

## **ECONOMIA CIRCULAR EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS: MAPEAMENTO NA LITERATURA CIENTÍFICA, INVESTIGAÇÃO NO CONTEXTO DAS BACIAS PCJ E FERRAMENTA DE TOMADA DE DECISÃO**

*Circular economy in sewage treatment stations: mapping in the scientific literature, research in the context of PCJ basins and a decision-making tool*

Sabrina de Oliveira Anício, Brenda Franciss Córdor Salazar, João Alexandro Ferraz, Louise Silveira, Vinicius Perez Dictoro, Tadeu Fabricio Malheiros  
Universidade de São Paulo

Email: [sabrina55oliveira@gmail.com](mailto:sabrina55oliveira@gmail.com), [brenda.condor.salazar@usp.br](mailto:brenda.condor.salazar@usp.br), [j.aferraz@usp.br](mailto:j.aferraz@usp.br), [loh.s@usp.br](mailto:loh.s@usp.br), [viniciusdictoro@usp.br](mailto:viniciusdictoro@usp.br), [tmalheiros@usp.br](mailto:tmalheiros@usp.br)

### **RESUMO**

A recuperação de recursos de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), principalmente a partir do lodo, do biogás e do efluente tratado, insere esses sistemas no contexto da economia circular. A circularidade é um conceito que compreende alternativas que, em oposição ao atual modelo linear de economia em que a sociedade está baseada, promove o uso máximo do valor dos recursos, a diminuição da geração de resíduos e de desperdício. Nesse sentido, este artigo apresenta e discute resultados iniciais da construção de uma ferramenta de tomada de decisão que possibilitará avaliar, num cardápio de diversas rotas tecnológicas, as melhores opções para o processamento dos resíduos obtidos nos processos de tratamento de esgoto dentro de uma perspectiva circular, a partir de avaliações que considerem indicadores de sustentabilidade nas dimensões ambiental, econômica e social. Esta ferramenta tem como objetivo facilitar e acelerar a transição para a economia circular em sistemas de saneamento, favorecendo maior acesso a tecnologias disponíveis, visualização de impactos e viabilidade de retorno de investimentos. Como estudo de caso, a ferramenta está sendo desenvolvida com maior aderência para aplicação na região das Bacias PCJ. Nos resultados finais, são apresentados: um mapeamento de estratégias de economia circular em ETEs encontradas na literatura científica; um mapeamento desse mesmo tipo de estratégia inserido no contexto das bacias PCJ; um exemplo preliminar da ferramenta construída computacionalmente, cujo desenvolvimento ainda está em curso.

**Palavras-chave:** economia circular, estações de tratamento de esgotos, recuperação de recursos, bacias PCJ; tomada de decisão.

**ACEITO EM: 13/11/2022**

**PUBLICADO: 30/12/2022**



## CIRCULAR ECONOMY IN SEWAGE TREATMENT STATIONS: MAPPING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE, RESEARCH IN THE CONTEXT OF PCJ BASINS AND A DECISION-MAKING TOOL

*Economia circular em estações de tratamento de esgotos: mapeamento na literatura científica, investigação no contexto das bacias PCJ e ferramenta de tomada de decisão*

Sabrina de Oliveira Anício, Brenda Franciss Córdor Salazar, João Alexandre Ferraz, Louise Silveira, Vinicius Perez Dictoro, Tadeu Fabricio Malheiros  
Universidade de São Paulo

Email: [sabrina55oliveira@gmail.com](mailto:sabrina55oliveira@gmail.com), [brenda.condor.salazar@usp.br](mailto:brenda.condor.salazar@usp.br), [j.aferraz@usp.br](mailto:j.aferraz@usp.br), [loh.s@usp.br](mailto:loh.s@usp.br), [viniciusdictoro@usp.br](mailto:viniciusdictoro@usp.br), [tmalheiros@usp.br](mailto:tmalheiros@usp.br)

### ABSTRACT

The recovery of resources from Wastewater Treatment Plants (WWTPs), mainly from sludge, biogas and treated effluent, places these systems in the context of circular economy. Circularity is a concept that comprises alternatives that, in opposition to the current linear model of economy on which society is based, promotes the maximum use of the value of resources, the reduction of waste generation and waste. In this sense, this paper presents and discusses initial results of the construction of a decision-making tool that will allow the evaluation, in a menu of several technological routes, of the best options for processing the waste obtained in the sewage treatment processes within a circular perspective, from evaluations that consider sustainability indicators in the environmental, economic and social dimensions. This tool aims to facilitate and accelerate the transition to a circular economy in sanitation systems, favoring greater access to available technologies, visualization of impacts, and viability of return on investments. As a case study, the tool is being developed with greater adherence for application in the PCJ Basins region. In the final results, we present: a mapping of circular economy strategies in wastewater treatment plants found in the scientific literature; a mapping of this same type of strategy inserted in the context of the PCJ watersheds; a preliminary example of the computationally built tool, whose development is still in progress.

**Keywords:** circular economy, wastewater treatment plants, resource recovery, PCJ basins; decision-making.

## INTRODUÇÃO

Os processos convencionais de tratamento de esgotos domésticos realizados em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), embora importantes no que tange à recuperação do efluente, por vezes geram uma grande quantidade de resíduos, com destaque para o resíduo sólido – lodo – e o resíduo gasoso – o biogás, provenientes principalmente de processos anaeróbios de tratamento (de esgoto ou do lodo). No Brasil, o lodo é comumente encaminhado para aterros sanitários (IBGE, 2017) que, embora apresentem-se adequados do ponto de vista dos licenciamentos ambientais, infelizmente contribuem para a prática do acúmulo de resíduos, aumentam o risco de instabilidade de taludes e aumentam a geração de gases de efeito estufa (Bringhenti et al., 2018). No caso do biogás gerado durante os processos de tratamento ou na disposição final do lodo, esse é geralmente queimado de maneira simples ou lançado de forma direta na atmosfera, contribuindo para a emissão de gases de efeito estufa (por ser composto de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, dentre outros gases). Esse lançamento representa também uma perda de energia, uma vez que, quando processado, o biogás pode ser convertido em energia elétrica, energia térmica ou biometano (Brasil, 2015). A perda de recursos de valor econômico é observada também pelos atuais destinos do lodo, material composto de nutrientes que pode ser utilizado em processos agrícolas (Brasil, 2020).

A recuperação de recursos é possível também pelo próprio reúso do efluente final tratado, podendo ser aproveitado em atividades que não exijam padrões de potabilidade, incluindo fertirrigação (Mainardis et al., 2022). Essas estratégias inserem as ETEs no contexto da economia circular, conceito que compreende alternativas que, em oposição ao atual modelo linear de economia em que se baseiam os padrões de produção e consumo da sociedade, promove o uso máximo do valor dos recursos, a diminuição da geração de resíduos e de desperdício.

Especificamente para ETEs, a adoção de estratégias circulares pode representar benefícios potenciais, como os que seguem:

- Eliminação ou mitigação de poluição e impactos ambientais associados: do ar, por evitar o lançamento de biogás na atmosfera; do solo, a partir da supressão da disposição de lodo de esgoto em aterros sanitários e similares; e da água, pela eliminação de lançamentos inadequados ou mesmo de efluentes tratados com residuais de matéria orgânica e nutrientes nos corpos d'água;
- Benefícios econômicos: pela adoção de alternativas hídricas, energéticas e de nutrientes diferentes das convencionais, podendo ser comercializadas; pela criação de uma boa imagem das organizações para o público; pela supressão da disposição de lodo de esgoto em aterros sanitários, alternativa cada vez mais dispendiosa e de elevado risco ambiental.
- Benefícios sociais: pela geração de novos empregos; pelo acesso a produtos de alta qualidade a baixo custo.

O alcance desses benefícios exige ambiente político, econômico e tecnológico adequado e, quando tais condições são favoráveis, esses não são observados imediatamente – devido à grande quantidade de fatores incluídos para a implementação dessas estratégias. A adoção dessas práticas ainda é pouco encontrada no Brasil, justificando a necessidade de se buscar métodos que facilitem a expansão dessas estratégias. Nesse sentido, está em curso o desenvolvimento de uma ferramenta de tomada de decisão que possibilite, a partir da consideração de diversos processos e tecnologias aplicáveis, executar operações de simulação que visem contribuir para a escolha das melhores alternativas para o gerenciamento desses resíduos. Esta ferramenta tem como objetivo facilitar e acelerar a transição para a economia circular em sistemas de saneamento, favorecendo maior acesso a tecnologias disponíveis, visualização de impactos e viabilidade de retorno de investimentos.

Nesse sentido, este artigo discute os resultados parciais dos esforços para criar uma ferramenta de tomada de decisão que possibilite avaliar, entre diversas alternativas, as melhores opções para o processamento dos resíduos obtidos nos processos de tratamento de esgoto dentro de uma perspectiva circular, a partir de avaliações que considerem indicadores de sustentabilidade nas dimensões ambiental, econômica e social. A priori, a ferramenta está voltada para a aplicação na região das Bacias PCJ. Nos resultados finais, são apresentados: um mapeamento de estratégias de economia circular em ETEs encontradas na literatura científica; um mapeamento desse mesmo tipo de estratégia inserido no contexto das bacias PCJ; um exemplo preliminar da ferramenta

construída computacionalmente, cujo desenvolvimento ainda está em curso. Destaca-se que ambos os mapeamentos objetivam servir de base de dados para a ferramenta em desenvolvimento.

## 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1 Economia circular no tratamento convencional de esgotos sanitários

O conceito de economia circular está relacionado à máxima utilização dos recursos extraídos e a mínima geração de resíduos para a disposição final. O objetivo é transitar do atual modelo linear em que a economia está baseada – extrair-usar-descartar – para um sistema em que as perdas de material, energia e mão-de-obra sejam evitadas, a partir de usos alternativos (Deutz, 2020). Nesse sentido, a ideia é de que recursos sejam mantidos em uso o máximo possível, a partir da regeneração de produtos e a recuperação de recursos em detrimento da disposição final (Watson, 2020). Esse tipo de estratégia faz parte de um modelo de produção e consumo que objetiva estender o ciclo de vida dos produtos (EUROPEAN PARLIAMENT, 2022) e que, a partir do estabelecimento e reestabelecimento de ciclos, pode contribuir para enfrentar e solucionar problemas globais como as mudanças climáticas, a perda de biodiversidade, o desperdício e a poluição (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2020).

A economia circular pode ser adotada em diversos setores da economia e da sociedade, como o setor de saneamento básico. De forma mais específica, no tratamento de esgotos sanitários, sendo as ETEs os pontos centrais, esse tipo de alternativa pode ser aplicado de forma satisfatória, a partir de 3 tipos principais de recuperação de recursos: a recuperação de nutrientes, a partir do esgoto tratado em si e do lodo gerado no tratamento; o reúso de água; e a recuperação de energia pelo biogás produzido por processos anaeróbios (Neczaj & Grosser, 2018).

A recuperação de nutrientes é promissora a partir da geração de valor pela comercialização de produtos e a diminuição da utilização de fertilizantes sintéticos industriais (Tassinari et al., 2020), representada principalmente pela utilização do lodo enquanto biossólido e de água de reúso para fertirrigação. Nesse segundo, o principal benefício se encontra no aumento da quantidade de água disponível, principalmente considerando os problemas de baixa disponibilidade hídrica que têm assolado o Brasil e o mundo com um todo (IPCC, 2021). Já para o biogás, vê-se grandes benefícios de ordem ambiental e econômica, haja vista que o produto, após processos de tratamento e purificação, pode ser utilizado para a geração e cogeração de energias elétrica e térmica e como combustível para veículos, podendo ainda ser injetado na rede de gás natural (Brasil, 2015), evitando o lançamento do produto cru ou queimado na atmosfera.

### 1.2 Bacias PCJ

As bacias PCJ abrangem uma área de mais de 15 mil km<sup>2</sup>, estando 92,45% no estado de São Paulo (71 municípios) e o restante em Minas Gerais (5 municípios) (PROFILL - RHAMA, 2018). Em termos de águas residuárias, a região apresenta um índice de coleta de 90% e de tratamento – de todo o montante de esgoto gerado – de 75% (COMITÊS PCJ, 2020). Destaca-se também que a disponibilidade de recursos hídricos da região tem diminuído – de 2016 a 2020, foram observadas as seguintes vazões de disponibilidade de água per capita na região, respectivamente, em m<sup>3</sup>hab<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>: 990,92; 980,96; 971,08; 961,29; 951,57 (Agência das Bacias PCJ & Comitês PCJ, 2021). No que diz respeito ao esgotamento sanitário, para o ano de 2020, de todo o efluente gerado na região, 93,7% era coletado e 80,2% tratado. Ainda, havia uma redução de 69,3% de toda a carga orgânica poluidora doméstica gerada (Agência das Bacias PCJ & Comitês PCJ, 2021). Na região, encontram-se 180 ETEs ativas, segundo o Atlas Esgotos.

A região tem uma importância grande para o estado de São Paulo, sendo que, em 2014, captou aproximadamente 17% do PIB do estado (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2019), e onde viviam cerca de 5,85 milhões de pessoas em 2019 (COMITÊS PCJ, 2020), por volta de 13% da população da unidade federativa (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2021).

## 2. METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa foi baseado em 3 etapas principais: o mapeamento de estratégias de economia circular em ETEs encontradas na literatura científica; o estudo e mapeamento de práticas de economia circular em Estações de Tratamento de Esgoto nas bacias PCJ; e o desenvolvimento de rotinas de programação para plataforma digital de tomada de decisão para implementação de economia circular em Estações de Tratamento de Esgoto. Os resultados das duas primeiras etapas servem como parte da base de dados para a construção da terceira etapa.

### 2.1 Mapeamento de estratégias de economia circular em etes encontradas na literatura científica

Para esta etapa utilizou-se da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) como método de pesquisa. Segundo Barbosa (2019), a revisão sistemática é uma modalidade de pesquisa que segue protocolos específicos e busca dar alguma logicidade a um grande corpus documental que envolve várias atividades discretas. Para a investigação do tema circularidade em ETEs, seguiram-se 5 fases para o desenvolvimento da RSL: i. busca de artigos em bases de dados; ii. seleção de estudos primários; iii. avaliação da aderência do estudo; iv. extração e monitoramento de dados; v. e síntese de dados.

**A busca de artigos para a seleção de estudos da RSL foi feita no dia 24 de fevereiro de 2022, por meio de acesso institucional no Portal Periódicos Capes em quatro bases de busca: Web of Science; Scielo; Scopus; e Science Direct. Foram selecionados estudos publicados desde 1º janeiro de 2018 até a data da busca. A análise de conteúdo dos artigos selecionados foi realizada por meio de uma primeira seleção, a fim de excluir as pesquisas que estivessem em duplicata, cujo acesso não fosse possível por meio institucional ou por falta de aderência ao tema de estudo. Após primeira filtragem, organização e análise dos artigos encontrados, foram selecionados 32 artigos de estudos de caso referentes à aplicação de práticas voltadas para modelos circulares em ETEs domiciliares em escala piloto ou real. A**

Tabela 1 apresenta as palavras-chave, expressões ou *strings* de pesquisa utilizadas para a pesquisa nas bases, bem como o número de resultados encontrados após cada seleção.

**Tabela 1 - Strings utilizadas para a busca de estudos de caso**

Idioma de busca	Strings de busca	Artigos encontrados	Artigos selecionados
Inglês	"circular economy" AND ("sewage treatment" OR "wastewater treatment")	1233	32
Português	"economia circular" e "tratamento de esgoto" OR "tratamento de águas residuárias"	1	0
Espanhol	"economía circular" y "tratamiento de aguas residuales"	0	0

Fonte: Autores (2022).

### 2.2 Estudo e mapeamento de práticas de economia circular em estações de tratamento de esgoto nas bacias PCJ

Para o segundo mapeamento, focado na região recorte do estudo, a pesquisa se baseou na técnica Survey, método fundamentado no questionamento direto de pessoas a partir de um grupo de interesse, que serve de base para análise quantitativa acerca do problema e aprimoramento dos dados estatísticos, permitindo a projeção para regiões que estejam inseridas em um cenário semelhante (GIL, 2008). A elaboração do mapeamento foi reforçada pela realização de leituras seletivas e analíticas de materiais que relacionam projetos já concretizados de economia circular a tratamentos de esgoto, exemplificando alternativas de implementação e custos de aplicação dessas tecnologias.

Dessa forma, o procedimento de coleta de dados foi feito a partir de duas metodologias principais:

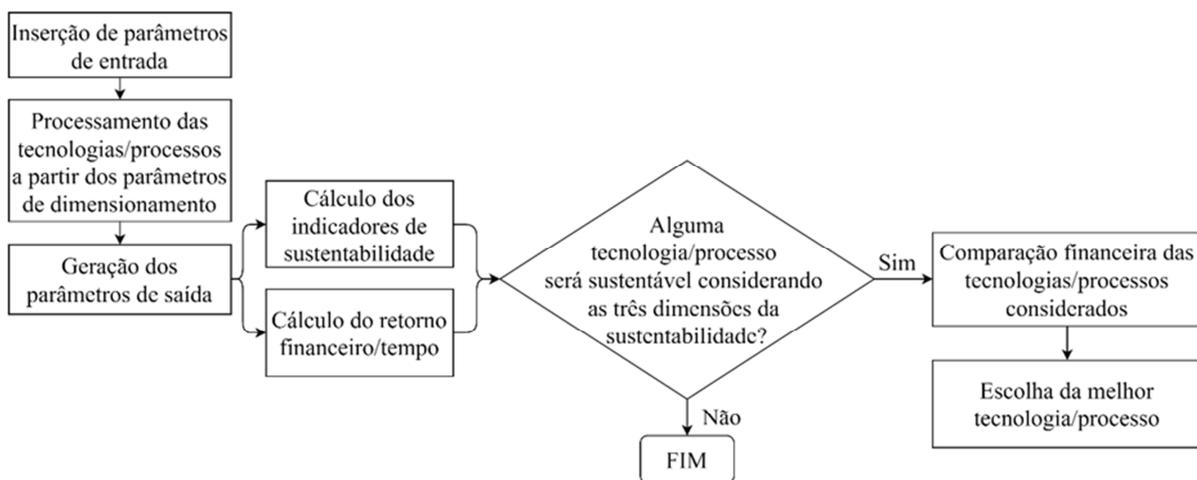
- pesquisa bibliográfica: por meio da consulta em base de dados de agências reguladoras e institutos de pesquisa nacionais com canais abrangentes, tais como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a Agência Nacional de Águas (ANA), além do acesso ao site do Comitê das Bacias PCJ. A pesquisa bibliográfica incluiu a pesquisa na literatura cinzenta, que se refere a publicações não convencionais e que não são oficialmente publicadas, não passando por revisão científica ou controle editorial (Botelho & Oliveira, 2015). Nessa categoria se encontram notícias publicadas, editoriais, memorandos, livros, revistas, dentre outros.
- pesquisa descritiva: por meio da obtenção de informações através da disponibilização de um formulário *online* (Apêndice A), de modo a permitir o contato com empresas (privadas e públicas) responsáveis pelo atendimento da rede de saneamento local. A plataforma escolhida para esse foi a SurveyMonkey, que disponibiliza uma análise rápida e intuitiva sobre os dados coletados. A partir do contato direto por meio do site das Companhias de Saneamento, redes sociais profissionais (LinkedIn) e demais redes sociais disponíveis (Instagram e Facebook), foi possível entrar em contato com profissionais atuantes no segmento de saneamento.

A partir da coleta de dados foi feita a compilação das informações obtidas, realizando-se a categorização por resíduo e destino adotado, obtendo conclusões acerca da existência de práticas circulares no tratamento de esgoto em ETEs inseridas no contexto das Bacias do PCJ.

### 2.3 Desenvolvimento de rotinas de programação para plataforma digital de tomada de decisão para implementação de economia circular em estações de tratamento de esgoto

Para atingir o objetivo citado na introdução, a ferramenta, cujo desenvolvimento foi iniciado, tem o objetivo de automatizar o processo de tomada de decisão. Ao final, a intenção é montar uma ferramenta computacional automatizada que funcione conforme o fluxograma representado na Figura 1. A referente ferramenta computacional deve, a partir de determinados parâmetros de entrada característicos dos sistemas, avaliar as melhores alternativas para o gerenciamento dos resíduos de ETEs dentro de uma perspectiva circular, considerando indicadores de sustentabilidade e as três dimensões comumente consideradas nesse tema: economia; ambiente; e sociedade.

Figura 1 - Fluxograma simplificado da ferramenta computacional em desenvolvimento



Fonte: Anício (2022).

A ferramenta está hospedada na plataforma *Microsoft Excel*, utilizando uma planilha que apresenta cálculos utilizados para o dimensionamento das estratégias de recuperação de recursos considerados. Essa planilha serve como fundação para a plataforma, de modo que possibilita, de forma automática, o cálculo de parâmetros referentes às tecnologias de recuperação e reciclagem. As diferentes combinações de tecnologias foram inseridas

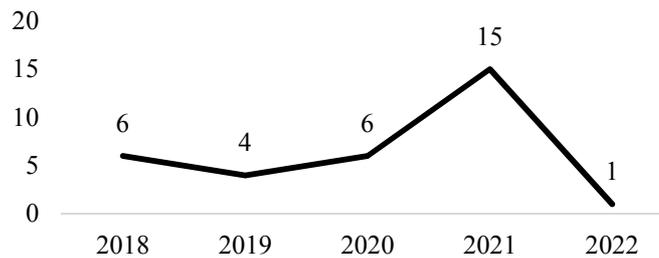
na planilha e possibilitam a operacionalização da ferramenta. Assim, a partir dela foram criadas rotinas de programação que automatizam a inserção de parâmetros pelo usuário, a navegação pelos ambientes da plataforma (por meio do layout desenvolvido) e a apresentação dos resultados.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Mapeamento de estratégias de economia circular em etes encontradas na literatura científica

O número de documentos selecionados nessa etapa da pesquisa está apresentado na Figura 2, conforme o ano de publicação dos documentos, e na Tabela 2, de acordo com o país em que a estratégia é aplicada.

**Figura 2 - Número de pesquisas selecionadas na RSL em relação ao ano de publicação**



Fonte: Autores (2022).

**Tabela 2 - Número de artigos selecionados conforme o país de origem**

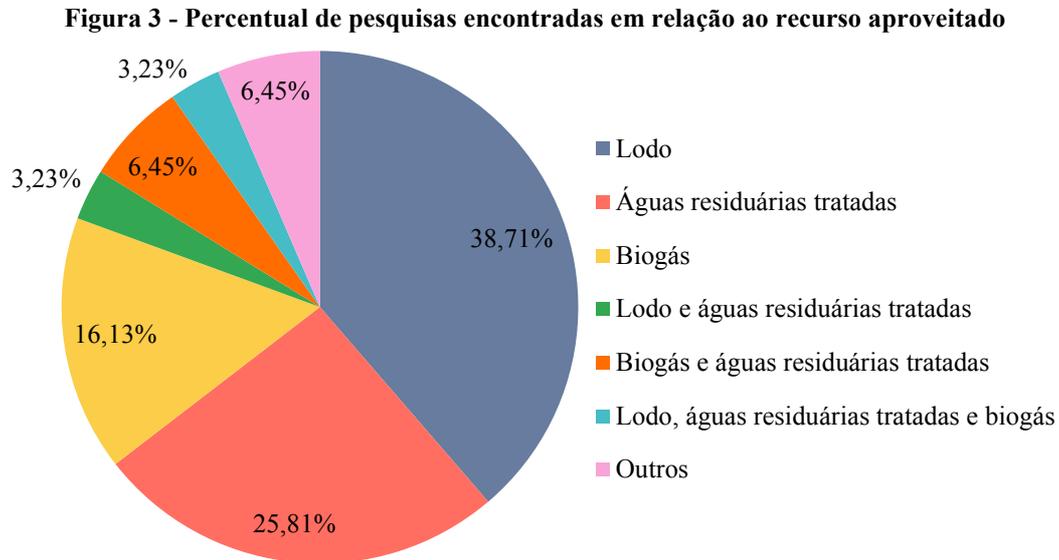
País	Número de documentos	País	Número de documentos
Alemanha	1	Itália	4
Brasil	2	Japão	1
Bulgária	1	Nova Zelândia	1
Chile	1	Países baixos	1
China	1	Polônia	3
Eslovênia	1	Portugal	2
Espanha	5	Romênia	1
Finlândia	2	Suécia	2
Grécia	1	Taiwan	1
Índia	1		

Fonte: Autores (2022).

Observou-se que a maioria das pesquisas encontradas que envolvem a aplicação de EC em ETEs são do ano de 2021 (observando, no entanto, que a RSL foi elaborada no começo do ano de 2022), inferindo que há um crescimento no interesse, preocupação e financiamento para as áreas científicas que envolvem tais termos. No que se refere aos países com mais práticas de circularidade em ETEs, observou-se que a maioria é composta por Estados europeus, com projetos para recuperação de recursos aplicados em escala piloto e real. Reporta-se que a escassez de água vem aumentando na Europa, num contexto de maior risco de secas devido às alterações climáticas. Países como a Itália, Portugal e Espanha vêm registrando secas e falta de chuvas que fazem surgir a necessidade de se racionar o uso de água (Schauenberg & Christofaro, 2022). Nesse sentido, esses problemas parecem impulsionar uma crescente busca de recuperação de recursos na Europa, com grande destaque para o papel da Comissão Europeia, por meio do estabelecimento de planos de ações e estratégias para o futuro, como o Pacto Ecológico Europeu, e de regulamentações, como a diretiva de energias renováveis. (López et al., 2020; Santos et al., 2021).

Como resultado da avaliação dos artigos selecionados, observou-se que a maioria consiste em sistemas em escala piloto, sendo adaptados a algumas seções operacionais das respectivas ETEs. Das pesquisas brasileiras

selecionadas, observou-se carência de aplicações em escala real ou piloto, o que pode indicar eventualmente que ainda há poucas práticas de circularidade em ETEs no Brasil. Porém, cabe destacar que, embora selecionados apenas dois estudos de caso no cenário brasileiro, foi encontrada uma grande quantidade de pesquisas em escala laboratorial (não investigadas para a análise proposta), na qual os autores incentivam, além de maior profundidade de pesquisa do assunto, maiores investimentos para futuras aplicabilidades dos seus estudos em ETEs em escala real. Referente aos principais recursos recuperados em ETEs, conforme Figura 3, cabe destacar que a maioria das pesquisas encontradas envolviam o lodo (aproximadamente 45,17% dos documentos).



Fonte: Autores (2022).

No Brasil, o uso e disposição do lodo no solo é regulamentado pela Resolução nº 498 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 2020, e caracteriza duas classes de lodos de esgotos: a Classe A, que pode ser usada para o cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo e para pastagens e forrageiras; e a Classe B, que se trata de uma utilização restrita ao cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus e produtos não alimentícios, pastagens e forrageiras e árvores frutíferas. Ambas as classes consideram determinadas restrições para a aplicação (Brasil, 2020) e, evidentemente, as aplicações possíveis para a Classe A englobam também as aplicações possíveis para a Classe B.

Como referido anteriormente, a disposição do lodo no solo agrícola, dentre todas as opções, representa o cenário de maior aplicação em todo o mundo, tratando-se de alternativa competitiva no que diz respeito a sua viabilidade econômica e ambiental, reduzindo a necessidade do uso de fertilizantes químicos (Amorim Júnior et al., 2021; Sharma et al., 2021). Observou-se também que a recuperação de nutrientes como o fósforo e nitrogênio em decorrência da sua escassez mundial é cada vez mais estudada e se apresenta como eficiente, tanto a partir do lodo quanto de efluentes líquidos (Czuba et al., 2021; Moraes et al., 2022)

Para o biogás, formado a partir da atividade de microrganismos anaeróbios na degradação da matéria orgânica, observa-se de forma proeminente nos estudos selecionados a geração de eletricidade para uso na própria ETE ou em áreas vizinhas, inclusive pela sua utilização em transportes públicos – exemplo encontrado em um dos estudos selecionados, aplicado na Suécia (Ammenberg et al., 2018)

De forma complementar, foi elaborado um quadro (ver Apêndice B, Quadro 1) que classifica as práticas de circularidade em ETEs segundo determinadas características, como localidade, porte, tipo de tratamento, estratégia de circularidade, dentre outras. Os dados podem servir de base para pesquisas futuras.

### 3.2 Estudo e mapeamento de práticas de economia circular em estações de tratamento de esgoto nas bacias PCJ

As respostas ao formulário (Apêndice A), da pesquisa descritiva, foram recebidas entre os dias 29/06/2022 e 31/08/2022. Ao todo foram obtidas 32 respostas, cujos dados relativos ao tipo de resíduo inserido no contexto da economia circular estão apresentados na Tabela 3. Obteve-se um número baixo de respostas, considerando as numerosas ETEs presentes nas Bacias PCJ. As questões foram apresentadas como sendo de caráter não obrigatório, e por esse motivo apenas 9 formulários foram respondidos completamente.

**Tabela 3 - Resultados obtidos por meio do formulário (Apêndice A)**

Municípios	Unidades que praticam reúso de água ou produzem água de reúso	Unidades que compostam ou preparam o lodo para compostagem <sup>2</sup>
Campinas	1 <sup>1</sup>	1 <sup>2</sup>
Jundiaí	3	3
Nova Odessa	1	1
Vinhedo	1	-

<sup>1</sup>Estação de Produção de Água de Reúso (EPAR); <sup>2</sup>Realiza a preparação (secagem) do lodo para compostagem.

Fonte: Autores (2022).

As 3 unidades localizadas em Jundiaí (ETE Fernandes, ETE Jundiaí e ETE São José) utilizam a água de reúso proveniente do tratamento em suas instalações para lavagem de pátio, jardins e máquinas. A unidade localizada em Nova Odessa (ETE Quilombo) faz reúso de água para limpeza das peneiras. Em ambos os casos, é feita a compostagem do lodo, representando um volume de 5000 t/dia de lodo encaminhado para compostagem em Jundiaí e 9 t/dia na cidade de Nova Odessa. A unidade de Campinas (sem menção do nome da ETE) vem realizando testes relacionados à compostagem do lodo misturado com galharias, devido à grande disponibilidade do recurso, caracterizado pela produção diária de 100 toneladas. As outras 4 respostas obtidas sobre a destinação do lodo afirmam que esse subproduto é encaminhado para aterros sanitários.

As demais unidades citadas estão localizadas nas cidades de Campinas (sem menção do nome da unidade) e Vinhedo (ETE Pinheirinho), onde realizam o reúso de água também dentro de suas próprias unidades para lavagem de equipamentos e outras operações. No que se refere ao biogás proveniente dos processos anaeróbios de digestão, nas unidades nas quais ele é obtido como subproduto, é realizada a queima simples (flares), diminuindo seu potencial poluidor ou de aquecimento global. As cidades nas quais isso ocorre são: Campinas (1 unidade); Louveira (2 unidades); e Nova Odessa (1 unidade).

Observou-se que as respostas com maior riqueza de detalhes e conhecimento dos processos aplicados nas estações foram as provenientes de profissionais que possuem cargos de responsabilidade em atividades ligadas diretamente às unidades, e são representados em um intervalo de 7 a 36 anos de serviços prestados (a maioria ocupando cargos de diretoria, gerência e secretaria).

A pesquisa a partir da literatura cinzenta foi realizada dada a necessidade de complementação da base de dados, devido à baixa taxa de resposta do formulário. Os dados obtidos estão descritos na Tabela 4.

Por fim, estão representados graficamente na Figura 4 todos os municípios em que foram identificadas práticas de circularidade em suas ETEs.

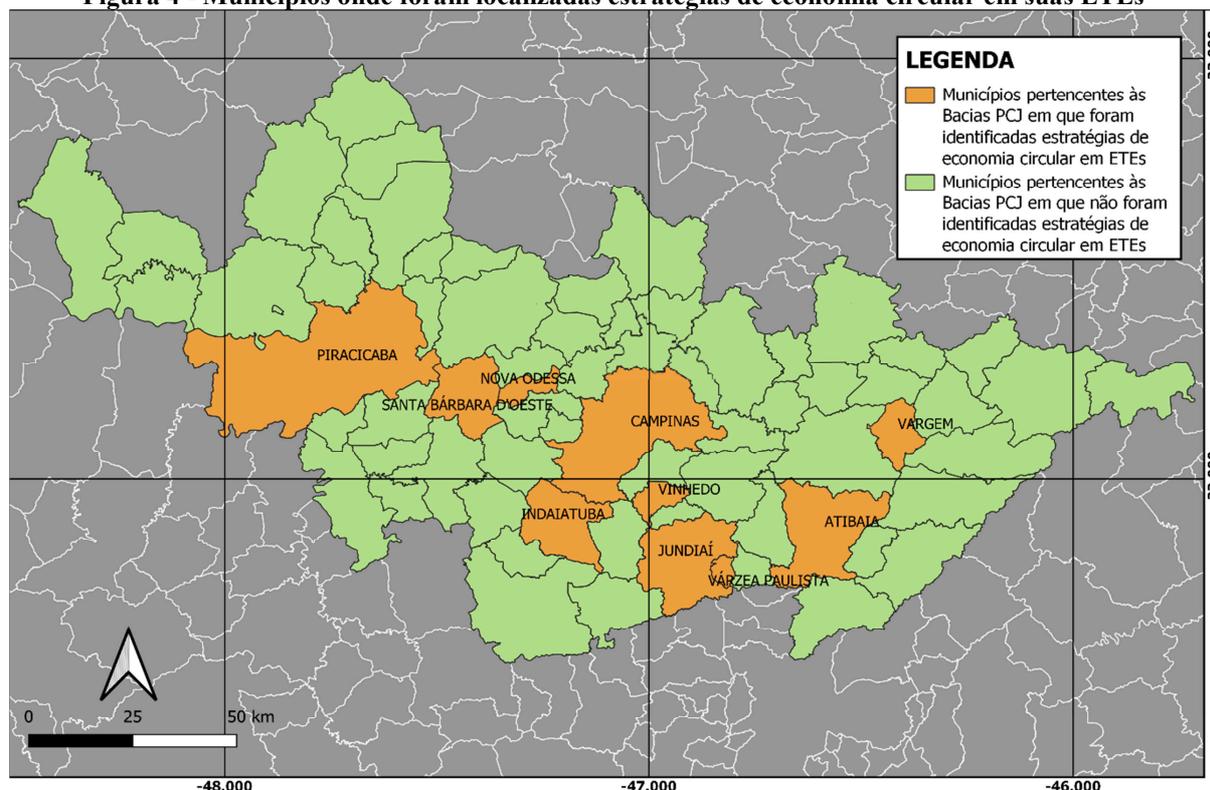
**Tabela 4 - Resultados obtidos por meio da literatura cinzenta**

Municípios	Unidades que praticam reúso de água ou produzem água de reúso	Unidades que compostam ou preparam o lodo para compostagem <sup>1</sup>
Atibaia	1	1 <sup>2</sup>
Campinas	2 <sup>1</sup>	1
Indaiatuba	1 <sup>1</sup>	-
Jundiaí	-	3
Nova Odessa	-	1
Piracicaba	6	-
Santa Bárbara D'Oeste	1	-
Várzea Paulista	-	1 <sup>2</sup>
Vinhedo	1	-

<sup>1</sup> Estação de Produção de Água de Reúso (EPAR); Realiza a preparação do lodo para compostagem (secagem).

Fonte: Autores (2022).

**Figura 4 - Municípios onde foram localizadas estratégias de economia circular em suas ETEs<sup>1</sup>**



<sup>1</sup> Considerando os municípios em que foram obtidas respostas no formulário ou em que foram identificadas práticas circulares a partir da literatura cinzenta.

Fonte: Autores (2022).

### 3.3. Desenvolvimento de rotinas de programação para plataforma digital de tomada de decisão para implementação de economia circular em estações de tratamento de esgoto

A ferramenta de suporte à tomada de decisão desenvolvida utiliza-se de tabelas, equações e processos explicitados por Anício (2022), além de materiais complementares organizados pela autora. Inicialmente, definiu-se que o desenvolvimento das rotinas de programação seria iniciado a partir de um único resíduo (lodo), deixando os outros dois subprodutos (biogás e água de reúso) para serem analisados posteriormente. Uma planilha previamente construída foi utilizada, e então rotinas de programação foram aplicadas para promover a automatização dessa. A planilha possui um mapeamento dos diferentes arranjos de tecnologias que calculam de forma automática o resultado financeiro de suas combinações. Foi desenvolvida então uma ferramenta interativa de tomada de decisão, criando-se um layout interativo que apresenta os resultados ao usuário, uma navegação que

permite a visualização interna das combinações de tecnologias na forma de um fluxograma gerado automaticamente e a coleta de dados referentes às ETEs em um formulário do *Microsoft Excel (Excel Userform)*.

Na criação do formulário podem ser escolhidos diferentes elementos para compor a janela do formulário. Para essa ferramenta, foi escolhido um objeto “Multipáginas”, que consiste em três páginas dentro do formulário que coletam os dados referentes a: parâmetros gerais; tratamento aplicado; e tipo de lodo (Figura 5). Os valores obtidos nesses campos são preenchidos pelo usuário, armazenados em variáveis e mapeados para células na planilha (Figura 6). Na última página do formulário, o botão "Iniciar" faz uma chamada para uma função que modifica a planilha para a apresentação dos resultados ao usuário, conforme os dados fornecidos.

**Figura 5 - Formulário para inserção de dados na ferramenta em desenvolvimento**

Fonte: Autores (2022).

**Figura 6 - Células de destino do mapeamento, que alimentam o cálculo dos parâmetros envolvidos na reciclagem do lodo**

Parâmetros gerais		
População atendida	Habitantes	125000
Vazão de efluente tratado	m <sup>3</sup> /dia	70
Vazão de lodo produzido	m <sup>3</sup> /dia	25
Área disponível no terreno	m <sup>2</sup>	100
Comprimento da área disponível no terreno	m	10
Largura da área disponível no terreno	m	10
Lodo		
Tipo de lodo	Primário (inclui também lodos mistos em que há lodo primário em suas composições)	Primário bruto
Vazão do lodo descartado	m <sup>3</sup> /mês	300
Umidade do lodo	%	10
Taxa de remoção de lodo	dia	10
Agente de compostagem preferencial	Poda de árvore	
Informações gerais		
Tipo de tratamento aplicado ao esgoto	Lagoa de estabilização – facultativa Lagoa de estabilização – anaeróbia + facultativa Lagoa de estabilização – aerada facultativa Lagoa de estabilização – aerada de mistura completa + lagoa de decantação Lodos ativados convencional	
	Lodos ativados – aeração prolongada Filtro biológico de baixa carga Filtro biológico de alta carga Biodiscos Reator UASB Fossa séptica + filtro anaeróbio	
Tipo de lodo	Primário (inclui também lodos mistos em que há lodo primário em suas composições)	Primário bruto Misto bruto (primário + lodo ativado) Misto bruto (primário + filtro biológico) Misto bruto (primário + sais de ferro) Misto bruto (primário + sais de ferro + lodo ativado) Misto bruto (lodo ativado + filtro biológico)
	Secundário (Reator aeróbio com biomat ou lodos ativados convencional)	Filtro biológico bruto Lodo ativado convencional bruto Lodo ativado oxigênio puro bruto
	Secundário (Lodos ativados aeração prolongada)	Lodo aeróbio
	Secundário (Reator anaeróbio ou lagoa de estabilização)	Lodo de lagoa de estabilização Digerido (misto + lodo ativado)
	Digerido	Primário anaerobiamente digerido Misto anaerobiamente digerido (primário + lodo ativado) Lodo ativado anaerobiamente digerido Lodo ativado aerobiamente digerido

Fonte: Autores (2022).

A tabela dinâmica é atualizada automaticamente por uma função que copia os resultados obtidos na planilha para uma tabela separada conforme o tipo de lodo escolhido pelo usuário. Essa nova tabela gera gráficos dinâmicos e interativos apresentados para o usuário. Outros parâmetros poderão ser inseridos na planilha e, portanto, na ferramenta. Os gráficos dinâmicos gerados, por sua vez, são apresentados para o usuário em uma página inicial, abaixo do botão de abertura do formulário. Essa página inicial contém uma comparação entre os cenários mapeados na planilha, apresentando indicadores nas dimensões econômica, social e ambiental, ainda em construção. Portanto, caso interesse ao usuário visualizar quais tecnologias estão sendo combinadas em um cenário, botões no lado esquerdo da página mostram fluxogramas (1 para cada botão) que representam essa combinação.

## CONCLUSÃO

A construção de um caminho restaurativo e regenerativo para os recursos provenientes das estações de tratamento de esgoto exige mudanças de concepção de seus processos e aplicações. Entre os desafios, destaca-se o diálogo com os potenciais setores usuários, como o agrícola; os atores reguladores; o setor de pesquisa e inovação; e o setor de formação e capacitação de profissionais para atuarem neste ambiente de circularidade. A viabilidade econômica deste conjunto de estratégias depende de ações coordenadas, de governança nos territórios das bacias hidrográficas, e de implementação de mecanismos de internalização dos custos ambientais associados à ineficiência dos sistemas de esgotos. A partir dos resultados discutidos neste trabalho, reforçando que são parciais e de uma pesquisa ainda em desenvolvimento, tem-se as seguintes conclusões:

- Por meio da RSL, foi obtido o mapeamento de 32 estações de tratamento de esgoto com práticas de circularidade ao redor do mundo, obviamente uma parcela significativamente pequena em relação ao total de estações com práticas em andamento, mas, infelizmente, ainda há pouco disponibilizado em artigos e documentos acessíveis;
- Observou-se que há uma grande necessidade econômica, social e ambiental para geração e recuperação de subprodutos das ETEs, assim como um maior interesse da área científica e governamental para avaliar e estudar esses recursos aproveitáveis, seguindo os princípios da economia circular;
- Aplicações de estratégias circulares em ETEs foram reportadas de forma tímida nos últimos anos; a maior parte das aplicações refere-se a países europeus;
- As respostas obtidas por meio do formulário aplicado aos profissionais atuantes em ETEs inseridas no contexto das Bacias PCJ condizem com os dados já publicados de unidades como nos municípios de Jundiá e Nova Odessa, onde a compostagem do lodo e o reúso de água nas próprias estações já são consolidados. Os demais municípios trazem dados mais recentes, apontando que as tecnologias vêm se difundindo cada vez mais entre as cidades que compõem as Bacias PCJ;
- Ainda nas Bacias PCJ, observa-se pouca adesão de práticas de economia circular na região considerando as respostas obtidas, embora a taxa de resposta tenha sido baixa (ao todo, as Bacias PCJ são compostas por 76 municípios);
- A leitura dos artigos selecionados pela RSL e a investigação feita nas bacias PCJ permitiu a organização de um banco de dados acerca dos recursos recuperados, tecnologias e estudos inovadores a partir dos resíduos das ETEs em escala real e piloto;
- Os dados supracitados contribuirão para alimentar a plataforma cujo desenvolvimento computacional foi iniciado; essa será de significativa importância no que tange à tomada de decisão por parte de ETEs para a aplicação de estratégias circulares em seus sistemas;
- Levando em consideração o estado presente da ferramenta e o que foi implementado até então, essa continuará a ser desenvolvida para englobar novas funcionalidades, como a possibilidade de realizar as simulações também com os resíduos biogás e efluente tratado, além de ampliar os parâmetros considerados em seus campos econômicos, sociais e ambientais;

- A ferramenta possibilitará uma análise mais precisa para que os usuários da plataforma possam tomar decisões em direção à aplicação de práticas voltadas à economia circular nas Estações de Tratamento de Esgoto, contribuindo para a expansão progressiva desse tipo de estratégia.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Dow Brasil. Os autores agradecem também ao Comitê de Bacias PCJ e à Universidade de São Paulo (USP).

## REFERÊNCIAS

- Agência das Bacias PCJ & Comitês PCJ. (2021). Relatório de situação dos recursos hídricos 2021 (Ano base 2020)—UGRHI 05 – bacias hidrográficas dos rio piracicaba, Capivari e Jundiaí - versão simplificada. <https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/Relatorio-de-Situacao-dos-Recursos-Hidricos-nas-Bacias-PCJ-2021-Ano-Base-2020.pdf>
- Ammenberg, J., Anderberg, S., Lönnqvist, T., Grönkvist, S., & Sandberg, T. (2018). Biogas in the transport sector—Actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.010>
- Amorim Júnior, S. S. de, Pereira, M. A. de S., Lima, P. de M., Marishigue, M., Guilherme, D. de O., & Magalhães Filho, F. J. C. (2021). Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100245>
- Botelho, R. G., & Oliveira, C. da C. de. (2015). Literaturas branca e cinzenta: Uma revisão conceitual. *Ciência da Informação*, 44(3), Art. 3.
- Brasil. (2015). Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Probiogás, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (Org.).
- Brasil. (2020). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020: “Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências.”
- Bringhenti, J. R., Boscov, M. E. G., Piveli, R. P., & Günther, W. M. R. (2018). Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: Aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(5), Art. 5. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018124980>
- COMITÊS PCJ, C. D. B. H. D. R. P., Capivari E. Jundiaí Fundação Agência das Bacias PCJ Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari E. Jundiaí. (2020). Relatório Final—Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035.
- Czuba, K., Bastryk, A., Rogowska, A., Janiak, K., Pacyna, K., Kosińska, N., Kita, M., Chrobot, P., & Podstawczyk, D. (2021). Towards the circular economy—A pilot-scale membrane technology for the recovery of water and nutrients from secondary effluent. *Science of The Total Environment*, 791, 148266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148266>
- Deutz, P. (2020). Circular Economy. Em *International Encyclopedia of Human Geography* (p. 193–201). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10630-4>
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. (2020). Circular economy introduction. <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- EUROPEAN PARLIAMENT. (2022). Circular economy: Definition, importance and benefits. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>
- GOVERNO DO ESTADO de São Paulo. (2021). População do Estado. <http://www.ppa.sp.gov.br/Audiencias/Estado>

- IBGE, I. B. de G. e E. (2017). PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico—Tabelas. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?edicao=28244&t=resultados>
- IPCC, I. P. on C. C. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis—Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- López, A., Rodríguez-Chueca, J., Mosteo, R., Gómez, J., & Ormad, M. P. (2020). Microbiological quality of sewage sludge after digestion treatment: A pilot scale case of study. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120101>
- Mainardis, M., Ceconet, D., Moretti, A., Callegari, A., Goi, D., Freguia, S., & Capodaglio, A. G. (2022). Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. *Environmental Pollution*, 296, 118755. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118755>
- Moraes, T. N., Guilherme, D. O., Cavalheri, P. S., & Filho, F. J. C. M. (2022). Recovery of nutritional resources of urban sewage sludge in lettuce production. *Em Circular Economy and Sustainability* (p. 113–127). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00012-1>
- Neczaj, E., & Grosser, A. (2018). Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers. *EWaS3 2018*, 614. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110614>
- PROFILL - RHAMA. (2018). Primeira Revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2010 a 2020—RELATÓRIO FINAL- Revisão 05—Tomo I - Diagnóstico. [https://drive.google.com/file/d/1jSxP939Grb9qIzxlj\\_uu4tDMiqmzdSKU/view](https://drive.google.com/file/d/1jSxP939Grb9qIzxlj_uu4tDMiqmzdSKU/view)
- Santos, A. F., Vaz, T. E., Lopes, D. V., Cardoso, O., & Quina, M. J. (2021). Beneficial use of lime mud from kraft pulp industry for drying and microbiological decontamination of sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 296, 113255. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113255>
- Schauenberg, T., & Christofaro, B. (2022). Crise hídrica atinge a Europa. *DW - Made for minds*. <https://www.dw.com/pt-br/crise-h%C3%ADdrica-atinge-a-europa/a-62369850>
- Sharma, G. K., Khan, S. A., Shrivastava, M., Bhattacharyya, R., Sharma, A., Gupta, D. K., Kishore, P., & Gupta, N. (2021). Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Environmental Management*, 287, 112295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112295>
- Tassinari, G., Boccaletti, S., & Soregaroli, C. (2020). D8.8: Report on case study “The Bioeconomy Pilot from the Vanguard Initiative”. 29.
- Watson, M. (2020). Waste Management. *Em International Encyclopedia of Human Geography* (p. 225–231). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10761-9>

## APÊNDICES

### APÊNDICE A

#### Formulário

Título: Mapeamento de Práticas Circulares em Estações de Tratamento de Esgoto

#### 1. Texto de Apresentação

Prezado (a),

Você está sendo convidado (a) a contribuir no projeto “Estudo e Mapeamento de Práticas de Economia Circular em Estações de Tratamento de Esgoto das Bacias do PCJ”, em desenvolvimento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), financiado pelo Programa DOW CRIE da Dow Brasil, por meio da colaboração da Agência das Bacias PCJ e os Comitês PCJ (Piracicaba, Capivari e Jundiá).

A pesquisa possui o intuito de mapear os processos que estão sendo aplicados nas unidades das Estações de Tratamento de Esgoto, pertencentes às Bacias Hidrográficas do PCJ, a fim de identificar, dentre elas, quais aplicam alguma forma de reaproveitamento dos resíduos dos tratamentos (com ênfase em biogás, água de reúso, e lodo) dentro de uma perspectiva circular. Como objetivo secundário, almeja-se também identificar a destinação desses recursos.

O tempo médio de resposta é de 10 minutos. Ressaltamos que as informações fornecidas serão tratadas em caráter estatístico e científico, sob o regimento da Universidade.

Agradecemos sua valiosa contribuição!

Universidade de São Paulo (USP), São Carlos/SP  
Supervisão: Prof. Dr. Tadeu Malheiros  
Contato: usp.sustentabilidade@gmail.com

## 2. Termo de Consentimento

\* Aceito participar da pesquisa para a qual fui convidado(a), contribuindo com o preenchimento deste formulário, parte da pesquisa intitulada “Estudo e Mapeamento de Práticas de Economia Circular em Estações de Tratamento de Esgoto das Bacias do PCJ”, coordenado pelo Prof. Dr. Tadeu Malheiros do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP. Sei que minha participação é livre, não é obrigatória, podendo ser interrompida por minha decisão a qualquer momento, sem qualquer prejuízo.

## 3. Caracterização

- C1. Nome:  
C2. Município onde trabalha:  
C3. Contato(e-mail/tel):

## 4. Dados Técnicos da Atividade Profissional

- D1. Em qual Empresa/Operadora de Tratamento de Esgoto você trabalha?  
D2. Há quanto tempo trabalha na Operadora?  
D3. Em qual setor você trabalha?  
D4. Você trabalha em um setor que lida diretamente com o tratamento de esgoto?
- Sim
  - Não
  - Se sim, qual seu cargo?
- D5. Qual a capacidade da Estação de Tratamento de Esgoto?  
D6. Qual o tipo de processo empregado no tratamento de esgoto? (Você pode marcar mais de uma opção)
- Lagoa de estabilização – facultativa
  - Lagoa de estabilização – anaeróbia + facultativa
  - Lagoa de estabilização – aerada facultativa
  - Lagoa de estabilização – aerada de mistura completa + lagoa de decantação
  - Lodos ativados convencional
  - Lodos ativados – aeração prolongada
  - Filtro biológico de baixa carga
  - Filtro biológico de alta carga
  - Biodiscos
  - Reator UASB
  - Fossa séptica + filtro anaerobio
  - Outro (especifique): \_\_\_\_\_

## 5. Biogás

- B1. O referido tratamento gera biogás?
- Sim
  - Não
- B2. Você tem conhecimento sobre a destinação desse recurso?
- Queima simples (flares)
  - Queima para geração de energia na própria unidade
  - Armazenamento do biogás bruto e posterior transporte para utilização na indústria.
  - Outro (especifique): \_\_\_\_\_
- B3. No caso de armazenamento para utilização na indústria, qual o destino?  
B4. No caso de recuperação da energia na própria unidade, qual o processo de beneficiamento aplicado e qual a destinação da energia obtida?  
B5. Qual a quantidade de biogás produzido? (Especifique a unidade de volume, m<sup>3</sup> por exemplo, e a unidade de tempo).

## 6. Água de Reúso

- A1. Você tem conhecimento sobre a destinação do efluente secundário resultante do tratamento? (Se ele retorna ao corpo hídrico, ou possui alguma forma de reutilização dentro da própria unidade ou em outra instalação).
- Sim
  - Não
  - Se sim, qual a destinação?
- A2. Qual o destino do efluente secundário?

## 7. Lodo

- L1. Você tem conhecimento sobre a destinação do lodo?  
L2. Se sim, qual o destino?
- Uso agrícola
  - Aterro Sanitário
  - Incineração

**CIRCULAR ECONOMY IN SEWAGE TREATMENT STATIONS: MAPPING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE, RESEARCH IN THE CONTEXT OF PCJ BASINS AND A DECISION-MAKING TOOL**

SABRINA DE OLIVEIRA ANÍCIO, BRENDA FRANCISS CÔNDOR SALAZAR, JOÃO ALEXANDRO FERRAZ, LOUISE SILVEIRA, VINICIUS PEREZ DICTORO, TADEU FABRICIO MALHEIROS

- Outro: \_\_\_\_\_
- L3. O lodo gerado recebe algum tipo de tratamento antes de ser encaminhado ao destino final?
- Adensamento ou espessamento
  - Leitões de secagem
  - Lagoas de lodo
  - Filtro Prensa de Placas
  - Filtro Prensa de Esteiras
  - Centrífuga
  - Calagem
  - Compostagem
  - Outro(especifique): \_\_\_\_\_
- L4. Qual a quantidade de lodo produzido? (Especifique a unidade de massa ou volume, kg ou m<sup>3</sup>, por exemplo, e a unidade de tempo).

**8. Tecnologias e Atualidades**

- T1. Além dos processos de tratamento já implementados, a unidade em que você trabalha possui a flexibilidade de implementação de tecnologias de aprimoramento?
- T2. Há algum projeto em andamento para tornar a estação mais sustentável em seus processos? A unidade já recebeu ou recebe incentivos públicos/privados para que seja feito um melhor aproveitamento de seus efluentes?
- T3. Por fim, você sabe o que é economia circular e como ela poderia ser aplicada em estações de tratamento?

**9. Obrigado!**

Essa foi a última questão. Agradecemos pela sua paciência e colaboração.  
Se você tem alguma sugestão sobre o questionário, escreva-a aqui e a analisaremos.

**APÊNDICE B**

**Quadro 1: Classificação da RSL para circularidade de ETEs**

Ano de publicação do artigo	Título do artigo	Localidade da ETE	Porte, vazão tratada ou população atendida	Recurso recuperado	Destino do subproduto	Outras observações
2018	Governing Transactions and Interdependences between Linked Value Chains in a Circular Economy: The Case of Wastewater Reuse in Braunschweig (Germany)	Alemanha	-	Biogás a partir do lodo de esgoto	Bioenergia - Produção de eletricidade que pode ser utilizada dentro da ETE ou externamente.	Na Alemanha, a reutilização de esgoto e água é regulamentada, entre as principais instituições, pela Diretiva-Quadro Água e pela Diretiva de Águas Residuais Urbanas.
				Águas residuárias tratadas	Reúso agrícola.	
				Lodo de esgoto	O lodo é adicionado ao efluente usado para irrigar a vegetação. No inverno é secado e armazenado.	
2020	Recovery of nutritional resources of urban sewage sludge in lettuce production	Brasil	900 L/s	Lodo de esgoto	Aplicação na produção de alface.	Os padrões por risco de contaminação são descritos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Já a Resolução CONAMA nº 498/2020 amplia as oportunidades de aproveitamento de biossólidos no Brasil.
2021	Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils	Brasil	-	Lodo de esgoto	Aplicação de biossólidos em cinco áreas diferentes, de 2012 a 2018.	Os critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos em solos seguem as normas e valores referenciais da CONAMA nº 498/2020 e dos países da União Europeia. O estudo indica que o

**CIRCULAR ECONOMY IN SEWAGE TREATMENT STATIONS: MAPPING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE, RESEARCH IN THE CONTEXT OF PCJ BASINS AND A DECISION-MAKING TOOL**

SABRINA DE OLIVEIRA ANÍCIO, BRENDA FRANCISS CÔNDOR SALAZAR, JOÃO ALEXANDRO FERRAZ, LOUISE SILVEIRA, VINICIUS PEREZ DICTORO, TADEU FABRICIO MALHEIROS

Ano de publicação do artigo	Título do artigo	Localidade da ETE	Porte, vazão tratada ou população atendida	Recurso recuperado	Destino do subproduto	Outras observações
						uso de biossólidos melhora as propriedades químicas de solos tropicais.
2018	FISH analysis of microbial communities in a full-scale technology for biogas production	Bulgária	-	Biogás	-	No estudo de caso foram analisados três digestores em escala real.
2021	Pilot-scale phycoremediation using <i>Muriellopsis</i> sp. for wastewater reclamation in the Atacama Desert: Microalgae biomass production and pigment recovery	Chile	-	Águas residuárias tratadas	Irrigação.	As análises de água foram baseadas nos parâmetros estabelecidos na regulamentação chilena para o uso de água de irrigação (NCh. 1333).
2018	Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant	China	2315 L/s	Lodo de biofilme de esgoto	Disposição em aterro sanitário.	Estação de Lucun foi a primeira ETE municipal na China a instalar a tecnologia MBBR, em 2008. O lixiviado de aterro geralmente se torna um lixiviado maduro após cerca de 10 anos de operação.
2021	Phycoremediation of municipal wastewater: Removal of nutrients and contaminants of emerging concern	Eslovênia	-	Águas residuárias tratadas	-	Segundo o estudo, a valorização da biomassa e das águas residuais recuperadas está alinhada com os princípios do Plano de Ação da Economia Circular da União Europeia.
2019	Reusing treated waste-water from a circular economy perspective-The case of the Real Acequia de Moncada in Valencia (Spain)	Espanha	347 L/s	Águas residuárias tratadas	Reutilização de águas residuais no sistema de irrigação	A reutilização de águas residuais na Espanha para fins agrícolas é regulamentada pelo Decreto Real Espanhol 1/2001.
2020	Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions	Espanha	58 - 69 L/s	Águas residuárias tratadas	Fertilizante em campos de agricultura.	Segundo a União Europeia, o fósforo é reconhecido como um recurso crítico e há incentivos para sua recuperação em fontes locais.
2020	Microbiological quality of sewage sludge after digestion treatment: A pilot scale case of study	Espanha	-	Lodo de esgoto	Fins agrícolas.	Diretiva Lodos de Esgoto (86/278/CEE) regulamenta a utilização de lamas de depuração na agricultura.
2020	Modeling the anaerobic treatment of sulfate-rich	Espanha	-	Biogás	-	-

**CIRCULAR ECONOMY IN SEWAGE TREATMENT STATIONS: MAPPING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE, RESEARCH IN THE CONTEXT OF PCJ BASINS AND A DECISION-MAKING TOOL**

SABRINA DE OLIVEIRA ANÍCIO, BRENDA FRANCIS CÔNDOR SALAZAR, JOÃO ALEXANDRO FERRAZ, LOUISE SILVEIRA, VINICIUS PEREZ DICTORO, TADEU FABRICIO MALHEIROS

Ano de publicação do artigo	Título do artigo	Localidade da ETE	Porte, vazão tratada ou população atendida	Recurso recuperado	Destino do subproduto	Outras observações
	urban wastewater: Application to AnMBR technology					
2021	Water Reuse Study from Urban WWTPs via c-Ultrafiltration and Ozonation Technologies: Basis for Resilient Cities and Agriculture	Espanha	-	Águas residuárias tratadas	Reutilização das águas urbanas na agricultura.	O estudo em questão cita o regulamento sobre os requisitos mínimos que a água de reúso deve atender segundo os valores da União Europeia 2020/741.
2018	RAVITA Technology - new innovation for combined phosphorus and nitrogen recovery	Finlândia	-	Lodo de esgoto	Separação de sais metálicos e fósforo.	A autoridade de Serviços Ambientais da Região de Helsinque desenvolveu os primeiros testes RAVITA (escala laboratorial).
2021	An advanced process for thermal treatment of municipal sewage sludge	Finlândia	-	Lodo de esgoto	Uso agrícola.	A legislação de Finlândia proíbe a aplicação de lodo não tratado para fins agrícolas.
2020	Renewable energy recovery from sewage sludge derived from chemically enhanced precipitation	Grécia	-	Lodo de esgoto	Fertilizante na agricultura.	-
2021	Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production	Índia	-	Lodo de esgoto	-	-
2021	A water-waste-energy nexus approach to bridge the sustainability gap in landfill-based waste management regions	Itália	545.000 habitantes	Biogás	-	-
2021	Air side-stream ammonia stripping in a thin film evaporator coupled to high-solid anaerobic digestion of sewage sludge: Process performance and interactions	Itália	-	-	-	Trabalho foi apoiado pela União Europeia através do Programa de Pesquisa e Inovação Horizonte - 2020. 120 kt/ano de lodo de esgoto desidratado coletado de várias ETEs.
2021	Strong minimization of biological sludge production and enhancement of phosphorus bioavailability with a thermophilic biological fluidized bed reactor	Itália	130.000 habitantes	Lodo de esgoto	Uso agrícola.	A legislação da região de Lombardia é uma das mais rigorosas para o reaproveitamento de lodo de esgoto biológico no contexto europeu.
2021	Water Resource Recovery Facilities (WRRFs): The Case Study of Palermo University (Italy)	Itália	-	Águas residuárias tratadas	Irrigação.	O estudo em questão foi desenvolvido em escala piloto em ETE localizada dentro da Universidade de Palermo.
				Lodo de esgoto	-	

**CIRCULAR ECONOMY IN SEWAGE TREATMENT STATIONS: MAPPING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE, RESEARCH IN THE CONTEXT OF PCJ BASINS AND A DECISION-MAKING TOOL**

SABRINA DE OLIVEIRA ANÍCIO, BRENDA FRANCISS CÔNDOR SALAZAR, JOÃO ALEXANDRO FERRAZ, LOUISE SILVEIRA, VINICIUS PEREZ DICTORO, TADEU FABRICIO MALHEIROS

<b>Ano de publicação do artigo</b>	<b>Título do artigo</b>	<b>Localidade da ETE</b>	<b>Porte, vazão tratada ou população atendida</b>	<b>Recurso recuperado</b>	<b>Destino do subproduto</b>	<b>Outras observações</b>
2019	Bacterial conversion of waste into polyhydroxybutyrate (PHB): A new approach of bio-circular economy for treating waste and energy generation	Japão	-	-	O lodo é desidratado e enviado para aterro ou incinerado.	Redução de lodo usando microrganismos.
2018	Phosphorus removal by an 'active' slag filter—a decade of full scale experience	Nova Zelândia	6.000 habitantes	Águas residuárias tratadas	Uso local da água.	-
2019	A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco-efficiency assessment	Países baixos	Grande	Lodo de esgoto	-	-
2021	The Efficiency of the Biogas Plant Operation Depending on the Substrate Used	Polônia	-	Biogás	Geração de eletricidade para redução dos custos operacionais da ETE.	Avaliação técnica e de eficiência de uma estação de biogás numa ETE.
2021	Towards the circular economy — A pilot-scale membrane technology for the recovery of water and nutrients from secondary effluent	Polônia	1620 L/s	Águas residuárias tratadas	Alternativas de uso: na própria ETE, irrigação, recarga artificial de águas subterrâneas, indústria.	O projeto foi desenvolvido em escala piloto.
2020	Innovative artificial neural network approach for integrated biogas - wastewater treatment system modelling: Effect of plant operating parameters on process intensification	Polônia	-	Biogás	-	O estudo em questão desenvolve modelos de integração, previsão e otimização de uma planta de biogás em uma infraestrutura de tratamento de águas residuais, assim como uma modelagem numérica usando redes neurais artificiais (RNAs).
				Águas residuárias tratadas	-	
2020	Variability in the composition of extracellular polymeric substances from a full-scale aerobic granular sludge reactor treating urban wastewater	Portugal	637 - 694 L/s	Lodo	-	O projeto foi desenvolvido em escala piloto.
2021	Beneficial use of lime mud from kraft pulp industry for drying and microbiological decontamination of sewage sludge	Portugal	140.000 habitantes	Lodo	Adjuvantes de secagem (diminuição no tempo de secagem) e agentes de sanitização.	A Diretiva 86/278/EEC, implementada há mais de 30 anos, busca incentivar o uso de lodo de esgoto na agricultura.
2021	Biodegradable Waste Treatment: Sewage Sludge Composting - A Case Study	Romênia	-	Lodo	-	-

**CIRCULAR ECONOMY IN SEWAGE TREATMENT STATIONS: MAPPING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE, RESEARCH IN THE CONTEXT OF PCJ BASINS AND A DECISION-MAKING TOOL**

SABRINA DE OLIVEIRA ANÍCIO, BRENDA FRANCISS CÔNDOR SALAZAR, JOÃO ALEXANDRO FERRAZ, LOUISE SILVEIRA, VINICIUS PEREZ DICTORO, TADEU FABRICIO MALHEIROS

<b>Ano de publicação do artigo</b>	<b>Título do artigo</b>	<b>Localidade da ETE</b>	<b>Porte, vazão tratada ou população atendida</b>	<b>Recurso recuperado</b>	<b>Destino do subproduto</b>	<b>Outras observações</b>
2018	Biogas in the transport sector-actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region	Suécia	932.000 habitantes	Biogás	Uso do biogás como gás veicular	A aquisição de biogás produzido em ETEs para transporte público faz parte de um dos objetivos da Suécia para uma frota de veículos “independente de fósseis” até 2030.
2021	Microalgal growth, nitrogen uptake and storage, and dissolved oxygen production in a polyculture based-open pond fed with municipal wastewater in northern Sweden	Suécia	-	Águas residuárias tratadas	Captção e armazenamento de nitrogênio.	Analisa os fatores que afetam a produção de biomassa de microalgas com um modelo matemático.
2019	A Case Study on the Electricity Generation Using a Micro Gas Turbine Fuelled by Biogas from a Sewage Treatment Plant	Taiwan	15.278 L/s	Biogás Águas residuárias tratadas	Uso interno para a operação da estação.	-