tratamento, atividade enzimática e comunidade microbiana, sendo avaliados por 72h, em um ciclo operacional de três dias de HRT. Como resultados relatam que todos os WCs atingiram melhor DQO (acima de 90%) e remoção de N (acima de 99%) devido ao suplemento de oxigênio adequado, enquanto a remoção de NT (67%) foi obtida em WC com adição de 50% de biochar.

Vale destacar também a pesquisa de Antunes et al. (2018) que dopou o biochar com cálcio, produzido a partir de biossólidos (coletados de lagoas de sedimentação de argila na estação de tratamento de águas residuais) via pirólise de micro-ondas a 700 °C por 20 min, na recuperação de fósforo. Sendo que as isotermas de remoção de fósforo, a cinética de remoção e o impacto do pH inicial da solução de fósforo na recuperação de fósforo foram estudados. A recuperação de fósforo foi proporcional ao teor de cálcio no biochar, levando predominantemente à produção de brushite ou brushita ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - mineral de fosfato). A precipitação foi o principal mecanismo de remoção de fósforo pelo biochar dopado com cálcio. A capacidade de remoção de fósforo pelo biochar atingiu o equilíbrio após 8 h de tempo de contato e foi descrita por um modelo cinético de pseudo-segunda ordem. O modelo de isoterma de Langmuir ajustou bem os dados experimentais com uma capacidade máxima de adsorção de 147 mg-P.g^{-1} para o biochar BC20 (20% em peso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Assim, os resultados da remoção de fósforo de águas residuais reais demonstraram que usar biochar dopado com Ca para remoção de fósforo de córregos contaminados é uma alternativa promissora para recuperação de fósforo.

4 METODOLOGIA

4.1 Delineamento da pesquisa

O desenvolvimento desta pesquisa ocorreu durante os anos de 2021 – 2024, com o planejamento e execução de diversas atividades e experimentos. Dentro da estrutura geral que integra a presente tese de doutorado, após os tópicos de introdução, objetivos e fundamentação teórica e metodologia (tópicos 1, 2, 3 e 4, respectivamente), a presente seção 4.1 apresenta um fluxograma detalhando as etapas de construção da pesquisa (Figura 5). A seção 4.2, apresenta o local de desenvolvimento deste trabalho com vista superior dos *Wetlands* integrados na ETE (Figura 6). Por fim, o tópico 5 apresenta os resultados obtidos com os experimentos desenvolvidos ao longo do doutorado, com a apresentação dos artigos produzidos neste período. Este tópico foi subdividido em 3 seções, uma para cada artigo científico produzido.

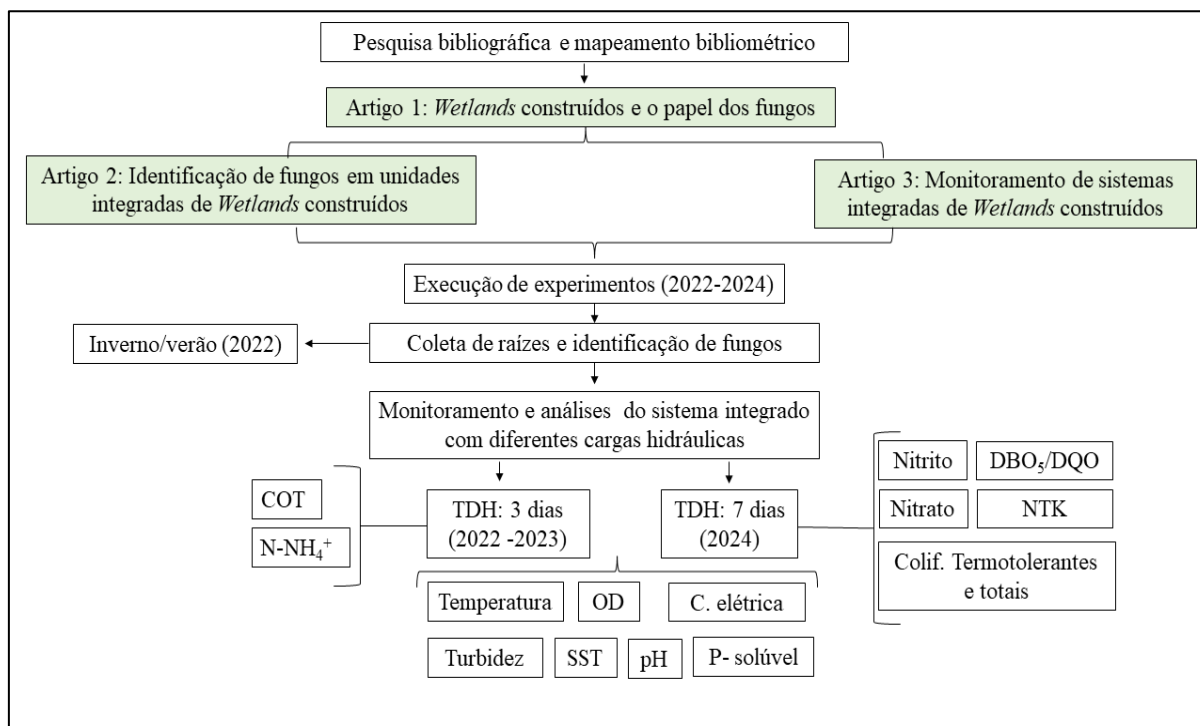


Figura 5. Fluxograma de detalhamento geral das etapas de desenvolvimento da tese.

4.2 Local de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Estação de tratamento de efluentes (ETE), situada na Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), *campus* Santa Cruz do Sul. A ETE foi construída no ano de 2005, tendo como capacidade de tratamento cerca de 360 m³/dia ou

aproximadamente 18.000 pessoas. As principais etapas de tratamento são o tratamento preliminar, composto por gradeamento e desarenador, tanque equalizador, digestor anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (Reator UASB), filtro biológico percolador e decantador secundário (FIGURA 5), sendo que o Arroio Lajeado é o corpo receptor.

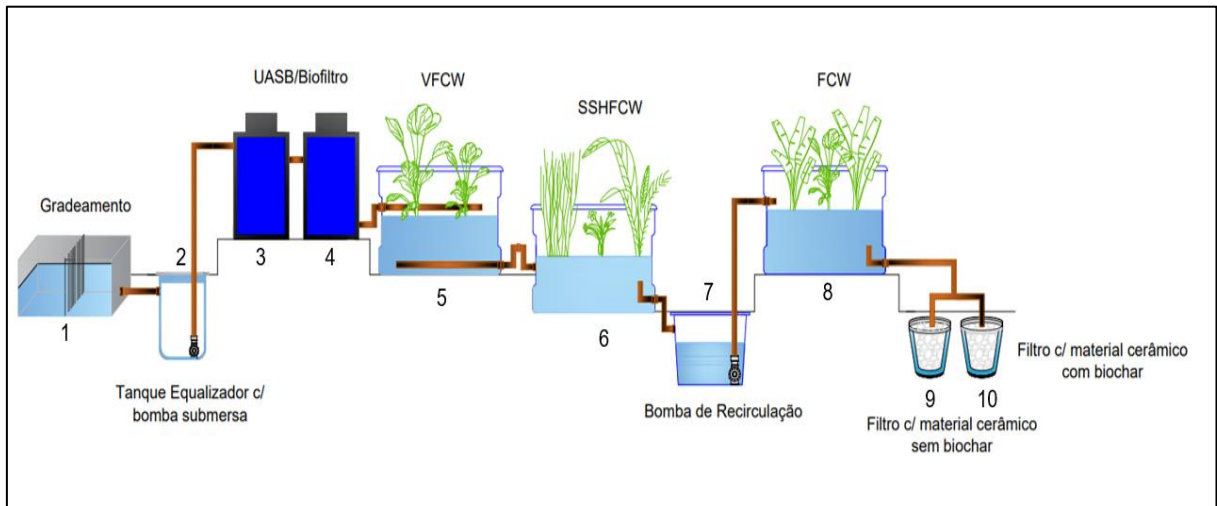


Figura 6. Desenho simplificado da ETE UNISC: 1) Sistema de gradeamento. 2) Tanque equalizador com bombas submersas. 3) Reator UASB. 4) Biofiltro anaeróbico. 5) *Wetland* Construído de Fluxo Vertical. 6) *Wetland* Construído de Fluxo Horizontal. 7) Bomba de recirculação. 8) *Wetland* construído flutuante. 9) Filtro com material cerâmico sem biochar. 10) Filtro com material cerâmico com biochar.

ARTIGO 1 – CONSTRUCTED WETLANDS AND THE ROLE OF THE FUNGAL COMMUNITY FOR WASTEWATER TREATMENT: A REVIEW

Letícia Mesacasa ¹, Fernando Santos Cabral ², Deison Antonio Taufer Fochi ¹, Willian da Silva Oliveira ³, Fábio Oliveira ¹, Mauricio Kersting ¹, Gustavo Stolzenberg Colares ⁴, Adriane Lawisch Rodriguez¹, Carlos Alexandre Lutterbeck ^{1,5}, Odorico Konrad ⁴,
Ênio Leandro Machado ¹

1 – Postgraduate Program in Environmental Technology – PPGTA, University of Santa Cruz do Sul, RS, Brazil

2 – Federal University of Santa Catarina - Postgraduate Program in Biology of Fungi, Algae and Plants; Department of Botany - CCB UFSC

3- Multiuser Laboratory in Biology - LAMEB - Center for Biological Sciences - UFSC

4 – Research Center on Energy and Sustainable Technologies – CPETS - University of Vale Do Taquari-UNIVATES, Lajeado, RS, Brazil

5– Department of Life Sciences, University of Santa Cruz do Sul, UNISC, Brazil

O presente artigo está diretamente ligado ao objetivo específico 1 da tese: Analisar através de uma revisão bibliométrica quais são as relações dos principais tipos de Wetlands construídos utilizados para o tratamento de efluentes e a composição de sua comunidade fúngica, para dar embasamento para a pesquisa experimental.

SITUAÇÃO ATUAL NO MOMENTO DA DEFESA:

O artigo foi submetido e aceito no ano de 2024, atualmente se encontra publicado no periódico *Ecohydrology & Hydrobiology*, classificada como Qualis A2. O artigo na

íntegra pode ser acessado através do link:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1642359324000958>

5 REFERÊNCIAS

- Agaton, C. B., & Guila, P. M. C. (2023). Ecosystem services valuation of constructed wetland as a nature-based solution to wastewater treatment. *Earth*, 4(1), 78-92.
- Akerman-Sanchez, G.; Rojas-Jimenez, K. Fungi for the bioremediation of pharmaceutical-derived pollutants: A bioengineering approach to water treatment. *Environ. Adv.* 2021, 4, 100071.
- Alufasi, R., Gere, J., Chakauya, E., Lebea, P., Parawira, W., & Chingwaru, W. (2017). Mechanisms of pathogen removal by macrophytes in constructed wetlands. *Environmental Technology Reviews*, 6(1), 135-144.
- Andrade, M. J. C.; Tavares, L. S. R.; Malher, C. F. Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- Ansari, M. W., Trivedi, D. K., Sahoo, R. K., Gill, S. S., & Tuteja, N. (2013). A critical review on fungi mediated plant responses with special emphasis to Piriformospora indica on improved production and protection of crops. *Plant physiology and biochemistry*, 70, 403-410.
- Antunes, E., Jacob, M. V., Brodie, G., & Schneider, P. A. (2018). Isotherms, kinetics and mechanism analysis of phosphorus recovery from aqueous solution by calcium-rich biochar produced from biosolids via microwave pyrolysis. *Journal of environmental chemical engineering*, 6 (1), 395-403.
- Asif, M.B.; Hai, F.I.; Singh, L.; Price, W.E.; Nghiem, L.D. Degradation of pharmaceuticals and personal care products by white-rot fungi—A critical review. *Curr. Pollut. Rep.* 2017, 3, 88–103.
- Ávila, C., Garfí, M., & García, J. (2013). Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions. *Ecological engineering*, 61, 43-49.
- Bedouh, Y., Chihoub, D., Gherib, A., & Hamoud, F. (2023). Performance assessment of hybrid constructed wetlands planted with different macrophytes for industrial wastewater treatment. *International Journal of Environmental Studies*, 80(6), 1689-1703.
- Bermudez, V., Becker, H., Rodrigues, K., & Matias, L. (2022). Propostas de combinações de macrófitas para uso em Wetland construídos a partir de modelos naturais de lagoas rasas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 344-363.

- Benassi, R. F., Subtil, E., & Matheus, D. R. (2018). Manual de sistemas de wetlands construídas para o tratamento de esgotos sanitários: implantação, operação e manutenção. Universidade Federal do ABC,, n. May, 52.
- Bezbaruah, A. N., & Zhang, T. C. (2004). pH, redox, and oxygen microprofiles in rhizosphere of bulrush (*Scirpus validus*) in a constructed wetland treating municipal wastewater. *Biotechnology and bioengineering*, 88(1), 60-70.
- Bolton, L., Joseph, S., Greenway, M., Donne, S., Munroe, P., & Marjo, C. E. (2019). Phosphorus adsorption onto an enriched biochar substrate in constructed wetlands treating wastewater. *Ecological Engineering*: 1, 100005. doi:10.1016/j.ecoena.2019.100005.
- Bulkeley, H., & Raven, R. (2017). Analysing nature-based solutions for urban sustainability: towards a framework for NATURVATION. *Naturvation Deliverable*, 1(6).
- Calliari, E. Staccione, A. Mysiak. J. (2019). An assessment framework for climate-proof nature-based solutions, *Science of The Total Environment*, 656, 691-700, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.341>
- Caracciolo, A. B, Grenni, P., Garbini, G. L., Rolando, L., Campanale, C., Aimola, G., ... & Ancona, V. (2020). Characterization of the belowground microbial community in a poplar-phytoremediation strategy of a multi-contaminated soil. *Frontiers in Microbiology*, 11, 2073.
- Cao, H., Xu, M., Zhang, R., Ni, H. (2022). Effects of land use change on the structure and function of soil fungal community in sanjiang plain wetland. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 20, 1677–1691. doi: 10.15666/aeer/2002_16771691
- Chairat, S., & Gheewala, S. H. (2024). The Conceptual Quantitative Assessment Framework for Nature-Based Solutions (NbS). *Nature-Based Solutions*, 100152.
- Chen, G., Mo, Y., Gu, X., Jeppesen, E., Xie, T., Ning, Z., ... & Wu, H. (2024). Sustainability of global small-scale constructed wetlands for multiple pollutant control. *npj Clean Water*, 7(1), 45.
- Crippa, I., Dolci, G., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2024). Life Cycle Assessment of Microalgal Biomass Valorization from a Wastewater Treatment Process. *Waste and Biomass Valorization*, 1-17.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN: Gland, Switzerland, 97, 2016-2036.
- Colares, G. S., Dell’Osbel, N., Barbosa, C. V., Lutterbeck, C., Oliveira, G. A., Rodrigues, L. R., ... & Machado, E. L. (2021). Floating treatment wetlands integrated with

- microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation. *Science of The Total Environment*, 766, 142474.
- Corbella, C., Garfí, M., & Puigagut, J. (2016). Long-term assessment of best cathode position to maximise microbial fuel cell performance in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of the total environment*, 563, 448-455.
- Dai, Y., Wang, W., Lu, L., Yan, L., & Yu, D. (2020). Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120573.
- Deng, S., Chen, J., & Chang, J. (2021). Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126156.
- Devi, R., & Dahiya, R. P. (2008). COD and BOD removal from domestic wastewater generated in decentralised sectors. *Bioresource Technology*, 99(2), 344-349.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (2017). *Treatment wetlands* (p. 172). IWA publishing.
- El Barkaoui, S., Mandi, L., Aziz, F., Del Bubba, M., & Ouazzani, N. (2023). A critical review on using biochar as constructed wetland substrate: characteristics, feedstock, design and pollutants removal mechanisms. *Ecological Engineering*, 190, 106927.
- Fang, Y. K., Sun, Q., Fang, P. H., Li, X. Q., Zeng, R., Wang, H. C., & Wang, A. J. (2022). Integrated constructed wetland and bioelectrochemistry system approach for simultaneous enhancement of p-chloronitrobenzene and nitrogen transformations performance. *Water Research*, 217, 118433.
- Fernandes, J. P., Almeida, C. M. R., Pereira, A. C., Ribeiro, I. L., Reis, I., Carvalho, P., ... & Mucha, A. P. (2015). Microbial community dynamics associated with veterinary antibiotics removal in constructed wetlands microcosms. *Bioresource technology*, 182, 26-33.
- FRAGA, R. G.; SAYAGO, D. A. V. Soluções baseadas na Natureza: uma revisão sobre o conceito. **Parcerias Estratégicas**, Brasília-DF, v. 25, n. 50, p. 67-82, 2020.
- Fu, J., Zhao, Y., Yang, Y., Yao, Q., Ji, B., Chen, S., ... & Zhang, X. (2023). A glance of configuration-operational strategies and intensification of constructed wetland towards land-effective occupation. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104473.
- Gao, S., DeLuca, T. H., & Cleveland, C. C. (2019). Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 654, 463-472.
- Ge, Z.; Wei, D.; Zhang, J.; Hu, J.; Liu, Z.; Li, R. (2019). Natural Pyrite to Enhance Simultaneous Longterm Nitrogen and Phosphorus Removal in Constructed

- Wetland: Three Years of Pilot Study. *Water Research*, 148, 153-161
doi:10.1016/j.watres.2018.10.037.
- Gikas, P., Ranieri, E., & Tchobanoglous, G. (2013). Removal of iron, chromium and lead from waste water by horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(10), 1906-1912.
- Gupta, P., Ann, T. W., & Lee, S. M. (2016). Use of biochar to enhance constructed wetland performance in wastewater reclamation. *Environmental Engineering Research*, 21(1), 36-44.
- He, Y., Huang, Z., Li, H., Huang, J., Qin, X., & Wu, Z. (2023). Sediment Fungal Communities of Constructed Wetlands Dominated by *Zizania latifolia* and *Phragmites communis* and Their Effect on Organic Pollutant Removal. *Water*, 15(12), 2291.
- Hu, S., Hu, B., Chen, Z., Vosátka, M., & Vymazal, J. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi modulate the chromium distribution and bioavailability in semi-aquatic habitats. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129925.
- Ilyas, H., & Masih, I. (2017). Intensification of constructed wetlands for land area reduction: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 12081-12091.
- INCT-SbN (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza. (2023). Disponível em < <http://inct.cnpq.br/instituto-ecologia-e-meio-ambiente>> acesso em julho de 2024.
- Irshad, S., Xie, Z., Qing, M., Ali, H., Ali, I., Ahmad, N., ... & Nawaz, A. (2024). Application of coconut shell activated carbon filter in vertical subsurface flow constructed wetland for enhanced multi-metal bioremediation and antioxidant response of *Salvinia cucullata*. *Environmental Pollution*, 346, 123597.
- Jassal, S., Warmoota, R., Goyal, D., Mittal, I., Sharma, A., & Gupta, N. (2023). Sustainable waste water treatment: opportunities and challenges. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 66, e23220546.
- Justino, S., Calheiros, C. S., Castro, P. M., & Gonçalves, D. (2023). Constructed Wetlands as Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment in the Hospitality Industry: A Review. *Hydrology*, 10(7), 153.
- Kaetzel, K., Lübken, M., Gehring, T., Wichern, M., 2018. Efficient low-cost anaerobic treatment of wastewater using biochar and woodchip filters. *Water* 10, 818.
- Kasak, K., Truu, J., Ostonen, I., Sarjas, J., Oopkaup, K., Paiste, P., et al., 2018. Biochar enhances plant growth and nutrient removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Sci. Total Environ.* 639, 67–74.

- Kaur, R., Talan, A., Tiwari, B., Pilli, S., Sellamuthu, B., & Tyagi, R. D. (2020). Constructed wetlands for the removal of organic micro-pollutants. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 87-140). Elsevier.
- Khalid, S. A., & Elsherif, W. M. (2022). Types of microorganisms for biodegradation. In *Handbook of biodegradable materials* (pp. 1-27). Cham: Springer International Publishing.
- Kiflay, E., Selemani, J., & Njau, K. (2021). Integrated constructed wetlands treating industrial wastewater from seed production. *Water Practice & Technology*, 16(2), 504-515.
- Lakho, F. H., Le, H. Q., Mattheeuws, F., Igodt, W., Depuydt, V., Desloover, J., ... & Van Hulle, S. W. (2021). Decentralized grey and black water reuse by combining a vertical flow constructed wetland and membrane based potable water system: Full scale demonstration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104688.
- Lavrnić, S.; Nan, X.; Blasioli, S.; Braschi, I. et al. Performance of a full scale constructed wetland as ecological practice for agricultural drainage water treatment in Northern Italy. *Ecological Engineering*, 154, p. 105927, 2020/07/15/ 2020.
- Leah L. Bremer, Bonnie Keeler, Pua'ala Pascua, Rebecca Walker, Eleanor Sterling, Chapter 5- Nature-based solutions, sustainable development, and equity, Editor(s): Jan Cassin, John H. Matthews, Elena Lopez Gunn, *Nature-based Solutions and Water Security*, Elsevier, 2021, Pages 81-105, ISBN 9780128198711, <https://doi.org/10.1016/B978012-819871-1.00016-6>.
- Liang W, Wu Z, Cheng S, Zhou Q, Hu H (2003) Roles of substrate microorganisms and urease activities in wastewater purification in a constructed wetland system. *Ecol Eng* 21:191–195
- Lima, M. X., Carvalho, K. Q., Passig, F. H., Borges, A. C., Filippe, T. C., Azevedo, J. C. R., Nagalli, A. (2018). Performance of different substrates in constructed wetlands planted with *E. crassipes* treating.
- Lin, J., Hui, D., Kumar, A., Yu, Z., Huang, Y. (2023). Climate change and/or pollution on the carbon cycle in terrestrial ecosystems. *Front. Env. Sci.* 11. doi: 10.3389/fenvs.2023.1253172
- Liu, Y., Feng, B., & Yao, Y. (2024). Research Trends and Future Prospects of Constructed Wetland Treatment Technology in China. *Water*, 16(5), 738.
- Lucas, D.; Castellet-Rovira, F.; Villagrasa, M.; Badia-Fabregat, M.; Barceló, D.; Vicent, T.; Caminal, G.; Sarrà, M.; Rodríguez-Mozaz, S. The role of sorption processes in the removal of pharmaceuticals by fungal treatment of wastewater. *Sci. Total Environ.* 2018, 610, 1147–1153.

- Ma, Y., Li, J., Wu, J., Kong, Z., Feinstein, L., Ding, X. (2018). Bacterial and fungal community composition and functional activity associated with lake wetland water level gradients. *Sci. Rep.-UK*, 8, 760. doi: 10.1038/s41598-018-19153-z
- Malik, S., Bora, J., Nag, S., Sinha, S., Mondal, S., Rustagi, S., ... & Almutary, A. G. (2023). Fungal-based remediation in the treatment of anthropogenic activities and pharmaceutical-pollutant-contaminated wastewater. *Water*, 15(12), 2262.
- Mastretta, C., Taghavi, S., van der Lelie, D., Mengoni, A., Galardi, F., Gonnelli, C., ... & Vangronsveld, J. (2009). Endophytic bacteria from seeds of *Nicotiana tabacum* can reduce cadmium phytotoxicity. *International Journal of Phytoremediation*, 11(3), 251-267.
- Mesacasa, L., Cabral, F. S., Fochi, D. A. T., da Silva Oliveira, W., Oliveira, F., Kersting, M., ... & Machado, Ê. L. (2024). Constructed Wetlands and the role of the fungal community for wastewater treatment: A review. *Ecohydrology & Hydrobiology*.
- Mittal, Y., Srivastava, P., Pandey, S., & Yadav, A. K. (2023). Development of nature-based sustainable passive technologies for treating and disinfecting municipal wastewater: Experiences from constructed wetlands and slow sand filter. *Science of The Total Environment*, 900, 165320.
- Mir-Tutusaus, J.A.; Baccar, R.; Caminal, G.; Sarrà, M. Can white-rot fungi be a real wastewater treatment alternative for organic micropollutants removal? A review. *Water Res.* 2018, 138, 137–151.
- Nandakumar, S.; Pipil, H.; Ray, S.; Haritash, A. K. Removal of phosphorous and nitrogen from wastewater in *Brachiaria*-based constructed wetland. *Chemosphere*, 233, p. 216-222, 2019/10/01/ 2019.
- Nguyen, X. C., Tran, T. P., Hoang, V. H., Nguyen, T. P., Chang, S. W., Nguyen, D. D., ... & Bach, Q. V. (2020). Combined biochar vertical flow and free-water surface constructed wetland system for dormitory sewage treatment and reuse. *Science of The Total Environment*, 713, 136404.
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., ... & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the total environment*, 579, 1215-1227.
- Oliveira, F. R., Lutterbeck, C. A., de Souza Schneider, R. D. C., Rodriguez, A. L., Baggiotto, C., Kersting, M., ... & Machado, Ê. L. (2025). Evaluation of the performance of microalgae and constructed wetlands for the reduction of toxicity organic load and pharmaceuticals from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 114981.
- Oliveira, G. A., Colares, G. S., Lutterbeck, C. A., Dell'Osbel, N., Machado, E. L., & Rodrigues, L. R. (2021). Floating treatment wetlands in domestic wastewater

- treatment as a decentralized sanitation alternative. *Science of the Total Environment*, 773, 145609.
- Oni, B. A., Oziegbe, O., & Olawole, O. O. (2019). Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 222-236.
- Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101261. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
- Perfler R, Laber J, Langergraber G, Haberl R (1999) Constructed wetlands for rehabilitation and reuse of surface waters in tropical and subtropical areas—first results from small-scale plots using vertical flow beds. *Water Sci Technol* 40(3):155–162
- Polińska, W., Kotowska, U., Kiejza, D., & Karpińska, J. (2021). Insights into the use of phytoremediation processes for the removal of organic micropollutants from water and wastewater; a review. *Water*, 13(15), 2065.
- Rejmankova, E. (2011). The role of macrophytes in wetland ecosystems. *Journal of Ecology and Environment*, 34(4), 333-345.
- Saeed, T., & Khan, T. (2019). Constructed wetlands for industrial wastewater treatment: Alternative media, input biodegradation ratio and unstable loading. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 103042.
- Sauer, P. A., & Kimber, A. (2001). Technical assessment of constructed wetlands for wastewater treatment in Iowa. Iowa Association of Municipal Utilities, Ankeny, Iowa.
- Seth, N., Vats, S., Lakhanpaul, S., Arafat, Y., Mazumdar-Leighton, S., Bansal, M., & Babu, C. R. (2024). Microbial community diversity of an integrated constructed wetland used for treatment of sewage. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1355718.
- Sperling, M., & Sezerino, P. H. (2018). Dimensionamento de Wetlands construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes.
- Stenholm, Å.; Hedeland, M.; Arvidsson, T.; Pettersson, C.E. Removal of diclofenac from a non-sterile aqueous system using *Trametes versicolor* with an emphasis on adsorption and biodegradation mechanisms. *Environ. Technol.* 2019, 40, 2460–2472.
- Tao, Z., Jing, Z., Tao, M., Kong, Y., Guan, L., & Jia, Q. (2023). A novel filter-type constructed wetland for secondary effluent treatment: Performance and its microbial mechanism. *Bioresource Technology*, 380, 129075.

- Tomasini, A.; León-Santiesteban, H.H. The role of the filamentous fungi in bioremediation. In *Fungal Bioremediation*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; pp. 3–21.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215.
- Trappe, J. M. (1988). Lessons from alpine fungi. *Mycologia*, 80(1), 1-10.
- Turbé, A., Toni, A., De Benito, P., Lavelle, P., Lavelle, P., Ruiz, N., et al. (2010). *Soil Biodiversity: Functions, Threats and Tools for Policy Makers*. Wageningen: Wageningen University & Research.
- Vaksmas, A.; Guerrero-Cruz, S.; Ghosh, P.; Zeghal, E.; Hernando-Morales, V.; Niemann, H. Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants. *Front. Mar. Sci.* 2023, 10, 1070905.
- Varma, A. K., Shankar, R., & Mondal, P. (2018). A review on pyrolysis of biomass and the impacts of operating conditions on product yield, quality, and upgradation. *Recent advancements in biofuels and bioenergy utilization*, 227-259.
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., ... & Reddy, S. P. P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*, 12(17), 3102.
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002-1022.
- Wendling, L., Garcia, J., Descoteaux, D., Sowinska-Swierkosz, B., McPhearson, T., Frantzeskaki, N., ... & Crespo, C. H. (2021). Editorial: introduction to the nature-based solutions journal, *Nat. Based Solut.* 1 (2021), 100003.
- Wu, Sq., Chang, Jj., Dai, Y. et al. Treatment performance and microorganism community structure of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater. *Environ Sci Pollut Res* 20, 3789–3798 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1307-0>
- Wu, Sq., Chang, Jj., Dai, Y. et al. Treatment performance and microorganism community structure of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater. *Environ Sci Pollut Res* 20, 3789–3798 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1307-0>
- Wu, L., Nie, Y., Yang, Z., Zhang, J. (2016). Responses of soil inhabiting nitrogen-cycling microbial communities to wetland degradation on the Zoige Plateau, China. *J. Mt. Sci-engl.* 13, 2192–2204. doi: 10.1007/s11629-016-4004-5

- Xie, L., & Bulkeley, H. (2020). Nature-based solutions for urban biodiversity governance. *Environmental Science & Policy*, 110, 77-87.
- Xu, Z., Zhao, Y., Xu, Z., Chen, X., Zhang, X., Chen, Z., & Ban, Y. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced the drinking water treatment residue-based vertical flow constructed wetlands on the purification of arsenic-containing wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133241.
- Xu, Z., Huang, J., Chu, Z., Meng, F., Liu, J., Li, K., ... & Ban, Y. (2023). Plant and microbial communities responded to copper and/or tetracyclines in mycorrhizal enhanced vertical flow constructed wetlands microcosms with *Canna indica* L. *Journal of Hazardous Materials*, 451, 131114.
- Yan, Z., Yang, S., Chen, L., Zou, Y., Zhao, Y., Yan, G., ... & Wu, Y. (2024). Responses of soil fungal community composition and function to wetland degradation in the Songnen Plain, northeastern China. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1441613. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1441613>
- Yang, C., Zhang, X., Tang, Y., Jiang, Y., Xie, S., Zhang, Y., & Qin, Y. (2022). Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103140.
- Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., ... & Gao, B. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of environmental management*, 232, 8-21.
- Zepeda, L. C., Griffin, G., Shah, K., Bhargava, S., & Parthasarathy, R. (2023). A study of biochar physiochemistry and particle size distribution influencing the properties of water-based slurry fuels. *Environmental Research*, 236, 116578.
- Zhang, Y., Li, M., Dong, L., Han, C., Li, M., & Wu, H. (2021). Effects of biochar dosage on treatment performance, enzyme activity and microbial community in aerated constructed wetlands for treating low C/N domestic sewage. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101919.
- Zhao, Y., Lin, J., Cheng, S., Wang, K., Kumar, A., Yu, Z., et al. (2023). Linking soil dissolved organic matter characteristics and the temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir. *Ecol. Indicators*. 154, 110768. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110768
- Zhou, X., Liang, C., Jia, L., Feng, L., Wang, R., Wu, H., 2017. An innovative biochar-amended substrate vertical flow constructed wetland for low C/N wastewater treatment: impact of influent strengths. *Bioresour. Technol.* 247, 844–850.
- Zhouying, X. U., Yihui, B. A. N., Jiang, Y., Zhang, X., & Xiaoying, L. I. U. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi in wetland habitats and their application in constructed wetland: a review. *Pedosphere*, 26(5), 592-617.

