

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL

Eduardo Ezequiel Antunes Sosa

**Análise de Ciclo de Vida de Unidade Integrada de Anaerobiose + Wetlands
Construídos em Configurações Floating + Fluxo Vertical + Filtro Misto
Tratamento de Efluente Urbano**

Santa Cruz do Sul
2022

Eduardo Ezequiel Antunes Sosa

**Análise de Ciclo de Vida de Unidade Integrada de Anaerobiose + Wetlands
Construídos em Configurações Floating + Fluxo Vertical + Filtro Misto
Tratamento de Efluente Urbano**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado e Doutorado, Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental, Linha de Pesquisa em Tecnologias de Tratamento de Águas de Abastecimento e Residuárias, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Leandro Machado

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Adriane de Assis Lawisch Rodríguez

Santa Cruz do Sul

2022

Eduardo Ezequiel Antunes Sosa

**Análise de Ciclo de Vida de Unidade Integrada de Anaerobiose + Wetlands
Construídos em Configurações Floating + Fluxo Vertical + Filtro Misto
Tratamento de Efluente Urbano**

Esta dissertação foi submetida ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado e Doutorado, Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental, Linha de Pesquisa em Tecnologias de Tratamento de Águas de Abastecimento e Residuárias, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Dr. Ênio Leandro Machado
Professor Orientador - UNISC

Dr^a. Adriane de Assis Lawisch Rodríguez
Professora Co-Orientadora - UNISC

Dr. Jorge André Ribas Moraes
Professor examinador - UNISC

Dr. Carlos Alexandre Lutterbeck
Professor examinador - UFRGS

Dr^a. Marla Azário Lansarin
Professora examinadora - UFRGS

Santa Cruz do Sul

2022

RESUMO

A investigação da viabilidade técnica de sistemas de tratamento descentralizados de efluentes tem recebido atenção considerável nos últimos anos, uma vez que busca solucionar o problema do saneamento em contextos nos quais técnicas de remediação convencionais não são atraentes. Os *Wetlands* Construídos (WCs) têm sido considerados como uma tecnologia promissora nesse sentido, sendo estudados por pesquisadores do mundo todo e com diversos casos de sucesso de aplicação no tratamento de efluentes em diferentes escalas. O estudo da sustentabilidade ambiental desses sistemas, através de ferramentas como a Análise do Ciclo de Vida, busca responder questões fundamentais sobre o impacto e os potenciais benefícios ao meio ambiente oriundos da utilização dos *wetlands* *construídos* como alternativa a outras técnicas de tratamento. Diante desse contexto este trabalho tratou da realização de uma análise bibliométrica, revisando as publicações existentes acerca da aplicação da Análise do Ciclo de Vida a sistemas de *Wetlands* *Construídos*, seguida da aplicação da Análise do Ciclo de Vida a um sistema integrado de tratamento de efluentes composto por Reator/Biofiltro Anaeróbio, WC do tipo *floating*, WC de fluxo vertical subsuperficial integrado com Célula de Combustível Microbiana e Filtro de Leito Reativo. Na análise bibliométrica utilizaram-se os dados obtidos da base de dados *Web of Science* e analisados com o *software VosViewer 1.6.16*. Foram encontrados 87 trabalhos publicados entre 1999 e 2021, nos quais termos como “lodo ativado”, “custos” e “remoção de poluentes” se destacaram. Encontrou-se que diversos autores concordam sobre o fato de que a falta de estudos sobre os impactos econômicos e sociais dos WC é um problema. Já na aplicação da ACV, utilizou-se o *software SimaPro 8.0.4*, tendo unidade funcional de $2,9 \text{ m}^3 \text{ semana}^{-1}$ de efluente e fluxo de referência de 20 anos em três cenários, considerando os mesmos equipamentos, sendo o primeiro cenário com uso de energia elétrica para o bombeamento do efluente entre os equipamentos, o segundo cenário considerando o transporte por gravidade e um terceiro cenário, compreendendo a substituição de alguns materiais construtivos por alternativas de menor impacto ambiental. Os resultados demonstraram a contribuição de 84,8% (em Pontuação Única – Pt) para os materiais necessários para construção do sistema em escala piloto no cenário 1, bem como, 15,2% para a operação do sistema do Cenário 2, sem o uso de energia elétrica para bombeamento, o que permitiu concluir que a diferença nas condições operação entre os dois cenários não foi significativa. Já o cenário 3 mostrou que a substituição de materiais como fibra de vidro reforçada com poliéster e polietileno de alta densidade por alternativas como fibrocimento e polímeros reciclados pode reduzir significativamente o impacto ambiental em diversas categorias. Os resultados demonstraram a relevância dos estudos dos materiais e condições de operação dos sistemas de *wetlands* *construídos* para a garantia da eficiência ambiental, mas estudos subsequentes considerando aspectos econômicos e sociais desse tipo de sistema são necessários para avaliar melhor sua sustentabilidade.

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida (ACV); *wetlands* *construídos*; tratamento de efluentes.

ABSTRACT

The investigation of the technical feasibility of decentralized effluent treatment systems has received considerable attention in recent years, as it seeks to solve the problem of sanitation in contexts in which conventional treatment techniques are not attractive. Constructed Wetlands (CWs) have been considered as a promising technology in this sense, being studied by many researchers around the world and with several successful cases of application in the treatment of effluents at different scales. The study of the environmental sustainability of these systems, through tools such as Life Cycle Analysis, seeks to answer fundamental questions about the impact and potential benefits to the environment arising from the use of wetlands as an alternative to other treatment techniques. Given this context, this work was composed of a bibliometric analysis, reviewing the existing publications about the application of Life Cycle Analysis to Constructed Wetlands systems, followed by the application of a Life Cycle Analysis to an integrated wastewater treatment system composed of an Anaerobic Reactor/Biofilter, floating treatment wetland, subsurface vertical flow wetland integrated with Microbial Fuel Cells, and a Reactive Bed Filter. In the bibliometric analysis, data was obtained from the Web of Science database and analysed with the software VosViewer 1.6.16. The research found 87 articles published between 1999 and 2021, in which terms such as “activated sludge”, “costs” and “pollutant removal” stood out. It was found that several authors agree on the fact that the lack of studies on the economic and social impacts of CWs is a problem. In the application of the LCA, the software SimaPro 8.0.4 was used, with a functional unit of $2.9 \text{ m}^3 \text{ week}^{-1}$ of effluent and a reference flow of 20 years in three scenarios, considering the same equipments. The first scenario considered the use of electric energy to pump the effluent between the equipments, the second scenario considered gravity transport. A third scenario was also considered, comprising the replacement of some of the construction materials by alternatives with less environmental impact. The results showed a contribution of 84.8% (in Single Score - Pt) to the materials needed to build the system on a pilot scale in Scenario 1, as well as 15.2% for the operation of the Scenario 2 system, without the use of electrical energy for pumping, which allowed the conclusion that the difference in operating conditions between the two scenarios was not significant. Scenario 3 showed that replacing materials such as fiberglass reinforced with polyester and high-density polyethylene with alternatives such as fiber cement and recycled polymers can significantly reduce the environmental impact in several impact categories. The results showed the importance of studies of materials and operating conditions of wetland systems built to ensure environmental efficiency, but subsequent studies considering economic and social aspects of this type of system are necessary to better assess its sustainability.

Keywords: Life Cycle Analysis (LCA); bibliometry; constructed wetlands; wastewater treatment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivos.....	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	Erro! Indicador não definido.
2.1 <i>Wetlands</i> construídos (WCs) no tratamento de efluentes	Erro! Indicador não definido.
2.1.1 Histórico e classificações	Erro! Indicador não definido.
2.1.2 Aspectos operacionais e aplicações	Erro! Indicador não definido.
2.2 Análise de Ciclo de Vida (ACV) e Sustentabilidade	Erro! Indicador não definido.
2.3 ACV aplicada aos <i>Wetlands</i> Construídos	Erro! Indicador não definido.
3 METODOLOGIA GERAL	Erro! Indicador não definido.
3.1 Análise Bibliométrica	Erro! Indicador não definido.
3.2 Análise de Ciclo de Vida	Erro! Indicador não definido.
3.2.1 Caracterização dos Limites de Estudo	Erro! Indicador não definido.
3.2.2 Inventário do Ciclo de Vida	Erro! Indicador não definido.
3.2.3 ACV e ACCV	Erro! Indicador não definido.
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	Erro! Indicador não definido.
4.1 Artigo 1 - Análise Bibliométrica sobre Análise de Ciclo de Vida aplicada a <i>wetlands</i> construídos	Erro! Indicador não definido.
Resumo	Erro! Indicador não definido.
1 Introdução	Erro! Indicador não definido.
2 Metodologia	Erro! Indicador não definido.
3 Resultados e discussões.....	Erro! Indicador não definido.
3.1 Publicações ao longo dos anos.....	Erro! Indicador não definido.
3.2 Participação por autor	Erro! Indicador não definido.
3.3 Publicações por país.....	Erro! Indicador não definido.
3.4 Relevância de termos e <i>key-words</i>	Erro! Indicador não definido.

4	Conclusões.....	Erro! Indicador não definido.
5	Referências	Erro! Indicador não definido.
4.2	Artigo 2. Avaliação do Ciclo de Vida do Sistema Integrado Reator/Biofiltro Anaeróbios com Wetlands Construídos e Filtro Misto com Suporte Reativo no Tratamento de Efluentes Urbanos	Erro! Indicador não definido.
	Resumo	Erro! Indicador não definido.
1	Introdução	Erro! Indicador não definido.
2	Materiais e Métodos	Erro! Indicador não definido.
2.1	Objetivo e Escopo	Erro! Indicador não definido.
2.2	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para Construção e Operação de Tratamento	Erro! Indicador não definido.
3	Resultados e discussões.....	Erro! Indicador não definido.
3.1	Caracterização dos Dados para o Inventário de Ciclo de Vida (ICV)	Erro! Indicador não definido.
	Indicador não definido.	
3.2	ACV das Unidades dos Cenários 1 e 2.....	Erro! Indicador não definido.
3.3	ACV da Unidade com propostas de alteração	Erro! Indicador não definido.
4	Considerações Finais	Erro! Indicador não definido.
	Referências	Erro! Indicador não definido.
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	11
	REFERÊNCIAS.....	12

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento urbano e industrial vivenciado pela humanidade implica pressões variadas no meio ambiente. No que se refere ao uso de recursos naturais, destaca-se a utilização da água e a geração de efluentes em diversos processos fundamentais para o funcionamento da sociedade, efluentes esses que podem ser oriundos desde o ambiente doméstico, de serviços até o industrial.

Frequentemente, a utilização da água está associada ao lançamento de efluentes que a contaminam substâncias eutrofizantes ou até tóxicas, além de agentes patogênicos microbiológicos, que podem causar danos aos corpos hídricos se a água não for tratada antes da sua devolução à natureza. Dessa forma, é fundamental que essas águas residuárias passem por processos de tratamento para evitar causar danos ao meio ambiente e à saúde humana. Nesse sentido, são aplicadas técnicas de tratamento a esses efluentes recondicionando os parâmetros de qualidade da água visando a sua reutilização no seu processo de origem ou então a sua reintegração aos mananciais naturais (METCALF; EDDY, 2015).

Estima-se que a população brasileira tenha passado a marca dos 213 milhões de habitantes no ano de 2021. Contudo, boa parte da população não conta ainda com acesso a um sistema de tratamento de esgotos. De acordo com dados publicados pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, em 2019 apenas 54,1% das residências brasileiras eram atendidas por redes de esgoto, sendo esse índice um pouco maior (61,4%) quando consideradas apenas as zonas urbanas. Em contrapartida, o índice de residências atendidas por rede de abastecimento de água era, em 2019, de 83,7% no total, sendo de 92,9% em zonas urbanas (BRASIL, 2020; IBGE, 2021).

A falta de acesso por parte da população a sistemas de tratamento centrais através de uma rede de coleta, aliada ao fato de que em muitos locais, tais como zonas rurais, esse tipo de tratamento não é adequado, fez que com que se desenvolvessem pesquisas sobre métodos de tratamento de esgotos descentralizados, com enfoque local, utilizando sistemas que fossem robustos e de operação simples, bem como eficazes no tratamento e de baixo custo econômico e ambiental tanto de instalação quanto de operação (MACHADO et al., 2017).

Uma alternativa para o tratamento descentralizado de efluentes são os chamados jardins filtrantes, ou *wetlands* construídos (WCs). Particularmente, e em

concordância com pesquisas em diversos países, no Brasil têm sido realizadas pesquisas nas quais o emprego de WCs tem se mostrado eficaz na remoção de contaminantes da água (COLARES et al., 2021a; DA SILVA et al., 2021; DELL'OSBEL et al., 2020; SEZERINO et al., 2015). Contudo, conforme apontado por Sezerino et al. (2015), apesar do crescimento na pesquisa e aplicação de WCs no tratamento de esgotos, ainda são escassos os trabalhos avaliando o desempenho desses sistemas, especialmente no longo prazo. Assim como, ao mesmo tempo, deve ser avaliada a efetiva sustentabilidade desses sistemas.

A aplicação de ferramentas de análise do desempenho ambiental, com destaque para a Análise de Ciclo de Vida (ACV), a sistemas de tratamento de efluentes é um tema que tem levantado interesse de pesquisadores nos últimos anos (PARRA-SALDIVAR; BILAL; IQBAL, 2020). A ACV tem potencial para fazer um diagnóstico da sustentabilidade do desempenho ambiental de um produto ou processo ao longo de toda sua operação, desde a obtenção dos recursos para sua existência até o descarte final de eventuais resíduos, o que permite obter informações importantes para auxiliar na tomada de decisão sobre o tipo de produto ou processo a ser utilizado, bem como identificar pontos de melhoria (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018).

Diante do exposto, este trabalho visa desenvolver uma análise bibliométrica e aplicar ferramenta de Análise de Ciclo de vida a uma Unidade Integrada de Anaerobiose e *wetlands* construídos em Configurações *Floating* e Fluxo Vertical com Meio Filtrante Reativo no Tratamento de Efluente Urbano.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Utilizar a Análise de Ciclo de Vida no desenvolvimento de alternativa de saneamento descentralizado para aplicação na gestão e gerenciamento sustentável das águas de abastecimento e residuárias.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar análise bibliométrica com a ferramenta *VosViewer* 1.6.18 visando maior organização das correlações de pesquisas já existentes no tema;

- Desenvolver Análise de Ciclo de Vida para saneamento descentralizado com o sistema Reator-Fossa/Biofiltro Anaeróbio + WCs em Configurações Floating + Fluxo Vertical/CCM + Filtro misto;
- Elaborar Cenários de Prognósticos para o desenvolvimento do saneamento sustentável com ACV do sistema estudado em ETE de campus universitário

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da sustentabilidade ambiental, econômica e social de sistemas de tratamento de efluentes descentralizados, que são alternativas importante em contextos nos quais métodos de tratamento convencionais não são viáveis, é uma temática importante dentro da pesquisa em Gestão e Tecnologia Ambiental, e, através deste trabalho, que combinou uma revisão bibliométrica acerca da aplicação de Análise do Ciclo de Vida a sistemas de *Wetlands* Construídos e a aplicação de fato da Análise do Ciclo de Vida a um sistema integrado de tratamento de efluentes. Respostas aos objetivos, foi possível verificar os desafios e promessas que essas ferramentas e tecnologias trazem para não somente a pesquisa em tratamento de efluentes, mas para o desenvolvimento sustentável da sociedade humana.

Primeiramente, quanto aos resultados da análise bibliométrica, verificou-se que a colaboração internacional ainda tem muito a evoluir e agregar no desenvolvimento e compreensão do desempenho ambiental, econômico e social de sistemas de tratamento de efluentes descentralizados como os *wetlands*. Já no que se refere à aplicação da ferramenta de ACV a um sistema integrado de tratamento de efluentes, pôde-se verificar que o impacto causado pela etapa de construção do sistema pode ser um impeditivo do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, o que requer o estudo de materiais alternativos para sua construção e fontes de energia alternativas ou o projeto de sistemas que funcionem por gravidade para sua operação, juntamente com a avaliação econômica e ambiental, para que sua adoção ampla se torne uma realidade.

Foi possível verificar, em um caso concreto, que a ACV permite avaliar o desempenho ambiental do objeto analisado, considerando os impactos desde a extração de materiais e a produção de matérias-primas, passando pela operação e chegando ao fim da vida do sistema. Como complemento à Análise do Ciclo de Vida ambiental, é fundamental que estudos futuros da sustentabilidade de sistemas de tratamento de efluentes incluam em seus planejamentos o inventário de informações que permitam conduzir avaliações econômicas como a Análise do Custo de Ciclo de Vida (ACCV) e também de avaliações de impactos sociais como a Análise do Ciclo de Vida Social (ACV-S), que são ferramentas que, juntas, permitirão um julgamento mais completo acerca da sustentabilidade desses sistemas.

REFERÊNCIAS

- AKHOUNDI, A.; NAZIF, S. Life-cycle assessment of tertiary treatment technologies to treat secondary municipal wastewater for reuse in agricultural irrigation, artificial recharge of groundwater, and industrial usages. **Journal of Environmental Engineering**, v. 146, n. 6, p. 04020031, 2020.
- ALMUKTAR, S. A.; ABED, S. N.; SCHOLZ, M. Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 24, p. 23595–23623, 2018.
- ANDREWS, E. S. **Guidelines for social life cycle assessment of products: social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable development**. [s.l.] UNEP/Earthprint, 2009.
- ARDEN, S. et al. Human Health, Economic and Environmental Assessment of Onsite Non-Potable Water Reuse Systems for a Large, Mixed-Use Urban Building. **Sustainability**, v. 12, n. 13, 2020.
- AUSTIN, G.; YU, K. **Constructed wetlands and sustainable development**. [s.l.] Routledge, 2016.
- BAI, S. et al. Engaging multiple weighting approaches and Conjoint Analysis to extend results acceptance of life cycle assessment in biological wastewater treatment technologies. **Bioresource Technology**, v. 265, p. 349–356, 2018.
- BENOÎT, C. et al. The guidelines for social life cycle assessment of products: just in time! **The International Journal of Life Cycle Assessment** 2010 15:2, v. 15, n. 2, p. 156–163, 21 jan. 2010.
- BENOIT-NORRIS, C.; CAVAN, D. A.; NORRIS, G. Identifying social impacts in product supply chains: overview and application of the social hotspot database. **Sustainability**, v. 4, n. 9, p. 1946–1965, 2012.
- BRASIL. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2019**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagn%C3%B3stico_SNIS_AE_2019_Republicacao_31032021.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- BRIX, H. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. **Water Science and Technology**, v. 30, n. 8, p. 209–223, 1 out. 1994.
- BRIX, H. How ‘Green’ Are Aquaculture, Constructed Wetlands and Conventional Wastewater Treatment Systems? **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 45–50, 1 ago. 1999.

- CAPODAGLIO, A. G. et al. Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. **Water Practice and Technology**, v. 12, n. 2, p. 463–477, 2017.
- CHEN, J. et al. Fate and removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in hybrid constructed wetlands. **Environmental Pollution**, v. 249, p. 894–903, 2019.
- COELHO, O.; ORTEGA, E.; COMAR, V. Balanço de energia do Brasil. **Engenharia Ecológica e Agricultura Sustentável (Ecological Engineering and Sustainable Agriculture)**. Enrique Ortega, 2003.
- COLARES, G. S. et al. Combined system for the treatment and reuse of urban wastewater: The efficiency of anaerobic reactors p hybrid constructed wetlands p ozonation. **Water Science and Technology**, v. 80, n. 2, p. 254–264, 15 jul. 2019.
- COLARES, G. S. et al. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. **Science of The Total Environment**, v. 714, p. 136776, 20 abr. 2020.
- COLARES, G. S. et al. Floating treatment wetlands integrated with microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation. **Science of The Total Environment**, v. 766, p. 142474, 2021a.
- COLARES, G. S. et al. Hybrid constructed wetlands integrated with microbial fuel cells and reactive bed filter for wastewater treatment and bioelectricity generation. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1–14, 2021b.
- COROMINAS, L. et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. **Water Research**, v. 47, n. 15, p. 5480–5492, 1 out. 2013.
- COROMINAS, L. et al. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. **Water Research**, v. 184, p. 116058, 2020.
- DA SILVA, F. P. et al. Treatment of university campus wastewaters by anaerobic reactor and multi-stage constructed wetlands. **Journal of Water Process Engineering**, v. 42, p. 102119, 2021.
- DE AZEVEDO SAMPAIO, D. O.; ASSUNÇÃO, C. C.; AKASAKI, J. L. A construção civil sob o ponto de vista da avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida–revisão. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 13, n. 28, 2020.
- DE SOUZA CELENTE, G. et al. Algae turf scrubber and vertical constructed wetlands combined system for decentralized secondary wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 10, p. 9931–9937, 2019.

DE SOUZA CELENTE, G. et al. Acute ecotoxicity and genotoxicity assessment of two wastewater treatment units. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1–8, 2020.

DELL'OSBEL, N. et al. Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: Increased nutrient removal and landscape potential. **Ecological Engineering**, v. 158, p. 106072, 2020.

DELL'OSBEL, N.; MACHADO, Ê. L. Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas de tratamento de efluentes urbanos utilizando Microalgas e Wetlands Construídos. **Revista Monografias Ambientais**, v. 18, n. 1, p. 1, 2019.

DIXON, A.; SIMON, M.; BURKITT, T. Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. **Ecological Engineering**, v. 20, n. 4, p. 297–308, 1 set. 2003.

DUAN, N. et al. Evaluating the environmental impacts of an urban wetland park based on emergy accounting and life cycle assessment: A case study in Beijing. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 2, p. 351–359, 24 jan. 2011.

ERIKSSON, O. et al. Enhancement of biogas production from food waste and sewage sludge—environmental and economic life cycle performance. **Journal of environmental management**, v. 175, p. 33–39, 2016.

FAN, X. et al. Increasing plant diversity to mitigate net greenhouse effect of wastewater treatment in floating constructed wetlands. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 127955, 2021.

FARR, J. V. **Systems life cycle costing: economic analysis, estimation, and management**. [s.l.] CRC Press, 2019.

FLORES, L. et al. Constructed wetlands for winery wastewater treatment: A comparative Life Cycle Assessment. **Science of The Total Environment**, v. 659, p. 1567–1576, 2019.

FOLHA DE BOA VISTA. **Esgoto a céu aberto incomoda moradores**. Disponível em: <<https://folhabv.com.br/noticia/CIDADES/Capital/Esgoto-a-ceu-aberto-incomoda-moradores/46068>>. Acesso em: 30 nov. 2021.

FONDER, N.; HEADLEY, T. The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. **Ecological Engineering**, v. 51, p. 203–211, 1 fev. 2013.

FUCHS, V. J.; MIHELICIC, J. R.; GIERKE, J. S. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. **Water Research**, v. 45, n. 5, p. 2073–2081, 2011.

GALLEGO-SCHMID, A.; TARPANI, R. R. Z. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review. **Water Research**, v. 153, p. 63–79, 2019.

GARFÍ, M.; FLORES, L.; FERRER, I. Life cycle assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 211–219, 2017.

GOH, B. H.; SUN, Y. The development of life-cycle costing for buildings. **Building Research & Information**, v. 44, n. 3, p. 319–333, 2016.

GRIESSHAMMER, R. et al. PROSA–Product Sustainability Assessment. **Beschreibung der Methode**, 2007.

GRÖNLUND, S. E. Indicators and methods to assess sustainability of wastewater sludge management in the perspective of two systems ecology models. **Ecological Indicators**, v. 100, p. 45–54, 2019.

HAN, B. et al. Effects of water flow on submerged macrophyte-biofilm systems in constructed wetlands. **Scientific Reports 2018 8:1**, v. 8, n. 1, p. 1–12, 8 fev. 2018.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life cycle assessment**. [s.l.] Springer, 2018. v. 2018

HIRAISHI, T. et al. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. **IPCC, Switzerland**, 2014.

IBGE. **Projeção da população**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 25 out. 2021.

IEC, I. E. C. **IEC 60300-3-3:2017 | IEC Webstore | economic analysis, total cost of ownership**. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/31206&preview=1>>. Acesso em: 1 jan. 2022.

ISO, I. O. FOR S. **ISO - ISO 15686-5:2017 - Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing**. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/61148.html>>. Acesso em: 1 jan. 2022.

ISO, I. S. O. **ISO 14040: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework**. [s.l.: s.n.].

- JENSEN, A. K. et al. Including aesthetic and recreational values in cost-effectiveness analyses of land use change based nitrogen abatement measures in Denmark. **Journal of environmental management**, v. 240, p. 384–393, 2019.
- LIU, L. et al. Potential effect and accumulation of veterinary antibiotics in *Phragmites australis* under hydroponic conditions. **Ecological Engineering**, v. 53, p. 138–143, 1 abr. 2013.
- LIU, X. et al. Performance and mechanism of sulfamethoxazole removal in different bioelectrochemical technology-integrated constructed wetlands. **Water Research**, p. 117814, 2021.
- LÓPEZ BELMONTE, J. et al. Machine learning and big data in the impact literature. A bibliometric review with scientific mapping in Web of science. **Symmetry**, v. 12, n. 4, p. 495, 2020.
- LUTTENBERGER, A.; LUTTENBERGER, L. R. Sustainable procurement and environmental life-cycle costing in maritime transport. **WMU Journal of Maritime Affairs**, v. 16, n. 2, p. 219–231, 2017.
- LUTTERBECK, C. A. et al. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 527–536, 2017.
- LUTTERBECK, C. A. et al. Integrated system with constructed wetlands for the treatment of domestic wastewaters generated at a rural property – Evaluation of general parameters ecotoxicity and cytogenetics. **Ecological Engineering**, v. 115, p. 1–8, 2018.
- MACHADO, A. I. et al. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. **Journal of environmental management**, v. 187, p. 560–570, 2017.
- MACHADO, A. P. et al. Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities. **Water Science and Technology**, v. 56, n. 3, p. 15–22, 1 ago. 2007.
- MARTIN, B. C. et al. The role of root exuded low molecular weight organic anions in facilitating petroleum hydrocarbon degradation: Current knowledge and future directions. **Science of The Total Environment**, v. 472, p. 642–653, 15 fev. 2014.
- MASSOUD, M. A.; TARHINI, A.; NASR, J. A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 1, p. 652–659, 2009.
- METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. [s.l.] McGraw Hill Brasil, 2015.

MIAH, J. H.; KOH, S. C. L.; STONE, D. A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 846–866, 2017.

MU, X. et al. Water flow and temperature drove epiphytic microbial community shift: Insight into nutrient removal in constructed wetlands from microbial assemblage and co-occurrence patterns. **Bioresource Technology**, v. 332, p. 125134, 2021.

MULDER, A. The quest for sustainable nitrogen removal technologies. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 67–75, 1 jul. 2003.

MUÑOZ ORTIZ, I. Life Cycle Assessment as a Tool for Green Chemistry: Application to Different Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. **TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)**, 9 ago. 2006.

NGUYEN, T. K. L. et al. Assessing the environmental impacts and greenhouse gas emissions from the common municipal wastewater treatment systems. **Science of The Total Environment**, v. 801, p. 149676, 2021.

NOGUEIRA, R. et al. Economic and environmental assessment of small and decentralized wastewater treatment systems. **Desalination and Water Treatment**, v. 4, n. 1–3, p. 16–21, 1 abr. 2009.

PARRA-SALDIVAR, R.; BILAL, M.; IQBAL, H. M. N. Life cycle assessment in wastewater treatment technology. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 13, p. 80–84, 2020.

PEÑACOBÁ-ANTONA, L. et al. Assessing METland® design and performance through LCA: Techno-environmental study with multifunctional unit perspective. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 1331, 2021.

PEREIRA DA SILVA, F. et al. Treatment of university campus wastewaters by anaerobic reactor and multi-stage constructed wetlands. **Journal of Water Process Engineering**, v. 42, p. 102119, 1 ago. 2021.

QUEIROZ, R. DE C. S. DE et al. Life cycle thinking applied to phytoremediation of dairy wastewater using aquatic macrophytes for treatment and biomass production. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 122006, 2020.

RAMOS HUARACHI, D. A. et al. Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121506, 2020.

RAWAL, N.; DUGGAL, S. K. Life cycle costing assessment-based approach for selection of wastewater treatment units. **National Academy Science Letters**, v. 39, n. 2, p. 103–107, 2016.

RESENDE, J. D.; NOLASCO, M. A.; PACCA, S. A. Life cycle assessment and costing of wastewater treatment systems coupled to constructed wetlands. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 170–177, 1 set. 2019.

SAEED, T.; SUN, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. **Journal of Environmental Management**, v. 112, p. 429–448, 15 dez. 2012.

SEIDEL, K. Neue Wege zur Grundwasseranreicherung in Krefeld, Vol. II. Hydrobotanische Reinigungsmethode. **GWF Wasser/Abwasser**, v. 30, p. 831–833, 1965.

SEIDEL, K. Macrophytes and water purification. **Biological control of water pollution**, 1976.

SEZERINO, P. H. et al. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, p. 151–158, 2015.

SHAKED, S. et al. **Environmental life cycle assessment**. [s.l.] CRC Press, 2015.

SIMONEN, K. **Life cycle assessment**. [s.l.] Routledge, 2014.

STEINER, G. R.; FREEMAN, R. J. Configuration and substrate design considerations for constructed wetlands wastewater treatment. In: **Constructed wetlands for wastewater treatment**. [s.l.] CRC Press, 2020. p. 363–377.

SWARR, T. E. et al. Environmental life-cycle costing: A code of practice. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 5, p. 389–391, 27 jun. 2011.

TAO, W. Microbial removal and plant uptake of nitrogen in constructed wetlands: mesocosm tests on influencing factors. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 36, p. 36425–36437, 2018.

TONETTI, A. L. et al. Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções. **Biblioteca/Unicamp. Campinas, São Paulo**, v. 153, 2018.

TUKKER, A. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 4, p. 435–456, 2000.

UGGETTI, E. et al. Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands. **Water Research**, v. 45, n. 2, p. 573–582, 1 jan. 2011.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VARMA, M. et al. A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142540, 10 fev. 2021a.

VARMA, M. et al. A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142540, 10 fev. 2021b.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. DIMENSIONAMENTO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS NO BRASIL. DOCUMENTO DE CONSENSO ENTRE PESQUISADORES E PRATICANTES. **Wetlands**, 2018.

VYMAZAL, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Science of The Total Environment**, v. 380, n. 1, p. 48–65, 2007.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. **Water**, v. 2, n. 3, p. 530–549, 2010.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. **Environmental science & technology**, v. 45, n. 1, p. 61–69, 2011.

VYMAZAL, J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. **Water Research**, v. 47, n. 14, p. 4795–4811, 15 set. 2013.

WANG, J. et al. The effect of rhizosphere and the plant species on the degradation of sulfonamides in model constructed wetlands treating synthetic domestic wastewater. **Chemosphere**, v. 288, p. 132487, 2022.

WANG, M. et al. Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review. **Hydrobiologia**, v. 805, n. 1, p. 1–31, 2018.

WEIDEMA, B. P. The social footprint—a practical approach to comprehensive and consistent social LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 2016 **23:3**, v. 23, n. 3, p. 700–709, 8 ago. 2016.

YILDIRIM, M.; TOPKAYA, B. Assessing Environmental Impacts of Wastewater Treatment Alternatives for Small-Scale Communities. **CLEAN – Soil, Air, Water**, v. 40, n. 2, p. 171–178, 1 fev. 2012.

ZHANG, X. et al. Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 379, p. 122363, 1 jan. 2020.

ZHAO, X. et al. Evaluation of bioaugmentation using multiple life cycle assessment approaches: A case study of constructed wetland. **Bioresource Technology**, v. 244, p. 407–415, 2017.

ZHAO, X. et al. Bioaugmentation of atrazine removal in constructed wetland: Performance, microbial dynamics, and environmental impacts. **Bioresource Technology**, v. 289, p. 121618, 2019.

ZHAO, X. et al. Parameter optimization of environmental technologies using a LCA-based analysis scheme: A bioaugmentation case study. **Science of The Total Environment**, v. 737, p. 140284, 2020.

ZHAO, X.; BAI, S.; ZHANG, X. Establishing a decision-support system for eco-design of biological wastewater treatment: A case study of bioaugmented constructed wetland. **Bioresource Technology**, v. 274, p. 425–429, 2019.

ZHOU, J. B. et al. Emergy evaluations for constructed wetland and conventional wastewater treatments. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 14, n. 4, p. 1781–1789, 2009.

