

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIA PEREIRA BARBOSA ALVES

**CONTRIBUIÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR PARA
RECUPERAÇÃO DE ESTRUVITA DE ÁGUAS RESIDUAIS**

PONTA GROSSA

2022

JULIA PEREIRA BARBOSA ALVES

**CONTRIBUIÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR PARA RECUPERAÇÃO DE
ESTRUVITA DE ÁGUAS RESIDUAIS**

Contributions of circular economy to struvite recovery from wastewater.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli.

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Neves Puglieri.

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JULIA PEREIRA BARBOSA ALVES

**CONTRIBUIÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR PARA RECUPERAÇÃO DE
ESTRUVITA DE ÁGUAS RESIDUAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 21/Junho/2022

Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabio Neves Puglieri
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carla Fernanda Genaro
Graduação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Denilton da Conceição Fritz Junior
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

AGRADECIMENTOS

Dedico esta conquista, primeiramente, à minha família e ao meu namorado, que me sustentaram e me apoiaram em toda minha caminhada até aqui. Sem este alicerce, dificilmente conseguiria ter alcançado esta etapa.

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli, pela confiança em mim depositada, desde o convite para a parceria do projeto de iniciação científica até o momento de meu Trabalho de Conclusão de Curso. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fabio Neves Puglieri, que tão prontamente me atendeu em todas as minhas solicitações referentes à realização deste trabalho.

Às minhas amizades cultivadas no ambiente acadêmico, deixo meu agradecimento, pois muitas vezes foram o suporte que tive para enfrentar os desafios acadêmicos e da vida fora de casa.

RESUMO

O fósforo é um elemento fundamental para manutenção da vida animal e vegetal e apresenta-se como um componente insubstituível na fabricação de fertilizantes para produção de alimentos. Apesar de essencial, o fósforo envolve duas questões a respeito de sua disponibilidade: o impacto ambiental da eutrofização em virtude do excesso de fósforo em corpos hídricos e um cenário futuro de escassez do elemento em razão da não-renovabilidade do fósforo como recurso natural. Uma vez que o modelo linear de produção potencializa tais efeitos ao impulsionar a exploração de recursos, produção massiva, geração de efluentes e descarte de resíduos, o modelo circular surge como uma alternativa promissora dentro da perspectiva da recuperação de fósforo, podendo oportunizar a agregação de valor de resíduos, preservação ambiental e atenuação de questões associadas à escassez do fósforo no futuro. A pergunta de pesquisa: “A recuperação de fósforo na forma de estruvita é considerada uma prática associada a princípios da economia circular?” foi definida para nortear o estudo, cujo objetivo reside em analisar as contribuições da economia circular para a recuperação de estruvita de águas residuais. A metodologia adotada para atender aos objetivos propostos foi a realização de uma Revisão Sistemática Bibliográfica (RBS) e o protocolo de RBS executado resultou em um portfólio de 20 estudos alinhados à pergunta de pesquisa. Além do mais, inferiu-se que diante das evidências trazidas pelos estudos selecionados com relação à contribuição da estruvita em contextos de tecnologia consolidada, países em desenvolvimento e demais realidades, a abordagem da estruvita tende a ser compreendida como uma prática de contribuição circular, mesmo diante de desafios e limitações a serem superadas.

Palavras-chave: economia circular; recuperação de fósforo; preservação ambiental; recursos naturais; estruvita; contribuição.

ABSTRACT

Phosphorus is a fundamental element for the maintenance of animal and plant life and presents itself as an irreplaceable component in the manufacture of fertilizers for food production. Although essential, phosphorus involves two issues regarding its availability: the environmental impact of eutrophication due to the excess of phosphorus in water bodies and a future scenario of shortage of the element due to the non-renewability of phosphorus as a natural resource. Since the linear model of production potentiates such effects by boosting the exploitation of resources, massive production, generation of effluents and waste disposal, the circular model emerges as a promising alternative from the perspective of phosphorus recovery, which may provide opportunities for the aggregation of waste value, environmental preservation and mitigation of issues associated with phosphorus shortages in the future. The research question: "Is phosphorus recovery in the form of struvite considered a practice associated with circular economy principles?" was defined to guide the study, which objective lies in contributions from the circular economy to the recovery of struvite from wastewater. A methodology designed to meet the proposed objectives was to carry out a systematic review of RBS performed on a portfolio of 20 studies aligned with the research. Furthermore, given the evidence brought by the selected studies regarding the contribution of struvite in contexts of technology, developing countries and construction of realities, struvite tends to be understood as a practice of circular contribution even in the face of challenges and to be overcome.

Keywords: circular economy; phosphorus recovery; environmental preservation; natural resources; struvite; contribution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama sistêmico original dos fluxos de materiais – economia circular	18
Figura 2 - Diagrama esquemático de métodos biológico e químicos de recuperação de fósforo..	23
Figura 3 - Esquema de etapas do protocolo adotado para a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)	28
Figura 4 - Passos para a análise de Resultados da RBS.....	31
Figura 5 – Termos associados a partir das definições dos autores	51
Gráfico 1 - Perfil dos artigos selecionados na RBS em relação ao ano de publicação.....	37
Gráfico 2 - Perfil dos artigos selecionados em relação ao periódico de publicação.....	37
Quadro 1 - Descrição dos processos englobados no tratamento de águas residuais.....	22
Quadro 2 - Comparação entre os métodos de precipitação química de fósforo com base nos agentes coagulantes.	24
Quadro 3 - Strings de buscas elaboradas para processamento da RBS.	29
Quadro 4 - Conclusões relevantes à análise espacial da tecnologia das estruvita.	44
Quadro 5 - Percepção dos autores com a relação economia circular vs recuperação de fósforo.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da fase de processamento - RBS.....	33
Tabela 2 - Aproveitamento de trabalhos ao longo da filtragem de artigos	35
Tabela 3 - Percentual de aproveitamento ao longo de processo de filtragem geral.....	36

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CELAC	Comunidade dos Estados da América Latina e do Caribe
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FILT01	Filtro de Seleção 1
FILT02	Filtro de Seleção 2
FILT03	Filtro de Seleção 3
FILT04	Filtro de Seleção 4
FILT05	Filtro de Seleção 5
PAC	Policloreto de Alumínio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
NBR	Norma Técnica Brasileira
UE	União Europeia
USD	Dólares Americanos

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de Carbono
pH	Potencial Hidrogeniônico
MgCl ₂	Cloreto de Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
Kg	Quilogramas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Economia circular	17
3.2	O elemento fósforo	19
3.3	Tratamento de águas residuais	20
3.4	Recuperação de fósforo em águas residuais	22
3.5	Recuperação de fósforo utilizando sais de magnésio (precipitação de estruvita)	24
3.5.1	Precipitação da estruvita: economia circular no ciclo do fósforo	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Revisão bibliográfica sistemática (RBS)	27
4.1.1	Fase 1: entrada	28
4.1.2	Fase 2: processamento	30
4.1.3	Fase 3: saída	31
5	RESULTADOS	33
5.1	Resultados da fase de processamento – RBS	33
5.2	Resultados da síntese dos artigos selecionados	38
6	DISCUSSÃO	48
6.1	Discussões a partir da síntese dos resultados	48
6.1.1	Percepção dos autores – pergunta de pesquisa	48
6.1.2	Evidências da contribuição da recuperação da estruvita no contexto circular das águas residuais	52
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A - Artigos selecionados para compor o portfólio da RBS	70

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do fenômeno de industrialização, iniciado na Inglaterra por volta do ano de 1760, e unido à forte dependência de recursos naturais extraídos para satisfazer às demandas industriais (OLIVEIRA, 2016), o meio ambiente vem sendo impactado, desde então, pelos efeitos associadas às ações antropogênicas negativas da produção das indústrias.

A relação produtiva baseada na exploração intensiva dos recursos naturais e a geração de efluentes são alguns dos efeitos desencadeados pelo aumento do ritmo e das capacidades de produção das indústrias (GERENT, 2011). O primeiro, por estar associado à disponibilidade de matérias-primas necessárias às indústrias, aponta um problema na relação linear entre produção e disposição de recursos naturais, apontando para um futuro quadro de escassez de recursos. O segundo, ao estar relacionado à geração de resíduos, indica preocupação com os corpos hídricos e o com o respectivo equilíbrio estabelecido na biodiversidade existente.

Ainda, pode-se atribuir às atividades agrícolas e pecuárias parcial contribuição no incremento da geração de águas residuais, uma vez que as empresas agroindustriais integram um dos fortes pilares da indústria brasileira e, muitas vezes, são responsáveis por descartes diretos de efluentes sem qualquer tratamento anterior em corpos hídricos receptores de pequena escala (LOCKS, 2018). Bertoncini (2008) aponta a atividade agrícola como depositária de produtos químicos e orgânicos nos corpos hídricos, afirma que a pecuária confinada colabora com geração de grandes volumes de águas residuais contaminadas com metais pesados, nutrientes em excesso e patógenos, além de ressaltar a defasagem em sistemas de tratamento de águas residuais em propriedades rurais nas quais estas atividades se concentram.

A partir do momento em que as externalidades negativas passaram a ser mais evidentes, a busca por uma postura sustentável em relação às questões ambientais passou a ganhar ênfase em muitas corporações e instituições governamentais (EZIQUIEL, 2016), de modo que estas organizações se responsabilizassem ambientalmente pelos seus respectivos impactos gerados. Nesta perspectiva, a recuperação de fósforo, dentro do contexto do tratamento de águas residuais, pode ser um dos pontos fundamentais para a minimização de efeitos prejudiciais ao meio ambiente.

Dentro do escopo do tratamento de águas residuais, o tratamento terciário visando à recuperação do fósforo, nutriente com potencial de contaminação ambiental persistente (VACLAVIK, 2010) surge como uma opção atrativa para evitar danos aos corpos hídricos, como a eutrofização, e corrobora com a discussão a respeito da economia circular na perspectiva do ciclo do fósforo. O fenômeno da eutrofização pode ser compreendido pelo crescimento descontrolado de algas, que formam uma camada superficial nos corpos hídricos e impedem a passagem de luz necessária à fotossíntese de plantas e algas do ecossistema, favorecido pelo excesso de nutrientes (como o fósforo) disponível na água, gerando como consequência desequilíbrio do ecossistema local.

A economia circular caracteriza-se como sistema que emerge em oposição ao modelo tradicional e linear de produção (SANTIAGO, 2015), pautado na exploração de recursos naturais, produção e descarte de bens e produtos. O modelo circular preconiza o aproveitamento de um produto ou recurso em sua totalidade, maximizando seu tempo de vida dentro de um ciclo fechado, possibilitando que resíduos sejam reincorporados ao ciclo como insumos para a concepção de novos produtos, reduzindo consumo de recursos virgens, energia e água (LEITÃO, 2015). Ao propiciar o integral aproveitamento do recurso no ciclo, o sistema circular amplia a cadeia de valor de um produto, abrangendo todo seu ciclo de vida (WEETMAN, 2019) e promove sustentabilidade e benefícios ambientais concomitantemente aos benefícios econômicos associados à redução de geração de resíduos (RIBEIRO; KRUGLIANSKAS, 2014).

1.1 Justificativa

A justificativa para a realização da pesquisa se baseia em três pontos contemplados pela economia circular: preservação do meio ambiente (recursos hídricos e biodiversidade), oportunidade de agregação de valor de resíduos e na importância da economia circular na preservação do fósforo diante de um futuro cenário de escassez deste recurso. Estudos utilizando metodologias de avaliação do ciclo de vida (ACV), como o de Lindelhorn *et al* (2012), mostram o caminho no qual o fósforo percorre ao longo de seu ciclo de vida e os impactos gerados a partir de aplicação de fertilizantes extraídos de águas residuais, isto é, após agregação de valor

de uma fração até então considerado um resíduo, na agricultura (contexto no qual o fósforo circularia).

O estudo de métodos de recuperação de fósforo de efluentes é um fator de importância na relação entre geração de resíduos a partir de águas residuais e meio ambiente. Considerando o potencial do fósforo de, em altas concentrações, promover o fenômeno da eutrofização em corpos hídricos, a pesquisa tem relevância ao se propor a buscar formas de suprimir o potencial contaminante do fósforo em águas residuais ao promover recuperação de nutrientes, impactando na preservação dos corpos d'água e da biodiversidade ali presente.

No que tange à recuperação de fósforo na forma de estruvita, o estudo aponta também para uma oportunidade de agregação de valor ao resíduo gerado pelas indústrias e atividades humanas, uma vez que ao tratar águas residuais lançando mão deste método, obtém-se o mineral estruvita, mineral de fosfato presente na forma de cristais brancos, cujas características permitem sua possível utilização posterior como fertilizante de liberação lenta de nutrientes em culturas agrícolas.

Além do mais, haja vista um iminente cenário de escassez de recursos essenciais à vida, como o fósforo, a pesquisa assume um papel fundamental ao corroborar para a evolução da discussão sobre a economia circular e de como ela se mostra uma alternativa interessante em relação ao modelo linear de produção e consumo do fósforo. Por se tratar de uma pesquisa que envolve a recuperação de um recurso finito (fósforo) de águas residuais, em um âmbito da economia circular, o estudo se alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 11, 12 e 14, que visam, respectivamente, à Água Potável e Saneamento, Cidades e Comunidades Sustentáveis, Consumo e Produção Sustentáveis e Vida na Água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral:

Analisar as contribuições da economia circular para a recuperação de estruvita de águas residuais.

2.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar Economia Circular, fósforo, tratamento de águas residuais e recuperação de fósforo a partir do mineral estruvita.
- Identificar estudos que lançam mão de tecnologias de recuperação de estruvita de águas residuais.
- Vincular a recuperação de fósforo de águas residuais na forma do mineral estruvita à perspectiva da economia circular.
- Ressaltar a importância da economia circular, no ciclo do fósforo, diante de um futuro cenário de escassez do nutriente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Economia Circular

A segunda metade do século XVIII proporcionou ao mundo o fenômeno da industrialização, a qual transformou a relação do homem com as formas de produção. O impulsionamento do desenvolvimento tecnológico culminou em uma aceleração do ritmo de produção e passou a exigir maior exploração dos recursos naturais para suprir a nova demanda.

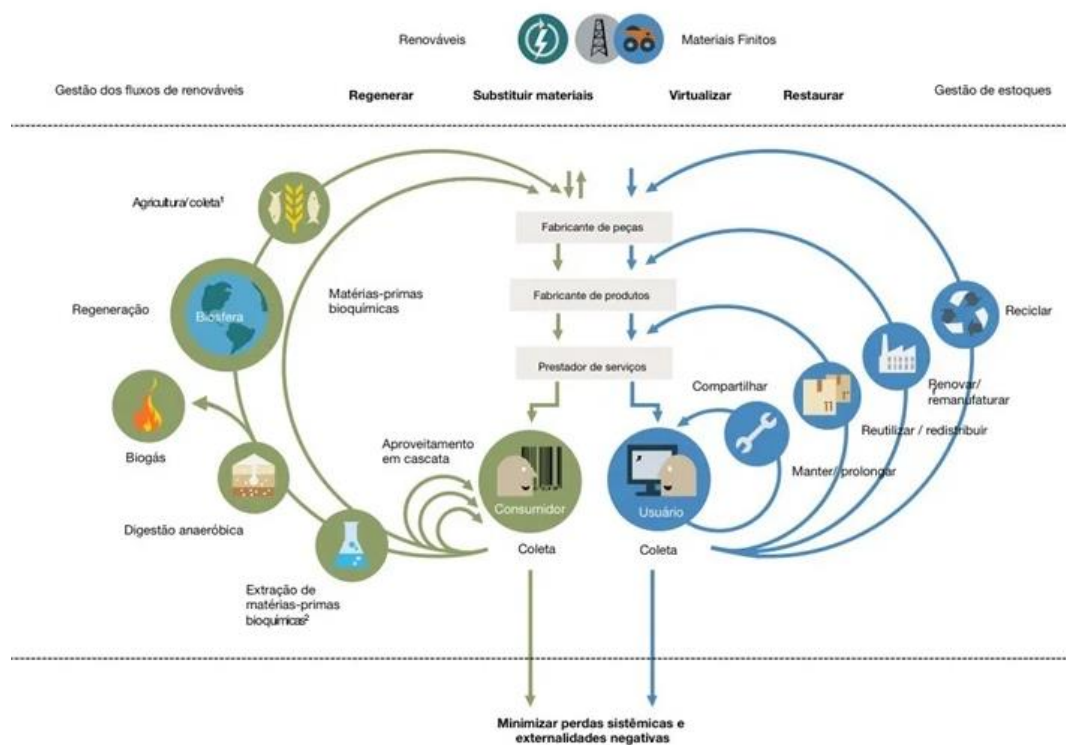
A competição pelo avanço tecnológico e industrial, o processo de imperialismo, isto é, o desbravamento territorial em busca de matérias-primas naturais, passou a ser uma forte característica da industrialização e mudou a relação do homem com o meio ambiente. Desta forma, os recursos naturais passaram a ser uma conveniente e abundante fonte de insumos às indústrias e alimentam um sistema de produção linear que negligencia os limites de exploração destes recursos (ROBLES et al., 2020).

Uma vez que o gargalo do sistema “pegar, produzir, descartar” (LACY, 2014) se encontra no esgotamento dos recursos que o alimentam, a economia circular emerge como alternativa ao modelo linear. A economia circular propõe um sistema fechado no qual os recursos utilizados e resíduos gerados possam interagir circularmente (TIOSSI; SIMON, 2021), de modo a manter os recursos e materiais pelo maior tempo possível dentro da cadeia produtiva (KASPRZYK et al., 2020), permitindo que um resíduo possa ser convertido em matéria-prima ou produto dentro deste ciclo.

De acordo com documento elaborado pela Fundação Ellen MacArthur (MacArthur, 2013), a economia circular é um sistema industrial de caráter restaurativo e regenerativo, cujos princípios se baseiam em: 1) Eliminação de resíduos ou poluição desde o início, isto é, o sistema é desenhado para que não haja desperdícios, 2) Manter produtos, componentes e materiais em uso, de modo que estes permaneçam altamente úteis ao longo de todo seu ciclo, 3) Regeneração de sistemas naturais, visto que a energia que move este ciclo deve ser renovável o suficiente para que o sistema se mantenha resiliente e não seja dependente de recursos.

O diagrama de borboleta (Figura 1), ou diagrama sistêmico, proposto pela Fundação MacArthur, apresenta o fluxo contínuo de materiais técnicos e biológicos através do círculo de valor (MACARTHUR, 2013).

Figura 1 - Diagrama sistêmico original dos fluxos de materiais – economia circular



Fonte: Jornal da USP (2016), adaptado de MacArthur (2013)

A análise do diagrama sistêmico, representado pela Figura 1, na percepção de Pinto e Costa (2021), compreende que o topo da representação traz a separação entre matérias-primas renováveis (nutrientes biológicos) e materiais finitos (nutrientes técnicos), ambos associados ao primeiro princípio da economia circular, de modo que estas duas classificações de nutrientes são utilizados por fabricantes de componentes, fabricante de produtos e por prestadores de serviços, podendo os nutrientes biológicos retornar aos ciclos internos na forma de biogás, agricultura, regeneração ou reaproveitamento em cascata e os nutrientes técnicos circularem na forma de partilha, prolongamento de ciclo de vida, reutilização, redistribuição, reciclagem e remanufatura. A base da imagem, contendo a frase “Minimizar perdas sistêmicas e externalidades negativas”, remete ao terceiro princípio da economia circular e simboliza o efeito da aplicação contínua, sistemática e integrada do sistema

circular pela sociedade, de modo a entregar ao meio ambiente e sistemas naturais o mínimo de danos e externalidade que possam afetá-los negativamente.

Assim, a economia circular é considerada uma via interessante para combater eventuais desafios ambientais que possam surgir e colabora para promover o desenvolvimento sustentável (KORHONEN et al., 2018). O desenvolvimento sustentável, por sua vez, está associado aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), dos quais 5 deles – Produção e Consumo Sustentável (ODS 12), Água Potável e Saneamento (ODS 6), Energia Limpa e Acessível (ODS 7), Trabalho Decente e Crescimento Econômico (ODS 8) e Vida Terrestre (ODS 15) – estão fortemente atrelados às práticas da economia circular (PANCHAL et al., 2021).

Dentro da perspectiva da recuperação do fósforo, Mayer et al. (2016) apontam a prática da recuperação do nutriente como uma oportunidade de oferecer um retorno valioso à sociedade ao melhorar a segurança alimentar e equidade social e um retorno ao meio ambiente ao promover melhora na qualidade ambiental. Golroudbary et al. (2020) apresentam em seu estudo exemplos de processo de transição de um modelo linear para um circular dentro do ciclo de vida do fósforo na Europa, reforçando a economia circular como uma ferramenta de uso sustentável do fósforo, visto sua alta capacidade de recuperação e reincorporação dentro da cadeia.

3.2 O Elemento Fósforo

O fósforo (P) é um nutriente de origem mineral, essencial ao desenvolvimento e saúde animal, crescimento de plantas e de microrganismos que degradam matéria orgânica. (SOUZA, 2017). Embora esteja presente em diversos alimentos de origem animal ou vegetal, o fósforo não está disponível livremente e pode ser obtido a partir da extração de rochas fosfáticas presentes na crosta terrestre, na forma de fosfatos, caracterizando-se como um recurso não renovável (PANTANO et al., 2016).

Na natureza, conforme Potrich (2019), é necessário que haja disponibilidade de fósforo nos corpos hídricos para que se mantenha a vida aquática e que as algas, principais fontes de oxigenação deste ambiente, possam ser nutridas. Todavia, quando presente em excesso, o fósforo pode desencadear um processo de eutrofização das águas, caracterizado por um incremento de disponibilidade de

matéria orgânica provocada por razões naturais ou antropogênicas (DOYLE; PARSONS, 2002), causando diminuição de níveis de oxigênio dissolvido na água e, conseqüentemente, gerando desequilíbrio nos ecossistemas aquáticos.

Na agricultura, o fósforo é um elemento indispensável para a produção de fertilizantes fosfatados que são destinados à aplicação agrícola em cultivos de larga escala (COUTO, 2018), sendo frequentemente combinado com ácido sulfúrico, nitrogênio e potássio para a fabricação destes fertilizantes minerais (CORDELL et al., 2009).

Visto que o fósforo é um nutriente fundamental na produção de alimentos e, considerando o crescimento contínuo da população mundial, acompanhado do aumento da demanda de alimentos para suprir tal demanda (HELIN; WEIKARD, 2019), surge como desafio o suprimento desta necessidade por alimentação tendo em conta alguns fatores limitantes dentro do ciclo deste nutriente: a não renovabilidade do fósforo e a impossibilidade de substituí-lo por outro elemento na produção de fertilizantes (PRADEL; AISSANI, 2019).

Desta forma, evidenciam-se as duas problemáticas envolvendo o fósforo considerando as óticas ambiental e de disponibilidade de recursos: o impacto ambiental induzido pelo excesso de fósforo nos corpos aquáticos (eutrofização) e a possibilidade de um cenário futuro de escassez do nutriente, uma vez que estimativas apontam para um esgotamento global de reservas de rochas fosfáticas entre os próximos 45 a 95 anos (PANTANO et al., 2016).

3.3 Tratamento De Águas Residuais

O crescimento industrial e populacional, além de favorecer o desenvolvimento de um modelo de consumo e produção linear, também desencadeou um dos maiores efeitos, do ponto de vista sócio-econômico, associados a este processo: a geração de efluentes (BAKARE et al., 2017).

Conforme Ortiz e Américo-Pinheiro (2016), pode-se entender como águas residuais a junção de efluentes industriais, efluentes domésticos, efluentes provenientes de comércios e instituições, águas urbanas e efluentes gerados a partir de atividades agrícolas. A norma brasileira NBR 9800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA

DE NORMAS TÉCNICAS, 1987), define como efluentes líquidos industriais o despejo líquido emitido pelas indústrias, do qual fazem parte: efluentes do processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgotos domésticos. Em termos de regulação de lançamento de fósforo em corpos hídricos, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) atribui ao órgão ambiental competente a definição de padrões específicos para parâmetros de fósforo em corpos receptores com histórico de florescimento de cianobactérias na resolução 430/2011 e na resolução 357/2005 define faixas de concentrações críticas de fósforo total em águas doces de ambientes lênticos, sendo estes intervalos 0,020 a 0,025 mg/L, 0,030 a 0,050 mg/L e 0,05 a 0,075 mg/L referentes às Classes 1, 2 e 3, respectivamente (KLEIN; AGNE, 2012).

À medida que a atividade antropogênica foi se consolidando, a produção acompanhou o acelerado ritmo e passou a requerer uma maior demanda de exploração de recursos naturais (DUTTA et al., 2021) e, conseqüentemente, passou a gerar um volume considerável de efluentes líquidos em decorrência de sua operação (TRIANNI et al., 2021). Neste contexto, frente ao impacto ambiental ocasionado pela produção industrial em larga escala e ao crescimento populacional, a preocupação com a gestão dos recursos hídricos surgiu, tanto em países em desenvolvimento quanto mundo afora, como uma pauta relevante de discussão (KAMALI et al., 2019).

Visto a necessidade da gestão destes efluentes, a realização de um tratamento das águas residuais é uma etapa de extrema importância na busca pela diminuição do impacto ambiental causado pelos efluentes e contribui para o atendimento de requisitos de legislações ambientais (GIORDANO, 2004).

A Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) ou Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) é uma estrutura projetada com propósitos de proteger a saúde pública, vidas aquáticas e preservar o uso da água (ORTIZ; AMÉRICO-PINHEIRO, 2016). No que tange ao tratamento destas águas, o processo está fortemente ligado às especificações desejadas ao uso, mas envolvem, em geral, processos de separação de misturas e etapas de desinfecção (LUCENA et al, 2018). Brandão et al (2000) define que o tratamento de águas residuais é constituído de quatro etapas: preliminar, primário, secundário e terciário.

O Quadro 1 descreve brevemente a finalidade da realização de cada tipo de tratamento e quais tipos de equipamentos e operações são utilizados nas mesmas.

Quadro 1 - Descrição dos processos englobados no tratamento de águas residuais.

Tratamento	Finalidade	Equipamentos/ Operações empregados
Preliminar	Remoção de materiais suspensos (sólidos grosseiros, sólidos finos, areia).	Gradeamento, Desarenador, Peneiras.
Primário	Remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis, materiais flutuantes e matéria orgânica suspensa.	Floculadores, Decantadores Primários, Peneiras Rotativas.
Secundário	Remoção de matéria orgânica em solução através de ação microbiológica.	Tanques de aeração, Lagoas de aeração e estabilização, Decantadores Secundários, Reatores Anaeróbios, etc.
Terciário	Remoção de materiais específicos como nutrientes, metais pesados, compostos orgânicos, entre outros, visando o “polimento” do efluente.	Filtração, Cloração, Adsorção, Precipitação, Coagulação, Ozonização, etc.

Fonte: Autoria Própria, 2022

Ainda sobre o tratamento de águas residuais, a concentração elevada de determinados nutrientes no efluente emitido é um ponto crítico de atenção. O fósforo, apesar de ser um nutriente fundamental à vida, pode apresentar potencial poluidor de corpos hídricos em altas dosagens, induzindo a um processo de eutrofização ocasionado por atividades antropogênicas e causando uma série de alterações nos ecossistemas dos corpos receptores destes efluentes líquidos (MARONEZE et al., 2014).

Para condicionar os efluentes para sua disposição nos corpos receptores, pode-se lançar mão de tratamentos terciários de recuperação de fósforo como uma maneira de reduzir a concentração do nutriente no efluente e assim evitar um posterior impacto ambiental, mas também como uma via de recuperação deste recurso para reutilização para outros fins ou para a sua reincorporação dentro de um ciclo produtivo.

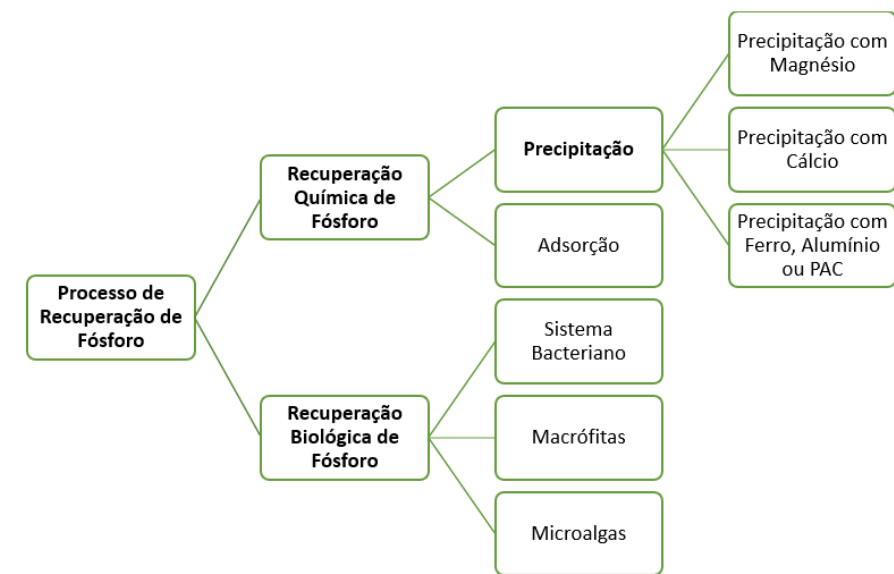
3.4 Recuperação De Fósforo Em Águas Residuais

No tratamento terciário para recuperação de fósforo, o nutriente é convertido à uma forma sólida ao ser submetido a operações como sedimentação, flotação ou filtração, podendo gerar como fração sólida de fósforo um sal insolúvel, massa

biológica no lodo ativado ou materiais sólidos que tenham afinidade com o íon fosfato (FANGMEIER; GENNARI; REISDÖRFER, 2015).

A recuperação do fósforo pode se dar por três vias: física, química ou biológica. Conforme Fangmeier, Gennari e Reisdörfer (2015), nos métodos de recuperação físicos são utilizados materiais sólidos adsorventes como óxidos de alumínio e ferro, zeólitas, silicatos, carvão, entre outros, todavia, é uma via pouco estabelecida, de alto custo e nem sempre eficiente. De acordo com Garss (2019), a recuperação do nutriente por métodos biológicos ocorre por processos microbianos, macrófitas e microalgas, ao passo que, no método químico de recuperação, utiliza-se o processo de precipitação química mediante adição de sal de metais e de adsorção. A Figura 2 traz um diagrama que representa os processos biológicos e químicos de recuperação de fósforo.

Figura 2- Diagrama esquemático de métodos biológico e químicos de recuperação de fósforo



Fonte: Adaptado de Grass (2019)

De acordo com Silva (2009), atinge-se a precipitação do fósforo de efluentes mediante adição de sais metálicos à base de alumínio, ferro, cálcio e convertendo a fração orgânica do fósforo em polifosfatos, ortofosfatos e fósforo orgânico, promovendo a clarificação do efluente dotado de uma carga ínfima de matéria orgânica em suspensão.

O Quadro 2 relaciona os produtos formados a partir da precipitação química do fósforo mediante adição de sais de ferro, alumínio (sulfato de alumínio ou PAC), cálcio e magnésio.

Quadro 2 - Comparação entre os métodos de precipitação química de fósforo com base nos agentes coagulantes

Tipo de coagulante	Reação de precipitação	Fração sólida formada
Sal de ferro	$\text{Fe}^{3+} + \text{H}_n\text{PO}_4^{3-n} \leftrightarrow \text{FePO}_4 + n\text{H}^+$	Fosfato férrico (insolúvel)
Sal de alumínio	$\text{Al}^{3+} + \text{H}_n\text{PO}_4^{3-n} \leftrightarrow \text{AlPO}_4 + n\text{H}^+$	Fosfato de alumínio
Sais de cálcio	$10\text{Ca}^{2+} + 6\text{PO}_4^{3-} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow$ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Hidroxiapatita
Sais de magnésio	$\text{Mg}^{2+} + \text{PO}_4^{3-} + \text{NH}_4^+ + 6\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow$ $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Fosfato de amônio e magnésio (estruvita)

Fonte: Autoria própria, 2022

3.5 Recuperação De Fósforo Utilizando Sais De Magnésio (Precipitação De Estruvita)

Dentre os métodos de recuperação de fósforo de efluentes via precipitação química, o método de recuperação utilizando sais de magnésio é o foco do presente estudo. Conforme Santos (2011), os compostos de magnésio são utilizados de forma conveniente para a recuperação de fósforo através da obtenção de estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), isto é, de uma fração virtualmente insolúvel que permite sua separação de uma fase líquida. Castro (2014) afirma que o método da precipitação da estruvita se apresenta como uma técnica eficaz na recuperação do fósforo de efluentes líquidos.

O fosfato de amônio e magnésio hexahidratado, também conhecido como estruvita, é um mineral de coloração branca, contendo proporções equimolares de magnésio (Mg^{2+}), amônio (NH_4^+) e fosfato (PO_4^{3-}), caracterizado por uma estrutura cristalina ortorrômbica. É um mineral denso, não apresenta odor, apresenta baixa solubilidade em água, ao passo que, em soluções ácidas e alcalinas, apresenta comportamento de alta solubilidade e de insolubilidade, respectivamente (FILHO, 2019). O comportamento insolúvel em faixas de pH alcalinos é o fator que permite sua precipitação e separação do sobrenadante líquido da solução.

É importante ressaltar alguns fatores intervenientes que controlam a precipitação da estruvita. Parâmetros como pH, agitação (KATAKI et al., 2016),

presença de impurezas na solução (LIU; WANG, 2019), razão molar, temperatura e a presença de íons não desejáveis afetam o processo de nucleação e crescimento do cristal de estruvita (YAN; SHIH, 2016). Mavhungu et al. (2020), em seu estudo, avaliaram a influência dos parâmetros operacionais tempo de contato, dosagem de magnesita, pH inicial do efluente e temperatura e determinaram condições ótimas de processo do ponto de vista ambiental. Numviyimana et al. (2020), em sua pesquisa, chamaram atenção para a competição de contra-íons de fosfato, que devido à sua capacidade de formação de sais menos solúveis, poderiam incidir sobre a precipitação da estruvita ou até mesmo inibi-la.

Além dos desafios encontrados na precipitação da estruvita, como a dificuldade na manipulação das variáveis do processo, variações em função de distúrbios que prejudicam o controle da qualidade do produto (LI et al., 2019), Castro (2014) e Sun, Mohammed e Liu (2020) destacam a necessidade de se adaptar o processo a uma aplicação em larga escala, visando estabelecer um processo de recuperação tecnologicamente e economicamente viáveis.

Nesta perspectiva, para driblar desafios associados ao alto custo de processo em função das fontes de magnésio utilizadas, alguns estudos que propõem a utilização de fontes alternativas de magnésio para reduzir o custo da operação podem ser mencionados. Fontes alternativas de magnésio como cinzas de resíduos sólidos (PINATHA; POLPRASERT; ENGLANDE JR., 2020), cinza de madeira (SAKTHIVEL; TILLEY; UDERT, 2012), salmoura marinha, compostos comerciais como óxido de magnésio (MgO) e cloreto de magnésio (MgCl₂) (MEMELLI, 2019) foram exploradas com o intuito de corroborar com o rol de opções possíveis para a redução de custos no processo de obtenção da estruvita.

3.5.1 Precipitação da Estruvita: Economia Circular no Ciclo do Fósforo.

O método de precipitação da estruvita é considerada uma alternativa promissora do ponto de vista da recuperação de fósforo de efluentes, assunto que cada vez mais vem atraindo interesse em virtude do possível cenário de esgotamento de recursos (ZHANG et al., 2021), ocasionado pelo gargalo do modelo linear de produção e consumo.

Conforme Li et al. (2019), a recuperação do fósforo na forma do cristal estruvita se mostra com um enorme potencial de atenuar o esgotamento de recursos naturais e de reduzir impactos ambientais em corpos hídricos. Wang et al. (2017), ressalta, além da contribuição do método para a redução do fenômeno da eutrofização e de se mostrar uma forma de lidar com uma potencial escassez de recursos rochosos de fósforos, a eficiência da aplicação da estruvita em atividades agrícolas como produto comercial com valor agregado na forma de fertilizante (UYSAL; YILMAZEL; DEMIRER, 2010).

Krishnamoorthy et al. (2021) apontam em seu estudo algumas vantagens da aplicação da estruvita como fertilizante de liberação lenta: baixo teor de metais pesados em comparação a outros fertilizantes, gestão de resíduos, geração de renda a partir da comercialização da estruvita, redução da dependência das rochas fosfáticas, entre outros. Rahman *et al* (2014) afirmam que o fertilizante à base de estruvita tem sido utilizado com êxito em gramados, mudas de árvores, plantas ornamentais, vegetais, culturas de beterraba sacarina e, além disso, agrega benefícios em sua aplicação ao não favorecer a queima de raízes em caso de excesso de dosagens, favorecer um longo efeito residual na zona radicular da planta e proporcionar lenta liberação de nutrientes durante o crescimento das plantas. Tortajada Chacón (2021) concluiu em seu estudo a influência positiva de tratamento com estruvita em culturas de rabanetes e alfaces, uma vez que sua aplicação proporcionou efeitos como crescimento mais acelerado no comprimento do talo e maior diâmetro de rabanetes, maior quantidade de folhas tanto nas culturas de alface quanto na de rabanete, maior teor de flavonoides e fenóis totais em rabanetes.

De acordo com Franci (2018), embora a quantidade de fósforo recuperada não seja suficiente para suprir à demanda de global por este nutriente, a combinação de ações de recuperação e reutilização de fósforo podem contribuir com a construção de um futuro mais sustentável. Neste sentido, colocar em prática os princípios da economia circular definidos pela Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2017a) – eliminar resíduos e poluição desde o princípio, manter materiais e produtos em uso, regenerar sistemas naturais – é um passo fundamental para alcançar esta relação mais sustentável com o ciclo do fósforo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o procedimento metodológico ao qual o presente trabalho seguiu de modo a atingir os objetivos estabelecidos para o estudo.

A metodologia adotada para este estudo é a de Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) para levantamento de informações, pois é uma ferramenta que permite, de maneira robusta e sistematizada, identificar, interpretar e avaliar questões de pesquisa, além de revisar tendências (CORNELLI et al., 2014) sobre a temática da economia circular no contexto da recuperação de fósforo de águas residuais.

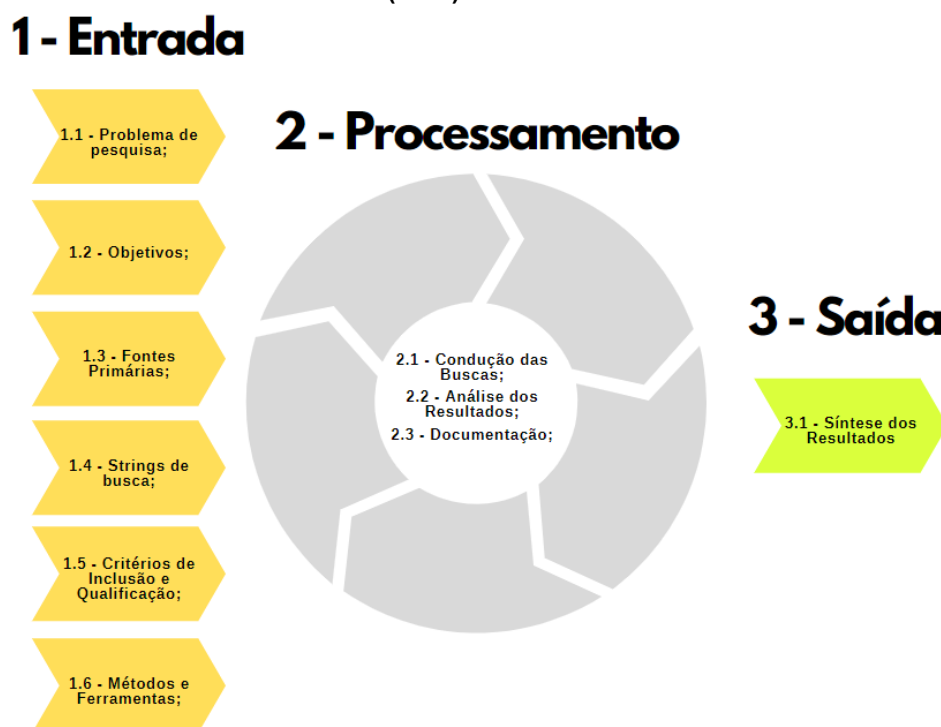
4.1 Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)

Conforme Sampaio e Mancini (2007), a revisão sistemática consiste em um método de pesquisa em que se utiliza a literatura como fonte de dados a respeito de determinada temática. Botelho, de Almeida Cunha e Macedo (2011) e Pollock e Berge (2018) defendem a RBS como um meio de obter evidências para dar suporte ao aumento das intervenções e informações científicas e para responder a uma questão de pesquisa previamente definida, lançando mão do levantamento de todas as pesquisas pertinentes à questão de pesquisa definida, avaliação crítica de pesquisa e síntese de resultados.

De acordo com Brizola e Fantin (2016), existe uma relação entre o pesquisador com os *stakeholders*, ou seja, as partes interessadas pela pesquisa, e esta relação deve ser respeitada ao longo de todo o processo da revisão sistemática.

Assim, para atingir os objetivos propostos neste estudo, selecionou-se como metodologia a revisão bibliográfica sistemática baseada no modelo proposto por Levy e Ellis (2006) e reproduzido Conforto, Amaral e Silva (2011), a qual define a revisão sistemática divididas em três grandes fases: Entrada, Processamento e Saída. A Figura 3 ilustra o procedimento utilizado para a execução da RBS.

Figura 3 - Esquema de fases do protocolo adotado para a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)



Fonte: Adaptado de Conforto, Amaral e Silva (2011)

4.1.1 Fase 1: Entrada.

Para iniciar o protocolo da revisão sistemática, é preciso definir objetivos e questão da pesquisa de forma clara, contemplando o problema ou questão a ser estudada (GALVÃO; RICARTE, 2019).

Para a etapa 1.1 – Problema de Pesquisa: definiu-se que a questão de pesquisa que irá nortear a RBS é: “A recuperação de fósforo na forma de estruvita é considerada uma prática associada a princípios da economia circular?”.

Em seguida, para a fase 1.2 – Objetivos: tem-se que os objetivos da RBS estão fortemente ligados com o objetivo geral proposto para este trabalho: avaliar se o método de recuperação de fósforo na forma de estruvita está, de acordo com a literatura, associado com um dos princípios da Economia Circular (EC) e como os estudos trazem o método da estruvita como uma prática potencialmente circular no contexto das águas residuais.

Na etapa 1.3 – Fontes Primárias: De acordo com Conforto, Amaral e Silva (2011), as fontes primárias são um conjunto de artigos, periódicos ou bases de dados que serão relevantes para a definição das palavras-chave da RBS. No caso deste

estudo, as bases de dados deram respaldo para a definição das fontes primárias utilizadas, sendo estas bases: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*.

As *strings* de busca, etapa 1.4, são compostas por palavras-chave ou termos que estejam alinhadas à questão de pesquisa. A combinação destes termos compuseram, junto com a inclusão de operadores *booleanos* de pesquisa, a *string* de busca, a qual foi útil para abordar todas estas palavras-chaves escolhidas e eliminar ao máximo os resultados não pertinentes à pesquisa (MORAES; SOUZA, 2011). Para esta etapa, definiu-se como palavras-chave, em inglês, “*phosphorus*”, “*recovery*”, “*circular economy*” “*wastewater*” “*effluent*” “*struvite*” para a *string* permanente. Testou-se 8 combinações anteriores, antes de definir a *string* permanente, combinando “*phosphorus*”, “*recovery*”, “*circular economy*” “*wastewater*” “*effluent*” e “*struvite*”, porém, de modo a favorecer uma pesquisa mais direcionada aos resultados desejados, o termo “*struvite*” foi mantido apenas na *string* de busca da base de dados *Science Direct*, enquanto o termo foi excluído das *strings* das bases *Scopus* e *Web Of Science*. Os operadores *booleanos* utilizados para compor a *string* foram “*And*” e “*Or*”. O Quadro 3 apresenta a *string* de busca elaborada para o processamento da pesquisa em cada uma das três bases de dados selecionada.

Quadro 3: Strings de buscas elaboradas para processamento da RBS

<i>String</i> de busca	Base de Dados
phosphorus recovery “circular economy” wastewater OR phosphorus recovery “circular economy” effluent	Scopus
phosphorus recovery “circular economy” wastewater OR phosphorus recovery “circular economy” effluent	Web of Science
"phosphorus recovery" AND "circular economy" AND "wastewater "AND "struvite" OR "phosphorus recovery" AND "circular economy" AND "effluent" AND "struvite"	Science Direct

Fonte: Autoria Própria (2022)

Os Critérios de Inclusão e Qualificação, etapa 1.5, definidos para o estudo, tem finalidade de aproximar os resultados do objetivo da pesquisa. Os critérios de inclusão para este estudo é que o termo “*estruvita*” seja mencionado no estudo e que não seja mencionado pontualmente, mas sim inserido em algum contexto que possa

ser discutível posteriormente. Além disso, como critérios de qualificação, definiu-se que seriam selecionados apenas artigos de pesquisa ou de revisão, excluindo livros e capítulos de livros. Não definiu-se escopo temporal como critério de qualificação, uma vez que este não oferece interferência no retorno de resultados.

Finalizando a Fase 1, a etapa de Métodos e Ferramentas (1.6) tem como objetivo a definição do método de busca, de etapas de busca e de filtros de busca, método de busca nos periódicos e bases de dados, armazenamentos de resultados, entre outros (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011).

4.1.2 Fase 2: Processamento.

Na fase de Processamento, o procedimento inicia com a Condução das buscas (etapa 2.1), lançando mão das *strings* de buscas definidas para execução das pesquisas nas bases de dados, levando em conta os critérios de inclusão e qualificação estabelecidos.

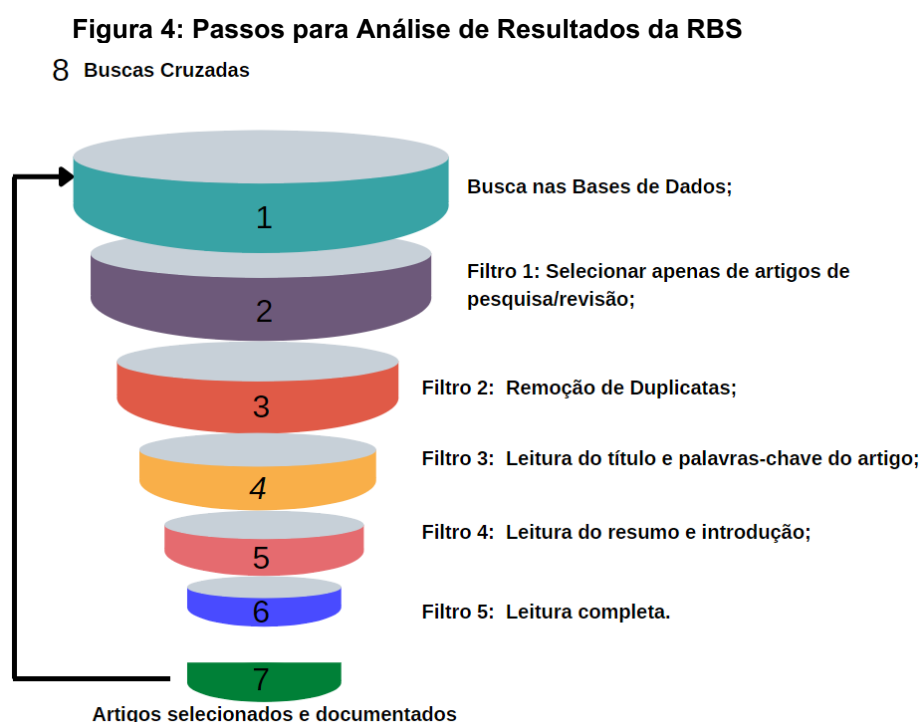
O caminho utilizado para iniciar a condução de busca foi acessando o portal de Periódicos Capes, acessando os conteúdos das bases de dados por meio do acesso federado. Ao selecionar a opção “Lista de Bases”, digita-se o nome da base de dados desejada e o respectivo site é direcionado. A condução das pesquisas para esta RBS iniciou primeiramente pela base Scopus, em seguida pela base *Web of Science* e finalizando com a busca na base *Science Direct*. No campo de pesquisa de cada base, inseriu-se as *strings* de busca e realizada a pesquisa e, assim que retornados os resultados primários, aplicaram-se os filtros relacionados aos critérios de qualificação definidos e registrou-se a quantidade de resultados obtidos. Ao passo em que os resultados secundários (após inserção dos filtros de qualificação) foram retornados, registrou-se a quantidade de resultados obtidos novamente e extraiu-se as referências de todos os estudos encontrados na respectiva base de dados. O mesmo procedimento foi realizado para as três bases de dados utilizadas.

Após realizar o procedimento para as três bases de dados, obteve-se a quantidade de resultados brutos retornados (sem aplicação de filtros de qualificação na própria base de dados) e resultados filtrados (FILTO1) (após inclusão dos critérios de qualificação), bem como as referências extraídas dos estudos retornados dos

resultados filtrados. As referências foram armazenadas em pasta de trabalho do Excel 2016, localizadas em planilhas específicas de cada base de dados.

Na sequência, realizou-se a etapa de Análise de Resultados, na qual fez-se um tratamento dos dados extraído das bases de dados, removendo duplicatas (FILT02), e aplicando filtros de leitura definidos para a seleção dos estudos pertinentes ao objetivo da RBS (FILT03, FILT04 e FILT05).

A Figura 4 representa o método utilizado na etapa de Análise de Resultados (2.2).



Fonte: Autoria própria, adaptado de Conforto, Amaral e Silva (2011)

Após o processo ilustrado pela Figura 4, os artigos que atenderam aos filtros FILT01, FILT02, FILT03, FILT4 e FILT05 foram armazenados e documentados.

4.1.3 Fase 3: Saída.

A fase de Saída consistiu de apenas uma etapa, a etapa de Síntese dos Resultados. Nesta etapa, após o arquivamento dos artigos que fazem parte do portfólio dos estudos selecionados, foi feita a síntese do conteúdo dos mesmos.

No caso deste estudo, esta síntese é composta por um quadro contendo um fichamento sintetizado de cada estudo, semelhante ao elaborado por Nascimento (2014), contendo seus respectivos autores, objetivos propostos, resultados e conclusões e definições de como a economia circular está associada à recuperação de fósforo na forma de estruvita e também de uma seção de revisão de literatura, para desenvolvimento de uma posterior discussão.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados Da Fase De Processamento – RBS

A partir das buscas realizadas nas bases de dados *Scopus*, *Web Of Science* e *Science Direct*, utilizando as *strings* apresentadas anteriormente, aplicando os critérios de inclusão e qualificação definidos e aplicando os filtros de seleção FILT01, FILT02, FILT03, FILT04 E FILT05, os resultados retornados estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Resultado da fase de Processamento - RBS

Trabalhos selecionados Fase Processamento RBS	Base de Dados Scopus	Base de Dados Web Of Science	Base de Dados Science Direct	Quantidade total de artigos encontrados
Resultados Brutos (sem critério de qualificação)	123	133	135	391
Resultados Filtrados (apenas artigos de pesquisa/revisão) – FILT01	80	131	111	322
Tratando dados e removendo duplicatas – FILT02	42	102	20	164
Após leitura de título e palavras-chave – FILT03	10	30	21	61
Após leitura de resumo e introdução – FILT04	3	15	8	26
Após leitura completa – FILT05	3	12	5	20

Fonte: Autoria Própria (2022)

De acordo com os dados da Tabela 1, é possível notar que a base de dados que forneceu a maior quantidade de resultados brutos foi a Science Direct. Na segunda etapa de busca, quando selecionou-se o filtro de apenas artigos de pesquisa e de revisão, cerca de 70 trabalhos saíram do escopo da busca.

A partir do momento em que se extraiu as referências dos arquivos retornados após o FILT01 (aplicação de critérios de qualificação) e tratou-se os dados para

eliminação de duplicatas, o número de artigos eliminados foi de 158, isto é, quase metade dos resultados filtrados saíram do escopo da RBS.

Ao iniciar a Análise dos Resultados e utilizar o critério definido pelo FILT03 (leitura do título e palavras-chave), ocorre a primeira classificação de trabalhos associada à qualidade e à afinidade com a pergunta de pesquisa e os objetivos definidos. Nesta seleção, apenas 61 artigos de 164 trabalhos selecionados pelo filtro anterior se encaixaram nos critérios do FILT03, o que corresponde a um percentual de 37,19% de aproveitamento em relação ao filtro anterior e a 18,94% de aproveitamento em relação ao total que atendeu aos critérios de qualificação do FILT01.

No FILT04, que consistiu na seleção a partir da leitura dos resumos e das introduções dos 61 artigos selecionados pelo filtro anterior, apenas 26 estudos apresentaram afinidade com a pergunta de pesquisa e com os objetivos da RBS e, por consequência, atenderam aos critérios do filtro e passaram para a leitura completa. Estes 26 artigos representam 42,62% de aproveitamento dos trabalhos selecionados pelo FILT03 e 8,07% em relação ao total selecionado pelo FILT01. Além disso, para selecionar quais trabalhos eram pertinentes aos objetivos da pesquisa, aplicou-se neste momento o critério de inclusão mencionado na etapa de Critérios de Inclusão e Qualificação da fase de Entrada da RBS. Portanto, procurou-se o termo “estruvita” pelo corpo dos trabalhos analisados e verificou-se em quais deles o termo aparecia dentro de uma discussão, e não apenas pontualmente. Assim, os trabalhos em que a estruvita estava inserida em alguma discussão associada à recuperação de fósforo e sendo vinculada à economia circular foram qualificados para ser submetidos ao próximo filtro.

Finalmente, dos 25 estudos classificados para a leitura completa, 5 estudos foram excluídos do escopo da pesquisa, logo, 20 estudos se alinharam com os critérios estabelecidos pelo FILT05 e comporão o catálogo de estudos selecionados pela metodologia executada da RBS. Dos artigos selecionados, a fonte que mais forneceu trabalhos selecionados para síntese de resultados foi a *Web of Science*, dos quais 12 dos 20 artigos selecionados foram extraídos de lá, seguido da base de dados *Science Direct* com 5 artigos selecionados, colocando assim a base de dados Scopus como a menos representativa entre os trabalhos que passaram por todos os filtros, com apenas 3 artigos.

Em termos de aproveitamento dos estudos ao longo da aplicação dos filtros de seleção, a Tabela 2 apresenta os percentuais de aproveitamento tanto em relação ao total selecionado após o FILT01 (aplicação de critério de qualificação) como em relação ao filtro imediatamente anterior ao filtro em questão.

Tabela 2: Aproveitamento de trabalhos ao longo da filtragem de artigos

Percentual de Aproveitamento dos Artigos (%)	Scopus	Web Of Science	Science Direct	Percentual de aproveitamento total (%)
Resultados Brutos (sem critério de qualificação)	-	-	-	-
Resultados Filtrados (apenas artigos de pesquisa/revisão) – FILT01	65,04	98,49	82,22	82,35
Tratando dados e removendo duplicatas – FILT02	52,50	77,86	18,02	50,93
Após leitura de título e palavras-chave – FILT03	23,81	29,41	38,09	37,20
Após leitura de resumo e introdução – FILT04	30,00	50,00	30,09	42,62
Após leitura completa – FILT05	100,00	80,00	75,00	76,92

Fonte: Autoria Própria (2022)

O percentual pode ser obtido pela razão entre a quantidade de trabalhos selecionados por um determinado filtro (por exemplo, FILT03) e a quantidade de trabalhos selecionados pelo filtro anterior (no caso, o filtro anterior ao FILT03 é o FILT02). O aproveitamento foi calculado em relação a cada uma das bases em cada filtro e em relação ao total selecionado para cada filtro.

A partir dos dados da Tabela 2, é possível notar que o filtro que mais eliminou estudos não relevantes à pesquisa foi o FILT02 (eliminação de duplicatas), ao 30% de trabalhos redundantes entre a classificação ocorrida nos FILT01 e FILT02.

É possível fazer a mesma análise para o geral classificado por cada filtro, sem fazer distinção da base de dados na qual os artigos foram extraídos, comparando fixamente com o total de trabalhos selecionados pelo FILT01 – Isto é, 322 artigos. A Tabela 3 apresenta os percentuais de aproveitamento em comparação com o total de trabalhos extraídos após o FILT01 ao longo do processo de filtragem de artigos.

Tabela 3: Percentual de aproveitamento ao longo de processo de filtragem geral

	Quantidade de trabalhos classificados	Percentual de aproveitamento total em relação ao FILT01 (%)
Resultados Filtrados (apenas artigos de pesquisa/revisão) – FILT01	322	-
Tratando dados e removendo duplicatas – FILT02	164	50,93
Após leitura de título e palavras-chave – FILT03	61	18,94
Após leitura de resumo e introdução – FILT04	26	8,07
Após leitura completa – FILT05	20	6,21

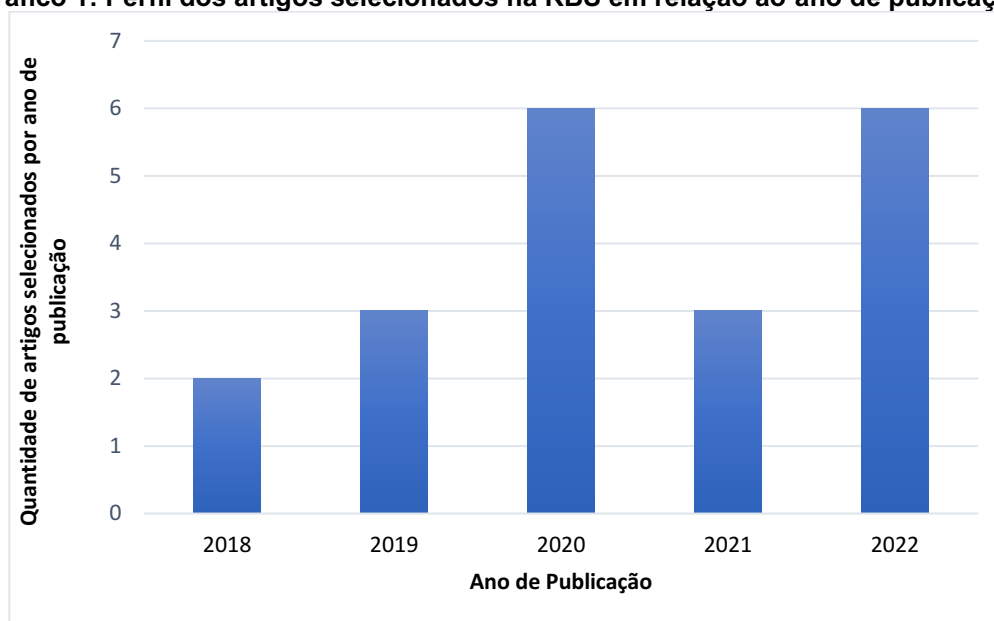
Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir da interpretação dos percentuais apresentados na Tabela 3, é possível verificar que, ao comparar a quantidade de trabalhos classificados para composição do portfólio de resultados para a RBS (após FILT05) com a quantidade de trabalhos selecionados pelo FILT01, apenas 6,21% dos artigos selecionados no primeiro filtro passaram por todos os filtros e serão submetidos à etapa de Síntese.

Este número aponta para um fato provável: que a pergunta de pesquisa formulada para orientar a RBS é específica a ponto de apenas 6,21% dos artigos selecionados a partir das *strings* escolhidas obterem informações pertinentes à discussão acerca da recuperação de fósforo na forma de estruvita no âmbito da economia circular. A análise de aproveitamento de artigos do FILT02 para o FILT03, observado nas Tabelas 3 e 4, aponta para uma queda brusca de trabalhos alinhados com o interesse da RBS logo no momento da leitura do título e das palavras-chave.

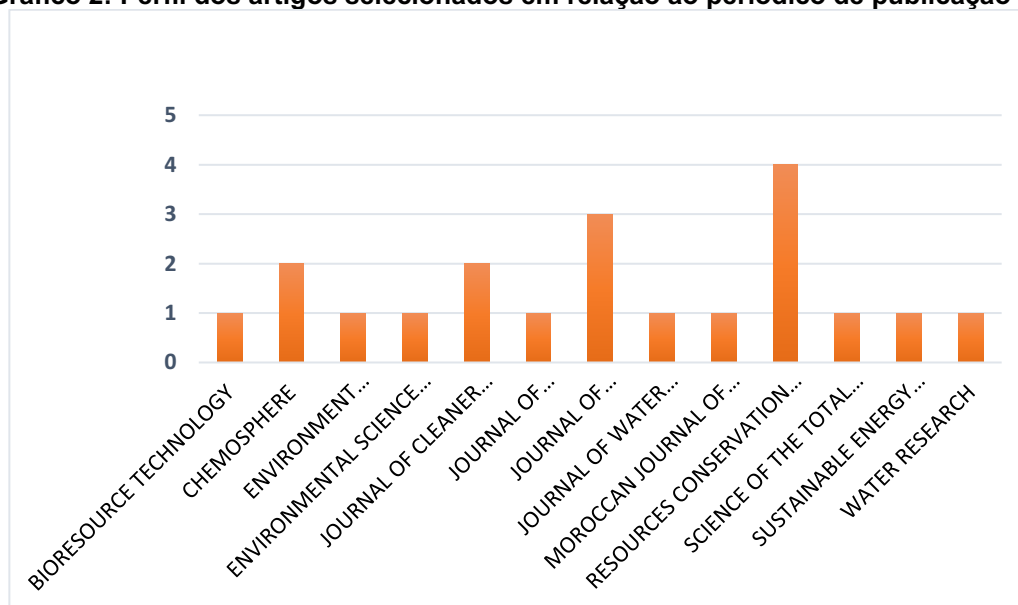
Os 20 artigos classificados a partir de leitura completa e que apresentaram potenciais conteúdos para discussão da economia circular associada à recuperação de estruvita de águas residuais FILT05 foram documentados e a relação com tais trabalhos, bem como seus respectivos títulos, autores, periódicos e anos de publicação constam no Apêndice A. O Gráfico 1 e 2 apresentam o perfil dos artigos escolhidos em relação aos seus anos e periódicos de publicação, respectivamente.

Gráfico 1: Perfil dos artigos selecionados na RBS em relação ao ano de publicação



Fonte: Autoria Própria (2022)

Gráfico 2: Perfil dos artigos selecionados em relação ao periódico de publicação



Fonte: Autoria Própria (2022)

É possível notar, ao analisar os gráficos, que os artigos selecionados para composição do catálogo da RBS são artigos publicados nos últimos 6 anos, indicando que o assunto é recente e sua discussão está em desenvolvimento na literatura. Em relação aos periódicos de publicação, os dois periódicos que mais foram representados, no rol dos artigos selecionados, foram *Resources, Conservation and Recycling* e *Journal of Environmental Management*

5.2 Resultados Da Síntese Dos Artigos Seleccionados

O conteúdo da Síntese dos Resultados dos 20 artigos seleccionados, etapa constituinte da fase de Saída da RBS, será apresentado na sequência na forma de revisão de literatura.

Gherghel, Teodosiu e De Gisi (2019) objetivou uma “avaliação abrangente da literatura sobre os processos de tratamento e gestão das lamas de águas residuais utilizados para os seus recursos e valorização energética, tendo em conta o conceito de economia circular” e um dos pontos de investigação foi a de recursos de lodo de águas residuais, no qual a recuperação de fósforo na forma de estruvita foi mencionada. Além do mais, os autores elaboraram uma tabela constando tecnologias de recuperação de estruvita em escala comercial como a AirPrex®, PHOSPAQ® e a Seaborne®, as quais oferecem uma recuperação de fósforo a taxas superiores a 70%, proporcionando ainda boa desaguabilidade dos lodos com baixos custos de investimentos. Além disso, de acordo com os autores, as tecnologias mencionadas apresentaram atratividade de tecnologia para a indústria, fato que colocou a tecnologia da recuperação da estruvita, em sua conclusão, como a técnica de recuperação de fósforo como uma das mais promissoras no contexto da economia circular.

Preisner *et al* (2022) revisaram indicadores sobre recuperação de recursos que pudessem permitir o monitoramento eficiente das soluções sustentáveis e circulares implementadas no setor de águas residuais. Como resultado de sua revisão, os autores levantaram um conjunto de indicadores para medir a transição do setor de águas residuais para a economia circular e o indicador de recuperação de nutrientes, ao qual a estruvita é apresentada como uma das soluções de recuperação de fósforo mais aplicadas, foi um dos indicadores elencados como um mecanismo de recuperação de nitrogênio e fósforo de lodos de esgoto ou de licores de desidratação. Após a análise dos indicadores, os autores chegaram à conclusão que, para o indicador de circularidade projetado, a recuperação de nutrientes, ao qual o método da estruvita foi mencionado, se apresenta como um dos indicadores de maior potencial de monitoramento e previsão de receitas.

Robles *et al* (2020) tiveram como objetivo descrever as tecnologias atuais dedicadas à recuperação de nutrientes como nitrogênio e fósforo de águas residuais e promoveu a discussão da contribuição de cada tecnologia para a transição para um

modelo de desenvolvimento baseado na economia circular. Os autores afirmam que a precipitação de sal de fosfatos é apropriada para reciclar nutrientes e que estes sais tem potencial de mitigar uma futura escassez de matérias-primas ao serem utilizados como fertilizantes. Além do mais, no que se refere à recuperação do nutriente fósforo na forma de estruvita, a recuperação do mineral de efluentes secundários é capaz de fornecer materiais fertilizantes de qualidade superior do que o recuperado em de outras fases sólidas das águas residuais. Apesar dos elevados custos químicos e de processo associados ao processo de cristalização da estruvita, os autores pontuam que a introdução da legislação obrigatória para a recuperação de fósforo de águas residuais em alguns países configura uma oportunidade para a utilização legal de fertilizantes seguros e obtidos a partir de matérias-primas secundárias, como é o caso da estruvita.

Van der Kooij *et al* (2020), visaram delinear a abordagem "sócio-ecológica-técnica", descrever perdas do mineral fósforo através do sistema agroalimentar e realizar uma revisão de literatura focando em três rotas de recuperação de fósforo, sendo uma delas a recuperação na forma de estruvita. Os autores destacam que a rota de recuperação da estruvita é vista como a rota mais promissora, uma vez que o fósforo é recuperado nas ETARs em forma de grânulos, que formarão um fertilizante de liberação lenta. Os autores discutiram alguns desafios sociais, ecológico e técnicos atribuídos à rota da estruvita, tais como: escassez de relatos acadêmicos comprovando o uso real agrícola da estruvita proveniente de águas residuais, o conflito da definição da estruvita como resíduo ou fertilizante pela legislação da União Europeia e seus estados membros, custos altos da estruvita em relação ao mineral fósforo (podendo ser considerada economicamente inviável), entre outros. Entre resultados da revisão de literatura dos autores, tem-se o conflito acerca da forma com a qual o fósforo é tratado no contexto das águas residuais – primeiramente como resíduo, posteriormente na agricultura um produto de valor. Além do mais, os autores pontuam que o uso de magnésio no tratamento das águas residuais pode dificultar na reciclagem do nutriente, oferecendo, desta forma, mais um obstáculo para a rota da estruvita que requer a adição de uma fonte de magnésio para a precipitação do mineral.

Sfez *et al* (2019) propuseram abordagens para avaliação da sustentabilidade ambiental de produtos associados a águas residuais, de modo a avaliar “a quantidade acumulada de recursos naturais consumidos”, ou seja, a pegada de recursos. A

metodologia foi, portanto, aplicada em estudo de caso em uma ETAR da cidade de Eindhoven, na Holanda. Para isso, repensou-se acerca das cadeias de valor envolvidas no escopo das águas residuais e, ao particionar esta cadeia, os autores inserem a recuperação na forma de estruvita relacionada à cadeia do processamento de lodo. Na perspectiva dos autores, considerando o conceito de “resíduo-como-recurso”, a estruvita integra a cadeia de valor das águas residuais, uma vez que é um produto de valor agregado extraído a partir do processamento do lodo de águas residuais. Como parte dos resultados, os autores mencionaram que, no que se refere à pegada de recursos de uma das abordagens propostas – Abordagem 0:100 – a pegada de recursos de um produto de referência, ou seja, com produtos equivalentes (fertilizante de fósforo), é maior do que a dos produtos recuperados. Além disto, para o caso em questão, os autores afirmam que a substituição de fertilizantes sintéticos pela estruvita evitou cerca de 12% de pegada de recursos. Por fim, os autores pontuam, a respeito da estruvita, que a avaliação do ciclo de vida (ACV) pode ser uma ferramenta melhor explorada a fim de estimular as etapas de recuperação de nutrientes de águas residuais.

Peterson *et al* (2022) exploraram em seu estudo uma estrutura conceitual de gerenciamento de transição, visando “demonstrar como a trajetória do atual sistema linear do uso do fósforo pode ser estrategicamente deslocada para um sistema de fósforo mais circular”, baseando todo seu trabalho em um estudo de caso em sistemas agrícolas e de águas residuais americanos. De acordo com os autores, os maiores fluxos de fósforos que se movimentam no meio urbano estão concentrados nos alimentos e nas excretas humanas, de modo que os últimos são direcionados a sistemas centralizados de tratamento de águas residuais. Uma das transições urbanas de fósforo americana citada pelo autor abriu caminhos à tecnologias de remoção biológica aprimorada de fósforo (EBPR) na década de 1990, de modo a promover reduções de cargas de fósforo de cerca de 75% de ETEs americanas. Da perspectiva conceitual apresentada pelos autores, a transição urbana que propiciou tecnologias como o EBPR, alinhado a interesses com conformidades de legislação, permitiu que tecnologias de recuperação de fósforo como a estruvita pudessem emergir como uma das atividades facilitadoras para uma seguinte transição urbana de fósforo, dentro do contexto das águas residuais.

Li *et al* (2022), em seu estudo, buscaram desenvolver um procedimento para obter soluções enriquecidas em magnésio a partir de cascalhos de tijolo refratário

gasto, resíduo gerado nas indústrias siderúrgicas, determinar as condições ideais para precipitação de estruvita e garantir que o efluente tratado possa atender aos padrões de descarga de fosfato e amônia. Os autores então conduziram experimentos utilizando água residual sintética, solução de lixiviação do cascalho de tijolo refratário gasto em béquer de 1L. Além de determinar as condições ótimas para atingir a recuperação da estruvita, os autores chegaram a uma estimativa de preço para o tratamento de 1m³ de águas residuais: o custo seria de cerca de 159 Dólares Americanos (USD) para tratar águas residuais de concentração aproximada de 20 mMolar e promover uma recuperação de 0,62 kg de fosfato. Além da formação da estruvita para posterior aplicação agrícola, o fosfato de cálcio obtido no processo poderia também ser incorporado por indústrias agrícolas e cimenteiras.

Rodrigues *et al* (2022), por sua vez, direcionam seu estudo para o teste de fontes alternativas de magnésio para permitir a precipitação de estruvita para a posterior aplicação como fertilizante agrícola. Em seus experimentos, os autores usaram como fontes de magnésio o sal marinho e a água do mar amarga (*bittern*) para precipitação de estruvita em urinas separadas por fonte e se propuseram a avaliar quais eram viáveis para a precipitação do mineral. Ao final de seus experimentos, os autores chegaram à conclusão de que o *bittern* se mostrou uma fonte alternativa às fontes comerciais de magnésio, pois combina o baixo custo e a alta eficiência de recuperação de fósforo, além de gerar cristais de estruvita de maior granulometria em comparação com os cristais obtidos a partir de fontes convencionais de magnésio, se mostrando até mais vantajoso do que os cristais obtidos a partir do uso do sal marinho. Os autores concluem, portanto, que a *bittern* se apresentou uma opção interessante de fonte de magnésio para precipitação de estruvita, uma vez que “aumenta a transferibilidade do processo enquanto gera cristais de estruvita com aplicabilidade de fertilizante”.

Os estudos de Simoes *et al* (2020) e Wilfert *et al* (2018) trazem, respectivamente, uma nova rota de obtenção de estruvita (via biológica) e uma discussão na qual um outro mineral emerge como um produto de recuperação mais vantajoso do que a estruvita.

Em oposição à necessidade de uma fonte de magnésio para a precipitação de estruvita, Simoes *et al* (2020) propuseram um estudo com objetivo de investigar as frações de fósforo utilizadas pela bactéria *Brevibacterium antiquum* para formar biominais de estruvita (bio-estruvita) em licores de desidratação de lodo de águas

residuais. Os autores trazem referências que afirmam que a bactéria *Brevibacterium antiquum* tem capacidade interna de suportar supersaturações magnésio, amônia e fósforo, e assim, precipita bio-estruvita e que este mecanismo biológico de precipitação apresenta uma vantagem em relação à precipitação química: é possível que possa se recuperar nutrientes de correntes menos concentradas em fosfato dispensando a necessidade de produtos químicos, como os sais de magnésio. Os autores conduziram seus experimentos utilizando diferentes tipos de lodos (primários, secundários e digeridos) de três ETEs de escala real. Os resultados e conclusões apontaram para um maior potencial de recuperação de bio-estruvita em todos os tipos de licores em relação à estruvita convencional. Além do mais, o fato da bactéria *Brevibacterium antiquum* alcançar mais de 50% de utilização de fração de fósforo orgânicos e condensados permite que esta rota de estruvita tenha uma capacidade de recuperação ainda maior, o que torna a recuperação do nutriente em águas residuais mais atrativa, uma vez que maior carga de fósforo seria retida dentro do ciclo do fósforo e menos carga do nutriente seria levado à jusante para corpos receptores.

Wilfert *et al* (2018) argumentam em defesa do fosfato vivianita ($\text{Fe}_2 (\text{PO}_4)_3 \times 8\text{H}_2\text{O}$) como sendo a principal forma de fosfato no lodo digerido, alegando desvantagens em rotas de tratamento de águas residuais como a da estruvita. Os autores conduziram experimentos com lodo de esgoto digerido para recuperação de vivianita, objetivando avaliar a quantidade máxima de fosfato assimilada pela vivianita e se o mineral está presente em lodos de modo que possa oferecer recuperação de fosfato eficiente. Em seus resultados, os autores sugerem que quantidades expressivas de fosfato se associam à vivianita, de modo que a eficiência de recuperação de fosfatos dos lodos se apresenta muito superior às alcançadas pela rota da estruvita convencional, pois parte dos fosfatos se associaria a frações mais insolúveis do que a estruvita (como a vivianita, por exemplo). As conclusões dos autores colocam a vivianita como a fase de ferro e fosfato mais importante do lodo digerido, podendo agregar de 70% a 90% dos fosfatos presentes no lodo, porém, reconhecem que a vivianita será impura e que é necessário mais conhecimento a respeito da formação da mesma.

Santos *et al* (2021) afirmam a importância da estruvita como produto de recuperação de fósforo, sendo considerado o produto mais recuperado e destacam o potencial da estruvita para competir com fertilizantes de superfosfato triplo sem perder em desempenho. O estudo traz algumas tecnologias operantes em escala piloto ou

real, que produzem estruvita a partir de lodo de esgoto ou de águas residuais municipais, como por exemplo as tecnologias AirPrex®, Struvia™, Pearl®, Crystalactor®, todavia os três primeiros apresentam taxas de recuperação relativamente baixas, cerca de 7% a 12%. Apesar da taxa baixa de recuperação, os dados reunidos pelos autores indicam que a estruvita formada por estas três tecnologias tem percentual de pentóxido de fósforo (P_2O_5) equivalentes a um minério de grau médio, mas destacam a necessidade de maiores estudos de seu desempenho agrônômico a longo prazo.

O estudo de Rufí-Sali *et al* (2020) se propuseram “avaliar a viabilidade técnica e ambiental de recuperação de aproveitamento de estruvita para atender aos requisitos de fósforo para fertilizar campos agrícolas de uma região urbana”. Analisou-se o potencial de recuperação de três tecnologias - REM-NUT®, Ostara® e AirPrex® - em duas ETARs de Barcelona, avaliando juntamente os impactos ambientais associados. Em seus resultados, os autores indicam que a recuperação de estruvita impactaram em um menor potencial de eutrofização ao absorver grande parte da carga de fósforo do efluente. A tecnologia da Ostara® apresentou menores impactos para as categorias de impacto, tais como ecotoxicidade, demanda energética acumulada, aquecimento global, entre outros.

Ravi *et al* (2022), em seu estudo, realizaram a comparação dos impactos ambientais de uma ETAR antes e após a recuperação de estruvita, de acordo com as circunstâncias ambientais e legislativas da região de Flandres. Definindo dois cenários de comparação, antes e após a implementação da recuperação da estruvita na ETAR, os resultados das análises indicam que o cenário após a recuperação da estruvita, a partir do uso da tecnologia NuReSys®, contribuiu da seguinte maneira:

- Potencial de mudança climática (avaliado em kg de CO_2 equivalente): 455 kg de CO_2 equivalente, impacto inferior ao apresentado pelo cenário antes da recuperação de estruvita.
- Potencial de ecotoxicidade de água doce: menor impacto do que o encontrado para o cenário antes da recuperação da estruvita. Isto infere que a recuperação de fósforo em ETEs pode reduzir o efeito de ecotoxicidade em águas doces;
- Potencial de eutrofização de água doce (mensurados em kg de fósforo equivalente): não apresentou diferença significativa com relação ao

cenário antes da recuperação da estruvita, portanto, não representa um grande impacto em termos de eutrofização de águas doces.

Em suma, o cenário no qual a recuperação de estruvita está inserida representa um ligeiro alívio de encargos ambientais em virtude da redução de uso de polímeros, além de melhorar a desaguabilidade e redução de importações de fertilizante sintético, melhorando o desempenho da ETE analisada.

Jedelhauser e Binder (2018), em seu estudo, se propuseram a analisar as interações entre as inovações sociotécnicas criadas pela economia circular e o papel de “atores, instituições, infraestruturas e fluxos” e avaliar a forma com a qual as configurações espaciais criadas influenciam em mudanças dos sistemas sócio-técnicos no contexto da Alemanha. Os autores aplicaram a análise para rotas tecnológicas do ácido fosfórico e da estruvita, porém, apenas os resultados obtidos a partir da análise da rota da estruvita são pertinentes a este estudo. A análise espacial conduzida pelos autores apontaram para os seguintes resultados em relação à tecnologia da estruvita, dos quais os mais relevantes ao estudo atual foram selecionados, conforme apresenta o Quadro 5:

Quadro 4: Conclusões relevantes à análise espacial da tecnologia das estruvita

Dimensão Geográfica	Impacto associado da estrutura da estruvita
Localização	A tecnologia da estruvita contribui para uma maior proximidade com os agricultores locais e regionais, uma vez que a estrutura da recuperação do fósforo ocorrem nas próprias ETEs e isto permitiria a distribuição dos fertilizantes, produzidos no sistema de cada ETEs, facilitada para agricultores de áreas próximas;
Territorialidade	A estrutura da recuperação da estruvita pode ser caracterizada como descentralizada, pois a recuperação do fósforo e a produção do fertilizante estruvita ocorrerá, de forma descentralizada, em cada ETE. Em relação à contiguidade, isto é, à condição de proximidade, a recuperação da estruvita configura uma estrutura com alta contiguidade, pois a distribuição do fertilizante e posterior reciclagem do nutriente ocorrerá a nível local/regional.

Escala	Cria ciclos de pequena escala, mas que estão envolvidos dentro de um sistema agroalimentar globalizado.
--------	---

Fonte: Autoria Própria, adaptado de Jedelhauser e Binder (2018)

Chrispim, Scholz e Nolasco (2019) visaram “oferecer orientações na seleção de opções de recuperação de fósforo no tratamento de águas residuais municipais”, de forma especial para o panorama de grandes cidades de países em desenvolvimento, a exemplo da Comunidade dos Estados da América Latina e do Caribe (CELAC). Os autores trazem exemplos de regiões como África Subsaariana, partes da Ásia e América Central como regiões desfalçadas de sistemas de tratamentos de águas residuais, bem como os casos do México e de países da América do Sul, dos quais o avanço no gerenciamento de águas residuais teve uma sua importância reconhecida recentemente. Apesar da falta de estrutura, tanto regulatória quanto de tratamento de águas residuais, os autores apontam maiores potenciais de implementação de estratégias de recuperação de nutrientes nos continentes africano e asiático, no contexto de análise de países em desenvolvimento. Chrispim, Scholz e Nolasco (2019) concluem seu estudo afirmando, a respeito da metodologia da recuperação de estruvita, que apesar de se apresentar como o produto mais comumente recuperado, um dos gargalos de sua viabilização comercial é seu custo de produção associado, superando os valores de fertilizantes convencionais de fósforo.

Vasa e Chacko (2021), se propuseram a apoiar a estruturação de políticas adequadas de recuperação de estruvita de córregos de águas residuais da Índia. A abordagem se voltou para a implementação de um sistema promovido em áreas rurais indianas, de modo que a estruvita recuperada seria fornecida a agricultores na forma de fertilizante e diminuiriam, então, suas dependências por fertilizantes minerais de fósforo. As análises e discussões apontaram para um potencial positivo da estruvita como tecnologia de recuperação de fósforo no contexto indiano, especialmente a partir de fontes de fósforo como urina humana e de gado (em virtudes das populações expressivas das duas espécies) e utilizando fontes de magnésio mais econômicas e de fácil acesso em terras indianas, como é o caso do *bittern*.

Goel, Kansal e Pfister (2021) compararam três opções de fornecimento de fósforo à agricultura e avaliaram seus efeitos benéficos ao meio ambiente, visando fornecer informações úteis para fomentar a economia circular à jusante a partir da

recuperação de fósforo. Duas das três opções, das quais fazem parte recuperação de fósforo de licor de fossa séptica e de ETE centralizadas, recuperam fósforo na forma de estruvita. Em seus resultados, os autores apontam que ambas as opções de recuperação de fósforo não induzem emissões diretas de material particulado, enquanto nas categorias de impacto no ecossistema, a opção de recuperação de estruvita em fossas sépticas travaram eutrofização em corpo d'água, apesar de contribuir negativamente para a acidificação terrestre em virtude do uso de produtos químicos no processo de obtenção da estruvita. A opção de recuperação em ETE impacta negativamente ao permitir vazamentos de fósforo em seu fluxo para o ecossistema, ao passo que sua interferência em termos de acidificação terrestre foi inferior à opção de fossa séptica. Concluiu-se neste estudo, de posse das informações pertinentes aos impactos destas duas opções de recuperação em relação a categorias de impacto, que o potencial de utilização destas duas opções se amplifica, especialmente, em regiões onde o lodo é disposto em aterros e onde indústrias de fosfogesso não estão presentes (GOEL; KANSAL; PFISTER, 2021).

Gowd, Ramakrishna e Rajendran (2022) direcionaram sua pesquisa para a estimar os recursos de recuperação de nutrientes de águas residuais indianas utilizando algumas tecnologias de recuperação, entre elas, a tecnologia da estruvita. As águas residuais indianas, de acordo com os dados fornecidos pelos autores, apresentam carga excessiva de nutrientes como fósforo e nitrogênio, oferecendo assim uma oportunidade de avaliar o desempenho da recuperação da estruvita neste sentido. Seus resultados apontaram para um potencial de produção de estruvita a partir de efluentes de 17,3 kg de estruvita por dia, correspondendo a um percentual de redução de importação de fertilizantes sintéticos em 4%. Além do mais, no que tange a impactos em categorias como pegada de carbono, a recuperação de estruvita apresentou uma pegada de carbono equivalente a 7,5 kg de CO₂ equivalente, número que representa uma redução na emissão de carbono em 53%.

Mavhungu *et al* (2020) conduziram um estudo tendo como referência um sistema piloto de tratamento de águas residuais em Pretória, na África do Sul. Seus objetivos eram baseados na avaliação do conceito da EC no tratamento de águas residuais através de um processo denominado “descarga líquida zero”, no qual se recupera fósforo na forma de estruvita e água potável. Seus resultados apontaram para uma viabilidade econômica no processo, visto que 52,5 kg de estruvita poderiam

ser recuperadas por batelada, o que poderia a corresponder a uma quantidade de 1.260 kg/dia.

6 DISCUSSÃO

6.1 Discussões A Partir Da Síntese Dos Resultados

6.1.1 Percepção dos Autores – Pergunta de Pesquisa

O Quadro 4 reúne a síntese dos 20 artigos selecionados para a discussão dos resultados a partir da RBS executada. Nele, apresentam-se os autores dos artigos selecionados e suas respectivas percepções a respeito de uma possível relação entre economia circular e recuperação de fósforo de águas residuais.

Quadro 5: Percepção dos autores com a relação economia circular vs recuperação de fósforo

Autor(es)	Relação entre economia circular e estruvita no contexto de águas residuais
Chrispim, Scholz e Nolasco (2019)	Se recuperados, os nutrientes das águas residuais podem retornar como compostos orgânicos e minerais valiosos para a agricultura e contribuir para o fechamento do ciclo.
Goel, Kansal e Pfister (2021)	A recuperação de fósforo de águas residuais está sendo cada vez mais promovida não apenas para perseguir os objetivos da economia circular, mas também para atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas 2, 3, 6, 11 e 12.
Gowd, Ramakrishna e Rajendran (2022)	O tratamento predominante de águas residuais procura manter os padrões de descarga enquanto a recuperação de nutrientes é uma opção avançada para um sistema autossuficiente e sustentável - economia circular.
Jedelhauser e Binder (2018)	A estruvita facilita a distribuição local de fertilizantes entre estações de tratamento de águas residuais e agricultores e apoia a reciclagem de fósforo em pequena escala, proporcionando oportunidades para uma reconfiguração estrutural do sistema agroalimentar.
Li <i>et al</i> (2022)	A utilização de material usado para tratamento de águas residuais, como meio de produzir produtos de valor agregado, é essencial para fechar o ciclo de resíduos e alcançar a economia circular.
Mavhungu <i>et al</i> (2020)	A introdução do conceito de economia circular no tratamento de águas residuais pode promover a gestão sustentável das quantidades cada vez maiores de águas residuais municipais.

Nenov <i>et al</i> (2020)	O conceito de "resíduo como um recurso", associado a desenvolvimento sustentável, coloca muitos produtos da cadeia de valor das águas residuais como um recurso vindo de uma fonte distinta.
Peterson <i>et al</i> (2022)	A recuperação de estruvita de águas residuais está inserida em uma das áreas de nicho que facilitam a transição dos Estados Unidos para uma economia mais circular.
Preisner <i>et al</i> (2022)	As metas da estrutura política da economia circular, como a recuperação de recursos, estão intimamente ligadas aos processos de tratamento de águas residuais e ao gerenciamento de lodo de esgoto.
Ravi <i>et al</i> (2022)	A inclusão do fósforo como uma matéria-prima crítica na Europa impulsiona ações voltadas à economia circular e motiva a implementação de técnicas alternativas de recuperação de fósforo de lodo de águas residuais.
Robles <i>et al</i> (2020)	Visando avançar rumo a uma sociedade sustentável pautada nos preceitos da Economia Circular, a necessidade de reciclar recursos chave são motivação para a expansão de tecnologias de recuperação de nutrientes.
Rodrigues <i>et al</i> (2020)	A recuperação de fósforo (P) em processos descentralizados de tratamento de efluentes separados por fontes é uma estratégia ecoeficiente de acordo com uma perspectiva de economia circular.
Rufí-Sali <i>et al</i> (2020)	A recuperação de fósforo de efluentes promove uma abordagem mais circular.
Santos <i>et al</i> (2021)	As águas residuais são um fluxo altamente concentrado que pode ser uma fonte atraente para a recuperação e reciclagem de fósforo.
Sfez <i>et al</i> , (2019)	O setor de tratamento de efluentes está se posicionando cada vez mais como um ator fundamental na mudança para uma economia circular
Simoes <i>et al</i> (2020)	A recuperação de fósforo e nutrientes de águas residuais como sais minerais pode apoiar a reposição local de fertilizantes e reduzir a mineração, contribuindo para a economia circular.
van der Kooij <i>et al</i> , (2020)	A recuperação do fósforo dos excrementos humanos pode contribuir para um uso mais eficiente do fósforo para garantir sua disponibilidade para a produção de alimentos no futuro.
Vasa e Chacko (2021)	A estruvita recuperada pode ser fornecida aos agricultores para ser usada como fertilizante e, assim, reduzir a dependência de fertilizantes artificiais, contribuindo para a economia circular.
Wilfert <i>et al</i> (2018)	A recuperação de fosfato do lodo de esgoto é essencial em uma economia circular, porém, a rota de recuperação através da estruvita apresenta diversas desvantagens.
Muys <i>et al</i> (2021)	A introdução do conceito de economia circular no tratamento de águas residuais pode promover a gestão sustentável das quantidades cada vez maiores de águas residuais municipais.

Gherghel, Teodosiu e De Gisi (2019)	A utilização de lodo de águas residuais como fonte de energia e recuperação de recursos é uma boa alternativa para sua gestão considerando os requisitos da legislação e os princípios da economia circular.
-------------------------------------	--

Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando brevemente as informações apresentadas pelo Quadro 4, é possível notar que 19 dos 20 autores, em algum trecho de seus estudos, conseguiram vincular diretamente a gestão ou tratamento das águas residuais com a recuperação de nutrientes com a economia circular. Todavia, os termos “sustentável”, “fertilizante”, “produtos valiosos”, “uso eficiente” e “fechamento de ciclo” apareceram, nas definições de alguns autores, de modo a especificar mais suas percepções a respeito da temática.

As menções do termo “sustentável”, associados à relação recuperação de estruvita de águas residuais e economia circular, vieram acompanhados de termos como “gestão sustentável” (MAVHUNGU et al, 2020; MUYS et al, 2021), enquanto Gowd, Ramakrishna e Rajendran (2022) abordaram a expressão “sistema sustentável”. Robles *et al* (2020) traz a ideia de “sociedade sustentável”, ao descrever uma sociedade pautada nos preceitos da EC, enquanto Goel, Kansal e Pfister (2021) e Nenov *et al* (2020) mencionam o termo “desenvolvimento sustentável” relacionados à recuperação de fósforo de águas residuais no contexto da EC.

Jedelhauser e Binder (2018) e Vasa e Chacko (2021) por sua vez abordam, em suas breves definições, a estruvita como um fertilizante extraído de águas residuais, com potencial de utilização por agricultores, trazendo vantagens ao ecossistema de vão desde a reciclagem do nutriente fósforo, redução da dependência de fertilizantes sintéticos, até à reestruturação do sistema agroalimentar local. Simoes *et al* (2020), apesar de não mencionar especificamente o mineral estruvita, reforça em sua definição que a recuperação do fósforo de fluxos residuários contribui para a reposição local de fertilizantes e evita o processo da mineração do fósforo na fonte, colaborando para a prática da economia circular.

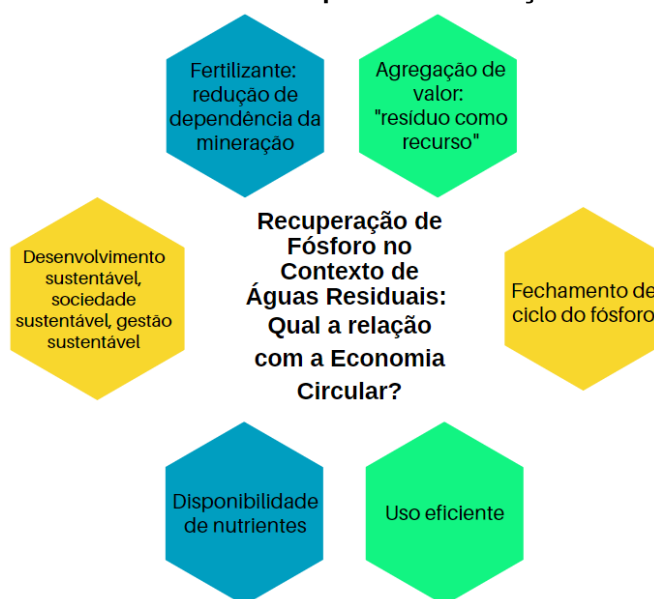
No que se refere à ideia da agregação de valor a partir de produtos obtidos da cadeia de valor das águas residuais, Chrispim, Scholz e Nolasco (2019) afirmam que se os nutrientes forem recuperados destes fluxos de águas, os mesmos podem retornar como minerais valiosos para a agricultura e contribuir com o fechamento do

ciclo, Li *et al* (2022) argumenta similarmente, afirmando que ao utilizar materiais já usados (ou resíduos) para o tratamento destas águas para gerar produtos de valor agregado, é essencial para fechar ciclos e contribuir para a EC. Nenov *et al* (2020) afirma que conceito de considerar um resíduo como recurso, coloca muitos produtos da cadeia de valor das águas residuais como um recurso vindo de uma fonte distinta.

Van der Kooij *et al* (2020) e Rodrigues *et al* (2020) trazem também o conceito de “uso eficiente” relacionados à recuperação de fósforo de águas residuais e à economia circular, uma vez que a otimização do uso deste nutriente garantiria sua maior disponibilidade e produção de alimentos no futuro.

Assim, conforme apresenta a Figura 5, a recuperação de estruvita, como um meio de recuperação de nutrientes, de fluxos de águas residuais, se associa à economia circular por meio de alguns termos em comuns presentes nas definições dos autores dos artigos selecionados.

Figura 5: Termos associados a partir das definições dos autores



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tendo percebido como a literatura selecionada se alinha com a pergunta de pesquisa proposta, a partir da primeira avaliação dos autores a respeito da relação entre a recuperação da estruvita das águas residuais e economia circular, nota-se que nem todas as definições trouxeram, especificamente, o termo “estruvita” em sua

associação com a economia circular. Portanto, para a próxima fase da discussão, aborda-se uma síntese das informações pertinentes à estruvita no contexto da economia circular das águas residuais com base nas literaturas selecionadas, visando identificar o real impacto desta tecnologia de recuperação em águas residuais no contexto dos casos relatados pelos autores em seus estudos.

6.1.2 Evidências da Contribuição da Recuperação da Estruvita No Contexto Circular das Águas Residuais.

As evidências do método de recuperação de fósforo na forma de estruvita de águas residuais, como uma contribuição à economia circular de modo geral, puderam ser levantadas a partir de estudos de revisão de literatura, de estudo da arte e revisões (de caráter mais teórico) e pesquisas que envolveram um estudo experimental.

Sem envolver um contexto específico ao qual a contribuição da estruvita pode ser discutida, os estudos desenvolvidos por Gherghel, Teodosiu e De Gisi (2019), Preisner *et al* (2022), Robles *et al* (2020) e Van der Kooij *et al* (2020), de modo genérico, evidenciam a recuperação de estruvita como uma tecnologia promissora de recuperação de fósforo por apresentar vantagens tais como: atratividade da indústria, potencial de monitoramento e previsão de receitas dentro de um indicador de circularidade, oportunidade de utilizar produtos produzidos a partir de matérias-primas secundárias de maneira legalizada, redução de carga de fósforo em efluentes, entre outros. Todavia, a contribuição de Sfez *et al* (2019), ao trazer dados de redução de pegada de recursos a partir da substituição de fertilizantes sintéticos por fertilizante de estruvita, agrega uma evidência mais concreta da tecnologia como uma prática alinhada ao princípio de regeneração e preservação de recursos da economia circular.

Os resultados trazidos por Li *et al* (2022), especialmente ao propor a utilização de cascalhos de tijolos refratários gastos, os quais a princípio se tornariam resíduos, e por Rodrigues *et al* (2022), ao trazer evidências de que a água do mar amarga tem potencial para permitir a precipitação da estruvita à jusante no papel de fonte alternativa de magnésio, poderiam atenuar custos químicos associados à produção da estruvita e, ao mesmo tempo, manter em uso um recurso, evitando a aplicação de uma fonte de magnésio virgem para a produção do mineral. A manutenção de recursos como o magnésio em uso, unido à proposta de utilização deste recurso para

a recuperação de fósforo de águas residuais, tem consonância com um dos três princípios da economia circular, que preconiza a circularidade de produtos no mais alto nível de utilização.

Para o panorama específico dos Estados Unidos, conforme estudado por Peterson *et al* (2022), a tecnologia de recuperação de estruvita representa uma via facilitadora de um processo de transição de uma economia linear para uma mais circular. Todavia, os autores reconhecem que a logística de entrega de produtos fabricados a partir de fósforo recuperado como um obstáculo para o avanço desta transição urbana de fósforo em questão. Tal resistência levantada pelos autores, unida às desvantagens associadas a demandas de produtos químicos, consumo de energia elétrica, custos de processo e desvantagem econômica da estruvita em relação a fertilizantes minerais, apontadas pelas discussões de Ruffi-Sali *et al* (2020), Robles *et al* (2020) e Van der Kooij *et al* (2020), representam um *trade-off* da tecnologia em relação à perspectiva circular, uma vez que estes fatores podem distanciar a recuperação da estruvita de princípios apoiados na preservação de recursos finitos, como recursos para geração de energia elétrica e de produtos químicos, e na mitigação de externalidades negativas no processo.

Em países da União Europeia como Reino Unido, Alemanha, Bélgica e Holanda, tecnologias de recuperação de estruvita em escala comercial são uma realidade. A preocupação da União Europeia pelo gerenciamento eficiente de resíduos e de otimização do uso da água, como no caso de recuperação de recursos de águas residuais, motivou a implementação de políticas de sustentabilidade e de usos de recursos pautadas em diretrizes vinculadas à economia circular (BARRAGÁN-OCAÑA; SILVA-BORJA; OLMOS-PEÑA, 2021).

No que se refere a abertura de oportunidades para tecnologias de recuperação de fósforo na UE, devido à reformulação do Regulamento de Fertilizantes, a estruvita ganhou mercado específico no escopo das tecnologias de recuperação e em outros países como Suíça, Áustria e Polônia estão em processo de elaboração de regulamentação de legislações de recuperação de fósforo (SANTOS *et al*, 2021).

Do ponto de vista da economia circular em um contexto europeu, o caráter regional da tecnologia da estruvita, conforme abordado por Jedelhauser e Binder (2018), colabora para a circularidade literal do nutriente, uma vez que seu uso como potencial fertilizante de liberação lenta é reconhecido e sua reciclagem do fósforo por

este meio colaboraria para a manutenção deste nutriente por mais tempo no ciclo das plantas, evitando que esta carga de fósforo lixiviasse pelo solo e se apresentasse, em corpos d'águas receptores, como um poluente após ser valorizado como um produto de valor agregado.

O estudo de Rufi-Sali *et al* (2020), executado em uma ETAR espanhola, evidenciou a tecnologia de recuperação de estruvita Ostara®, operante em escala real, como uma potencialviabilizadora de produção de fertilizantes de estruvita alinhada ao princípio de preservação e regeneração da natureza ao oferecer menores impactos associados a categorias como ecotoxicidade, demanda de energia (fator negativo anteriormente associado a tecnologia da estruvita) e aquecimento global. De maneira similar, o estudo de Ravi *et al* (2022) agrega à discussão de economia circular da estruvita em águas residuais europeias ao apresentar tecnologia da NuReSys® como uma via de recuperação de estruvita consonante com o princípio circular de regeneração da natureza, uma vez que seus impactos favorecem menores potenciais de mudança climática e de ecotoxicidade de água doce, além de se alinharem com ODS associadas a preservação de vida aquática.

Em uma análise voltada para o contexto alemão, Jedelhauser e Binder (2018) trazem contribuição para a discussão em um cenário circular de águas residuais ao apresentarem a recuperação da estruvita como um mecanismo de aproximação de agricultores locais e regionais, de produção de fertilizante de forma descentralizada e de criação de ciclos locais de reciclagem do fósforo como nutriente. Além de estar em concordância com o princípio da utilização de recursos no mais alto nível, a perspectiva visualizada pelos autores insere a recuperação da estruvita como uma via de alcance para a ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis. Visto que as Nações Unidas definiram como uma de suas metas “reduzir o impacto negativo *per capita* das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão dos resíduos municipais e outros” (IPEA) até o ano de 2030, a compreensão da recuperação da estruvita de acordo com o ponto de vista dos autores pode corroborar para o alcance desta meta a níveis regionais.

A operação em escala comercial de tecnologias de recuperação de estruvita são uma realidade para alguns países europeus, apesar de Santos *et al* (2021) argumentarem acerca do atraso da legislação adequada da União Europeia com relação a recuperação de fósforo em sistemas de águas residuais. A realidade dos países em desenvolvimento, por outro lado, encontra mais obstáculos no que se refere

a metodologias de recuperação de águas residuais, uma vez que a preocupação principal neste sentido está apoiada na ampliação da cobertura de saneamento básico (CHRISPIM; SCHOLZ E NOLASCO, 2019).

De Souza Meira, da Paz e Correia (2020) relatam em seu estudo que no Brasil aproximadamente 25 milhões de m³ de esgoto é produzido diariamente. Os autores afirmam que apenas 52% de domicílios são atendidos por rede coletora de esgoto e que, deste volume, cerca de 27% não é submetida a tratamento e tem seu descarte realizado em corpos d'água. Sanchez (2020) reforça o a condição desfavorável do Brasil com relação a recuperação de fósforo de águas residuais, alegando atraso de legislações brasileiras com relação a esta tendência, apesar da tentativa com aprovações de legislações de uso de lodo de ETEs, como a Resolução 375 do ano de 2006. Apesar dos desafios relatados pelos autores, Medeiros *et al* (2020) consideram a comercialização de fertilizantes extraídos de urina humana uma prática de potencial autossustentável, uma vez que um modelo de negócios estimou um *payback* de 7,8 anos para produção de estruvita a partir desta fonte de fósforo no Brasil.

Chrispim, Scholz e Nolasco (2019) trouxeram contribuição à discussão com seu estudo. A recuperação de fósforo na forma de estruvita, recuperada a partir de urina separada na fonte, foi investigada em um estudo de caso conduzido por Krähenbühl *et al* (2016), referência citada por Chrispim, Scholz e Nolasco (2019), e seus resultados apontaram para uma otimização no processo de cristalização do mineral: utilização de magnesita como fonte de magnésio mais barata para o processo de produção, melhorando assim a viabilidade econômica do processo e oferecendo uma possível oportunidade de recuperação de fósforo em regiões descentralizadas do Nepal. No contexto dos sistemas de águas residuais de países em desenvolvimento, o fator do custo elevado da produção da estruvita se amplifica a partir do momento em que os centros urbanos destes países acondicionam volumes expressivos de águas residuais. Portanto, as barreiras de custo, unidos a eventuais problemas estruturais, como uma defasagem no sistema de tratamento de águas residuais destas regiões, torna a recuperação deste mineral menos viável e menos vantajosa do que outras alternativas de recuperação, tais como as de reciclagem de lodo de esgoto. (CHRISPIM; SCHOLZ; NOLASCO, 2019).

No contexto de águas residuárias da Índia, tendo em vista os resultados de Vasa e Chacko (2021), a estruvita como fertilizante se apresenta como uma tecnologia muito promissora, considerando a população massiva da Índia e sua necessidade de

utilização e importação de fertilizantes, especialmente se os potenciais de otimização de produção de estruvita propiciados pelos recursos locais forem aproveitados. Apesar dos resultados positivos do ponto de vista ambiental, Gowd, Ramakrishna e Rajendran (2022) destacam que a recuperação de nutrientes na Índia esbarra em limitações como a não integralidade da coleta de águas residuais, uma vez que “muitas cidades e vilas tem defecação a céu aberto”. Tal limitação vem de encontro com o início da discussão da economia circular da estruvita em contexto de águas residuais de países em desenvolvimento, na qual coloca a defasagem de saneamento e de tratamento de águas residuais, comum a algumas realidades encontradas nestas regiões.

Do ponto de vista da sustentabilidade, os resultados acerca da quantidade de estruvita recuperada encontrados por Mavhungu *et al* (2020) em um estudo de caso africano, apontam um processo de natureza autossustentável, uma vez que a receita operacional seria convertida em favor das próprias comunidades locais. De maneira similar ao caso europeu desenvolvido por Jedelhauser e Binder (2018), a recuperação da estruvita se apresenta como uma oportunidade de sustentabilidade e resiliência dentro de uma comunidade. Em seu estudo, Santos (2019) afirma que em alguns contextos, como o da África, a abordagem do saneamento ecológico é aplicada em virtude de baixas coberturas de saneamento convencional e tem como objetivo fechar de ciclo de nutrientes e águas e no extinguir de lacunas entre saneamento e agricultura. Assim, levando em conta o conceito de saneamento ecológico apresentado por Santos (2019), a estruvita se destaca como uma oportunidade de configurar uma técnica de saneamento ecológico, uma vez que recuperar um nutriente como o fósforo de águas residuais para produção de fertilizante agrícola surge como uma solução para fechar as lacunas do saneamento e da agricultura e se respalda, em um contexto africano, a partir das considerações de Mavhungu *et al* (2020).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A recuperação de fósforo na forma de estruvita de fluxos residuais se mostra uma prática ambientalmente favorável de muitas óticas.

Da perspectiva da preservação de corpos d'água, alinhado à ODS 14 – Vida na Água, a recuperação do mineral dos fluxos de efluentes evita que uma carga excessiva de fósforo alcance corpos receptores e desencadeie um fenômeno de eutrofização do corpo hídrico. Do ponto de vista legal, o tratamento terciário de recuperação de fósforo contribui para o condicionamento de uma água residual de acordo com os padrões mínimos de disposição, sem afetar o equilíbrio do corpo hídrico receptor.

No âmbito da reciclagem e manutenção de recursos em uso – um dos princípios da Economia Circular -, a recuperação do fósforo na condição de um recurso finito e essencial à vida prolonga seu ciclo na natureza e garante sua disponibilidade, ao mesmo tempo que corrobora para a redução de dependência do recurso virgem. Do ponto de vista da sustentabilidade, a produção da estruvita na forma de fertilizante em sistemas de tratamentos de águas residuais locais pode agregar valor a um produto obtido a partir de resíduo e oferecer uma oportunidade de geração de receitas a uma comunidade contígua.

A revisão bibliográfica sistemática proposta para este estudo permitiu reunir literaturas que corroboraram para identificar de qual forma a recuperação da estruvita está associada à economia circular. Termos associados à sustentabilidade, uso na forma de fertilizante, uso eficiente, agregação de valor e fechamento de ciclo foram os mais vinculados ao conceito da recuperação de estruvita de águas residuais em um contexto circular.

Do ponto de vista técnico, a estruvita como fertilizante é realidade para alguns contextos como o europeu, mas ainda oferece limitações em realidades como os de países em desenvolvimento ou em regiões deficientes em sistemas de tratamento de efluentes. Em todo caso, estudos apontam que estruturas de regulamentação poderiam surgir como uma via de apoio para fomentar tecnologias de recuperação de águas residuais (CHRISPIM; SCHOLZ; NOLASCO, 2019).

O assunto abordado pelo estudo apresentou caráter notadamente específico, justificando o curto portfólio de estudos selecionados para leitura completa ao fim do protocolo da RBS e apresentou limitações como a falta de evidências a respeito da

aplicação da estruvita como fertilizante, dificultando avaliar seu desempenho como um produto recuperado de fósforo, além de se mostrar ser um assunto longe de realidades que ainda carecem de condições básicas de saneamento, como em regiões pobres. Como oportunidades futuras para corroborar com o estudo, sugere-se incluir a ferramenta de ACV como um dos focos de uma RBS complementar, visando avaliar eventuais impactos ambientais associados à produção da estruvita.

Apesar das limitações e das desvantagens técnicas, a discussão em torno das percepções do autores levantadas e as contribuições agregadas em cada estudo de caso selecionado inferem concordância com pelo menos dois dos três princípios da economia circular e, assim, respondem satisfatoriamente à pergunta de pesquisa proposta no estudo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9800**: Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro. 1987.

BAKARE, B. F.; SHABANGU, K.; CHETTY, M. Brewery wastewater treatment using laboratory scale aerobic sequencing batch reactor. **South african journal of chemical engineering**, v. 24, n. 1, p. 128-134, 2017.

BARRAGÁN-OCAÑA, A.; SILVA-BORJAS, P.; OLMOS-PEÑA, S. Scientific and technological trajectory in the recovery of value-added products from wastewater: A general approach. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, p. 101692, 2021.

BERTONCINI, E. I. Tratamento de efluentes e reuso da água no meio agrícola. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 1, p. 152-169, 2008.

BOTELHO, L. L. R.; DE ALMEIDA CUNHA, C. C.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e sociedade**, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.

BRANDÃO, V. D. S.; MATOS, A. T. D.; MARTINEZ, M. A.; FONTES, M. P. P. Tratamento de águas residuais da suinocultura utilizando-se filtros orgânicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 327-333, 2000.

BRIZOLA, J.; FANTIN, N. Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura. **Revista de Educação do Vale do Arinos-RELVA**, v. 3, n. 2, 2016.

CASTRO, S. R. **Precipitação de Estruvita: Recuperação de nitrogênio e fósforo utilizando fontes alternativas de reagentes**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte. 2014.

CHRISPIM, M. C.; SCHOLZ, M.; NOLASCO, M. A. Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. **Journal Of Environmental Management**, v. 248, p. 109268, 2019.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente. 2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, 13 de maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente. 2011.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. da. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto - CBGDP 2011, Porto Alegre, RS, Brasil. Instituto de Gestão de Desenvolvimento do Produto – IGDP. Anais... Porto Alegre: IGDP.

CORDELL, D.; DRANGERT, J-O; BRANCO, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, pág. 292-305, 2009.

CORNELLI, R.; et al. Métodos de tratamento de esgotos domésticos: Uma revisão sistemática. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 16, n. 2, p. 20-36, 2015.

COUTO, R. L. do. **Fontes e formas de aplicação de fósforo sobre suas frações no solo e produtividade da soja**. 2018. 64 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Instituto Federal Goiano. Rio Verde. 2018.

DE SOUZA MEIRA, R. C.; DA PAZ, S. P. A.; CORRÊA, J. A. M.. XRD-Rietveld analysis as a tool for monitoring struvite analog precipitation from wastewater: P, Mg, N and K recovery for fertilizer production. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 15202-15213, 2020.

DOYLE, J. D.; PARSONS, S. A. Struvite formation, control and recovery. **Water Research**, v. 36, n. 16, pág. 3925-3940, 2002.

DUTTA, D.; ARYA, S.; KUMAR, S. Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices. **Chemosphere**, v. 285, p. 131245, 2021.

EMF. What is the Circular Economy?. **Ellen MacArthur Foundation**, 2017a.

EZIQUEL, N. F. **Políticas Públicas Na Era Global: O Programa Estadual Município Verde Azul Em Questão**. 2016. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciências

Sociais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Letras, Araraquara, 2016.

FANGMEIER, M.; GENNARI, A.; REISDÖRFER, G. Tratamento de fósforo em efluente final com uso de filtro de carvão ativado, areia e brita. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 7, n. 4, 2015.

FILHO, N. B. B. **Estruvita: identificação de potenciais perigos e eventos perigosos no processo de produção, percepção e aceitabilidade de agricultores quanto ao seu uso agrícola**. 2019. 247 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória. 2019.

FRANCI, T. K. **Análise das condições de desenvolvimento do mercado de estruvita recuperada a partir de águas residuais no Brasil**. 2018. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2018.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da informação**, Rio de Janeiro (RJ), v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019.

GARSS, C. F. A. **Estudo de viabilidade econômica para atendimento do Parâmetro fósforo na Estação de Tratamento de Esgoto São João-Navegantes-DMAE**. 2019. 53 f. Monografia (Projeto Tecnológico) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2019.

GERENT, J. A relação homem-natureza e suas interfaces. **Cadernos de Direito**, Piracicaba, v. 11, jan.-jun. 2011.

GHERGHEL, A.; TEODOSIU, C.; DE GISI, S.. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. **Journal Of Cleaner Production**, v. 228, p. 244-263, 2019.

GIORDANO, Gandhi et al. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Revista ABES**, v. 4, n. 76, p. 1-84, 2004.

GOEL, S.; KANSAL, A.; PFISTER, S. Sourcing phosphorus for agriculture: Life cycle assessment of three options for India. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, p. 105750, 2021.

GOLROUDBARY, S.; EL WALI, M.; KRASLAWSKI, A. Rationality of using phosphorus primary and secondary sources in circular economy: Game-theory-based analysis. **Environmental Science & Policy**, v. 106, p. 166-176, 2020.

GOWD, S. C.; RAMAKRISHNA, S.; RAJENDRAN, K. Wastewater in India: An untapped and under-tapped resource for nutrient recovery towards attaining a sustainable circular economy. **Chemosphere**, v. 291, p. 132753, 2022.

HELIN, J.; WEIKARD, H-P. A model for estimating phosphorus requirements of world food production. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102666, 2019.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods11.html>. Acesso em: 30 mai. 2022.

JEDELHAUSER, M.; BINDER, C. R. The spatial impact of socio-technical transitions – The case of phosphorus recycling as a pilot of the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 856-869, 2018.

JORNAL DA USP. **Economia circular será nova área de pesquisa e ensino na USP**. Disponível em: <http://jornal.usp.br/universidade/economia-circular-sera-nova-area-de-pesquisa-e-ensino-na-usp/>. Acesso em: 29 mai 2022.

KAMALI, M.; et al. Sustainability considerations in membrane-based technologies for industrial effluents treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 368, p. 474-494, 2019.

KASPRZYK, M.; CZERWIONKA, K.; GAJEWSKA, M. Waste materials assessment for phosphorus adsorption toward sustainable application in circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, p. 105335, 2021.

KATAKI, S.; et al. Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 107, p. 142-156, 2016.

KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, p 1713 – 1721, SET-DEZ, 2012.

KORHONEN, J.; NUUR, C.; FELDMANN, A.; BIRKIE, S. E. Circular economy as an essentially contested concept. **Journal of cleaner production**, v. 175, p. 544-552, 2018.

KRÄHENBÜHL, M; ETTER, B.; UDERT, K. M. Pretreated magnesite as a source of low-cost magnesium for producing struvite from urine in Nepal. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1155-1161, 2016.

KRISHNAMOORTHY, N.; et al. Engineering principles and process designs for phosphorus recovery as struvite: A comprehensive review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, p. 105579, 2021.

LACY, P.; et al. Circular advantage: innovative business models and technologies to create value in a world without limits to growth. **Accenture: Chicago**, IL, USA, 2014.

LEITÃO, A.. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting**, v. 1, n. 2, p. 150-171, 2015.

LEVY, Y.; ELLIS, T.J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science Journal**, v.9, p.181-212, 2006.

LI, Bing et al. Phosphorus recovery through struvite crystallisation: Recent developments in the understanding of operational factors. **Journal of environmental management**, v. 248, p. 109254, 2019.

LI, D.-Y. et al. Recovery of phosphate and ammonia from wastewater via struvite precipitation using spent refractory brick gravel from steel industry. **Journal of Environmental Management**, v. 302, p. 114110, 2022.

LINDERHOLM, K.; TILLMAN, A-M.; MATTSSON, J. E. Life cycle assessment of phosphorus alternatives for Swedish agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 66, p. 27-39, 2012.

LIU, X.; WANG, J. Impact of calcium on struvite crystallization in the wastewater and its competition with magnesium. **Chemical Engineering Journal**, v. 378, p. 122121, 2019.

LOCKS, M. da C. **Eletrocoagulação-flotação aplicada ao tratamento de águas residuais da indústria de laticínios**. 2018. Relatório (Química Industrial) – Universidade de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

LUCENA, C. Y. D. S.; DOS SANTOS, D. J. R.; DA SILVA, P. L. S.; DA COSTA, E. D., O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 1-17, 2018.

MACARTHUR, E. Towards the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 2, n. 1, p. 23-44, 2013.

MARONEZE, M. M.; et al. A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Revista Ambiente & Água**, v. 9, p. 445-458, 2014.

MAVHUNGU, A.; et al. Environmental sustainability of municipal wastewater treatment through struvite precipitation: Influence of operational parameters. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, 124856, 2021.

MAVHUNGU, A.; MASINDI, V.; FOTEINIS, S.; MBAYA, R.; TEKERE, M.; KORTIDIS, I.; CHATZISYMEON, E. Advocating circular economy in wastewater treatment: Struvite formation and drinking water reclamation from real municipal effluents. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, p. 103957, 2020.

MAYER, B. K; et al. Total Value of Phosphorus Recovery. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 13, pág. 6606-6620, 2016.

MEDEIROS, D. L. et al. Fertilizante de urina humana no semiárido brasileiro: avaliação ambiental e nexos água-energia-nutriente. **Ciência do Ambiente Total**, v. 713, p. 136145, 2020.

MEMELLI, M. S. **Produção de estruvita (MgNH₄PO₄. 6H₂O) a partir da urina humana através de precipitação induzida por íons de magnésio**. 2019. 83 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Mestrado Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável. Vitória. 2019.

MORAES, T. M.; SOUZA, A. S de. **Revisão sistemática sobre a comunicação dentro do processo de desenvolvimento de software**. Universidade Federal de Goiás-GO, p. 57, 2011.

NASCIMENTO, M. S. **Comparação de coagulantes utilizados no tratamento de efluentes de uma indústria de café solúvel por meio da avaliação do ciclo de vida simplificada**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NENOV, V.; PEEVA, G.; YEMENDZHIEV, H.; STANCHEVA, M.; ZERROUQ, F. Phosphorus consumption. From linear to circular flow. **Moroccan Journal of Chemistry**, v. 8, n. 4, p. 8-4, 2020.

NUMVIYIMANA, C.; *et al.* Struvite production from dairy processing wastewater: Optimizing reaction conditions and effects of foreign ions through multi-response experimental models. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 117, p. 182-189, 2020.

OLIVEIRA, G. E. A. de. **Políticas Públicas Para O Meio Ambiente: Aplicação Dos Indicadores Do Desenvolvimento Sustentável Do Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística**. 2016. 106 f. (Dissertação) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu, Faculdade Alves Faria, Goiânia, 2016.

ORTIZ, I. A. S.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P. Águas Residuais: Fontes, Constituição e Tecnologias de Tratamento. **Gestão E Qualidade Dos Recursos Hídricos**, p. 40, 2016.

PANCHAL, R.; SINGH, A.; DIWAN, H. Does circular economy performance lead to sustainable development?—A systematic literature review. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112811, 2021.

PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, p. 732-740, 2016.

PETERSON, H. M.; BAKER, L. A.; AGGARWAL, R. M.; BOYER, T. H.; CHAN, N. I. A transition management framework to stimulate a circular phosphorus system. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 2, p. 1713-1737, 2022.

PINATHA, Y.; POLPRASERT, C.; ENGLANDE JR, A. J. Product and cost perspectives of phosphorus recovery from human urine using solid waste ash and sea salt addition—A case of Thailand. **Science of the Total Environment**, v. 713, p. 136514, 2020.

PINTO E COSTA, M. **Diagrama de Borboleta: No Caminho da Circularidade**. 5 ago. 2021. Disponível em: <https://www.beecircular.org/post/diagrama-de-borboleta>. Acesso em: 27 jun. 2022.

POLLOCK, A., BERGE, E. How to do a systematic review. **International Journal of Stroke**, v. 13(2), 138–156, 2018.

POTRICH, M. C. **Aplicação de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves utilizando eletrodos de ferro e alumínio para remoção de nutrientes**. 2019. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Pato Branco. 2019.

PRADEL, M.; AISSANI, L. Environmental impacts of phosphorus recovery from a “product” Life Cycle Assessment perspective: Allocating burdens of wastewater treatment in the production of sludge-based phosphate fertilizers. **Science of the Total Environment**, v. 656, p. 55-69, 2019.

PREISNER, M. et al. Indicators for resource recovery monitoring within the circular economy model implementation in the wastewater sector. **Journal of Environmental Management**, v. 304, p. 114261, 2022.

RAHMAN, M. M.; SALLEH, M. A. M.; RASHID, U.; AHSAN, A.; HOSSAIN, M. M.; Ra, C. S. Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization—A review. **Arabian Journal Of Chemistry**, v. 7, n. 1, p. 139-155, 2014.

RAVI, R.; BEYERS, M.; BRUUN, S.; MEERS, E. Life cycle assessment of struvite recovery and wastewater sludge end-use: A Flemish illustration. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 182, p. 106325, 2022.

RIBEIRO, F. de M.; KRUGLIANSKAS, I. A Economia Circular no contexto europeu: Conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. **XVI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA)**. São Paulo, 2014.

ROBLES, Á.; et al. New frontiers from removal to recycling of nitrogen and phosphorus from wastewater in the Circular Economy. **Bioresource technology**, Valencia (Espanha), v. 300, p. 122673, 2020.

RODRIGUES, D. M.; do AMARAL FRAGOSO, R.; CARVALHO, A. P.; HEIN, T.; DE BRITO, A. G. Are alternative magnesium sources the key for a viable downstream transfer of struvite precipitation? Assessment of process feasibility and precipitate characteristics. **Journal of Water Process Engineering**, v. 45, p. 102508, 2022.

RUFÍ-SALÍS, M. et al. Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions. **Science of the Total Environment**, v. 737, p. 139783, 2020.

SAKTHIVEL, S. R.; TILLEY, E.; UDERT, K. M. Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine. **Science of the total environment**, v. 419, p. 68-75, 2012.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Brazilian Journal of Physical Therapy**, v. 11, p. 83-89, 2007.

SANCHEZ, A. S. Viabilidade técnica e econômica da recuperação de fósforo de efluentes na Região Metropolitana de São Paulo. **Journal of Water Process Engineering**, v. 38, p. 101537, 2020.

SANTIAGO, L. S. P. **Transição para a Economia Circular: possibilidades de aplicação no setor de metais**. 2015. 75f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SANTOS, A. F.; ALMEIDA, P. V.; ALVARENGA, P.; GANDO-FERREIRA, L. M.; QUINA, M. J. From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries. **Chemosphere**, v. 284, p. 131258, 2021.

SANTOS, M. P. de A. **Eficiência na recuperação de fósforo da urina humana pela precipitação da estruvita**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SANTOS, W. R. B dos. **Remoção de nitrogênio e fósforo presentes em efluentes agroindustriais pela precipitação de estruvita**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado)

– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Área de Concentração em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2011.

SFEZ, S.; DE MEESTER, S.; VLAEMINCK, S. E.; DEWULF, J. Improving the resource footprint evaluation of products recovered from wastewater: A discussion on appropriate allocation in the context of circular economy. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 148, p. 132-144, 2019.

SILVA, C. V. A. **Remoção de fósforo em estação compacta de tratamento de esgotos sanitários através de precipitação química**. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória. 2009.

SIMOES, F.; COLSTON, R.; ROSA-FERNANDES, C.; VALE, P.; STEPHENSON, T.; SOARES, A. Predicting the potential of sludge dewatering liquors to recover nutrients as struvite biominerals. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 3, p. 100052, 2020.

SOUZA, J. P. da S. **Precipitação da estruvita em escala piloto visando à recuperação de fósforo**. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro. 2017.

SUN, H.; MOHAMMED, A. N.; LIU, Y. Phosphorus recovery from source-diverted blackwater through struvite precipitation. **Science of The Total Environment**, v. 743, p. 140747, 2020.

TIOSSI, F. M.; SIMON, A. T. Economia Circular: suas contribuições para o desenvolvimento da Sustentabilidade. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba (PR), v. 7, n. 2, p. 11912-11927, fev. 2021.

TORTAJADA CHACÓN, L. **Uso de la estruvita como fertilizante, un ejemplo de economía circular en la gestión de purines**. Universitat Politècnica de València, 2021.

TRIANNI, A.; NEGRI, M.; CAGNO, E. What factors affect the selection of industrial wastewater treatment configuration? **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 112099, 2021.

UYSAL, A.; YILMAZEL, Y. D.; DEMIRER, G. N. The determination of fertilizer quality of the formed struvite from effluent of a sewage sludge anaerobic digester. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1-3, p. 248-254, 2010.

VACLAVIK, F. D. **Avaliação e otimização do uso de zeólitas no tratamento terciário de efluentes líquidos industriais**. 2010. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Química Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

VAN DER KOOIJ, S.; VAN VLIET, B. J.; STOMPH, T. J.; SUTTON, N. B.; ANTEN, N. P.; HOFFLAND, E. Phosphorus recovered from human excreta: A socio-ecological-technical approach to phosphorus recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, p. 104744, 2020.

VASA, T. N.; CHACKO, S. P. Recovery of struvite from wastewaters as an eco-friendly fertilizer: Review of the art and perspective for a sustainable agriculture practice in India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, p. 101573, 2021.

WANG, J.; et al. Selection of cost-effective magnesium sources for fluidized struvite crystallization. **Journal of Environmental Sciences**, v. 70, p. 144-153, 2018.

WEETMAN, C. **Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa**. Autêntica Business, 2019.

WILFERT, P.; DUGULAN, A. I.; GOUBITZ, K.; KORVING, L.; WITKAMP, G. J.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Vivianite as the main phosphate mineral in digested sewage sludge and its role for phosphate recovery. **Water research**, v. 144, p. 312-321, 2018.

YAN, H.; SHIH, K.. Effects of calcium and ferric ions on struvite precipitation: A new assessment based on quantitative X-ray diffraction analysis. **Water research**, v. 95, p. 310-318, 2016.

ZHANG, Z.; et al. Effect of acetic acid on struvite precipitation: An exploration of product purity, morphology and reaction kinetics using central composite design **Chemosphere**, v. 285, p. 131486, 2021.

APÊNDICE A - Artigos selecionados para compor o portfólio da RBS

ARTIGOS SELECIONADOS PARA COMPOR O PORTFÓLIO DA RBS

Título	Autores	Ano de Publicação	Periódico de Publicação
A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy	Gherghel, A; Teodosiu, C; De Gisi, S	2019	Journal Of Cleaner Production
A transition management framework to stimulate a circular phosphorus system	Peterson, H.M; Baker, L.A; Aggarwal, R.M; Boyer, TH; Chan, NI	2022	Environment Development And Sustainability
Advocating circular economy in wastewater treatment: Struvite formation and drinking water reclamation from real municipal effluents	Mavhungu, A; Masindi, V; Foteinis, S; Mbaya, R; Tekere, M; Kortidis, I; Chatzisyneon, E	2020	Journal Of Environmental Chemical Engineering
Are alternative magnesium sources the key for a viable downstream transfer of struvite precipitation? Assessment of process feasibility and precipitate characteristics,	Rodrigues D.M., do Amaral Fragoso R., Carvalho A.P., Hein T., de Brito A.G.,	2022	Journal Of Water Process Engineering
Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions	Rufi-Salís, M.; Brunnhofer N.; A.; Petit-Boix, X. G., Albert G., Gara V.	2020	Science Of The Total Environment
From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries	Santos A. F; Patrícia V. Almeida P. V; Alvarenga P.; Gando-Ferreira L.M.; Quina M. J.	2021	Chemosphere
Improving the resource footprint evaluation of products recovered from wastewater: A discussion on	Sfez, S; De Meester, S; Vlaeminck, SE; Dewulf, J	2019	Resources Conservation And Recycling

appropriate allocation in the context of circular economy			
Indicators for resource recovery monitoring within the circular economy model implementation in the wastewater sector	Preisner, M; Smol, M; Horttanainen, M; Deviatkin, I; Havukainen, J <i>et al</i>	2022	Journal Of Environmental Management
Life cycle assessment of struvite recovery and wastewater sludge end-use: A Flemish illustration	Rahul Ravi, Miriam Beyers, Sander Bruun, Erik Meers	2022	Resources Conservation And Recycling
New frontiers from removal to recycling of nitrogen and phosphorus from wastewater in the Circular Economy	Robles, A; Aguado, D; Barat, R; Borrás, L; Bouzas, A; Gimenez, JB; Marti, N; Ribes, J; Ruano, MV; Serralta, J; Ferrer, J; Seco, A	2020	Bioresource Technology
Phosphorus consumption. From linear to circular flow,	Nenov V., Peeva G., Yemendzhiev H., Stancheva M., Zerouq F.,	2020	Moroccan Journal Of Chemistry
Phosphorus recovered from human excreta: A socio-ecological-technical approach to phosphorus recycling	van der Kooij, S.; van Vliet, B. J.; Stomph, T. J.; Sutton, N. B.; Anten, N. P.	2020	Resources Conservation And Recycling
Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries	Chripim M. C; Scholz, M.; Nolasco, M.A.	2019	Journal Of Environmental Management
Predicting the potential of sludge dewatering liquors to recover nutrients as struvite biominerals	Simoës, F; Colston, R; Rosa-Fernandes, C; Vale, P; Stephenson, T; Soares, A	2020	Environmental Science And Ecotechnology
Recovery of phosphate and ammonia from wastewater via struvite precipitation using	Li, D.Y; Cho, Y.C; Hsu, M.H; Lin, Y.P.	2022	Journal Of Environmental Management

spent refractory brick gravel from steel industry			
Recovery of struvite from wastewaters as an eco-friendly fertilizer: Review of the art and perspective for a sustainable agriculture practice in India	Vasa, T.N; Chacko, S.P.	2021	Sustainable Energy Technologies And Assessments
Sourcing phosphorus for agriculture: Life cycle assessment of three options for India	Goel, S.; Kansal, A.; Pfister, S.	2021	Resources Conservation And Recycling
The spatial impact of socio-technical transitions - The case of phosphorus recycling as a pilot of the circular economy	Jedelhauser, M; Binder, C.R.	2018	Journal Of Cleaner Production
Vivianite as the main phosphate mineral in digested sewage sludge and its role for phosphate recovery	Wilfert, P; Dugulan, AI; Goubitz, K; Korving, L; Witkamp, GJ; Van Loosdrecht, MCM	2018	Water Research
Wastewater in India: an untapped and underexploited resource for nutrient recovery to achieve a sustainable circular economy	Gowd S.C., Ramakrishna S., Rajendran K.,	2022	Chemosphere