

Pirólise de lodo de esgoto: uma revisão sistemática

Sewage sludge pyrolysis: a systematic review

- **Data de entrada:**
10/09/2023
- **Data de aprovação:**
27/10/2023

Filipe Baião Vieira^{1*} | Guido Vaz Silva¹ | Rodolfo Cardoso¹ | Carlos Frederico de Oliveira Barros¹ | Marco Antônio Franco Portella Lemos¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.056>

ORCID ID

Vieira FB  <https://orcid.org/0009-0007-7144-5540>
Silva GV  <https://orcid.org/0000-0002-9009-1027>

Cardoso R  <https://orcid.org/0000-0002-4411-2413>
Barros CFO  <https://orcid.org/0000-0002-5910-9524>
Lemos MAFP  <https://orcid.org/0009-0002-5653-707X>

Resumo

Com o aumento do número de estações de tratamento de esgoto, os métodos tradicionais de destinação do lodo (resíduo gerado no processo), como incineração, espalhamento em terras agrícolas e aterros sanitários, oferecem sérios riscos ambientais. O descarte ou a utilização do lodo são um problema devido ao grande volume produzido e ao teor de patógenos e metais pesados que podem estar contidos nesse resíduo, a depender das características do efluente e do tratamento adotado. Alternativas como digestão anaeróbia, gaseificação e pirólise vêm sendo estudadas para avaliação do seu potencial, porém referências teóricas transversais e estruturadas ainda não foram encontradas. Neste artigo foi realizada uma revisão sistemática da literatura que apresenta o estado da arte da aplicação da pirólise com o lodo de esgoto, com foco na comparação com outras tecnologias. O resultado do estudo mostra que a pirólise tem grande potencial como alternativa sustentável para destinação e valorização do lodo.

Palavras-chave: Pirólise. Lodo de esgoto. Revisão sistemática.

Abstract

With the increase in the number of wastewater treatment plants, traditional methods to dispose of sludge (a residue generated in the process), such as incineration, agricultural land spread, and landfills, pose serious environmental risks. The disposal or use of sludge offers a problem due to its large volume and the content of pathogens and heavy metals it may contain depending on the characteristics of the effluent and the adopted treatment. Alternatives such as anaerobic digestion, gasification, and pyrolysis have been studied to assess their potential but they still lack comprehensive and structured theoretical references. This study conducted a systematic literature review, describing the quality of applying pyrolysis to sewage sludge and focusing on a comparison with other technologies. Results show that pyrolysis holds great potential as a sustainable alternative for sludge disposal and valorization.

Keywords: Pyrolysis. Sewage sludge. Systematic review.

¹ Universidade Federal Fluminense – Rio das Ostras – RJ – Brasil

* **Autor correspondente:** fbaiao@id.uff.br

1 INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é um subproduto proveniente do processo de tratamento de esgoto, e espera-se que o volume gerado seja cada vez maior nos próximos anos devido ao aumento populacional, à construção de novas Estações de Tratamento Esgoto (ETE) (principalmente nos países em desenvolvimento) e aos requisitos cada vez mais rigorosos de descarte de efluentes nos corpos receptores. Segundo Gao *et al.* (2020), a quantidade de lodo de esgoto gerada nos Estados Unidos já ultrapassa 60 milhões de toneladas por ano, mais de 30 milhões de toneladas/ano na China e quase 20 milhões de toneladas/ano em países como Alemanha, Japão, Holanda e Inglaterra. No Brasil, a estimativa é de 10 milhões de toneladas por ano (IBGE, 2017).

De uma forma geral, as ETE visam remover a matéria orgânica e desinfetar o esgoto por meio de processos físicos, químicos e/ou biológicos, antes do efluente ser descartado na bacia hidrográfica. O aumento do número de ETE é primordial para garantir a qualidade dos recursos hídricos e a saúde humana, no entanto, com as estações em operação, surge um novo problema ambiental grave: a disposição final do lodo de esgoto (resíduo gerado no processo). O descarte adequado desse resíduo consiste em uma das etapas mais problemáticas de uma ETE, podendo representar até 60% do custo operacional (Hirata *et al.*, 2015; Miki; Andrigueti; Sobrinho, 2001).

Oladejo *et al.* (2019) explicam que, devido ao seu alto conteúdo orgânico volátil, o lodo de esgoto apresenta poder calorífico comparável à lenha e às várias outras amostras de biomassa. Tal poder é um dos principais determinantes da adequação do lodo como combustível na geração de energia, bem como da necessidade de eliminação do alto teor de matéria orgânica antes do descarte. A recuperação de energia é vista por diversos autores como o método mais atrativo de destinação do lodo, eliminando a matéria orgânica volátil, reduzindo

o volume de resíduos e possibilitando o aproveitamento de nutrientes e/ou metais.

A pirólise é uma das possíveis formas de recuperação de energia com lodo sanitário e consiste em um processo termoquímico que decompõe essa matéria orgânica em um ambiente inerte. O processo de pirólise pode gerar três subprodutos: (I) um produto de vapor condensável, chamado bio-óleo, que pode ser utilizado como combustível ou refinado para produtos químicos especiais; (II) um produto gasoso não condensável, útil para gerar energia elétrica ou calor, que geralmente é fornecido para a própria planta de pirólise, e que, apesar de carecer de um aprofundamento semântico, neste relatório será denominado singás; e (III) um produto sólido carbonizado denominado *bio-char*, com várias aplicações possíveis – corretivo de solo, adsorvente e combustível neutro em carbono. O rendimento e as características de cada subproduto dependem da composição da matéria de entrada e as condições do processo, principalmente em relação à temperatura máxima, tempo de residência, taxa de aquecimento, modo de alimentação e propriedades do lodo (Kim; Parker, 2008; Oliveira; Fuji; Bevilacqua, 2021).

A pirólise é considerada uma tecnologia sustentável que resolve diversos problemas de destinação do lodo nos aspectos sociais, econômicos e ambientais, porém, sua utilização não está bem estabelecida e requer mais estudos sobre pré-tratamentos, otimização das condições de operação, estabilização de metais pesados, aplicação dos subprodutos, modelos de avaliação, entre outros assuntos (Oladejo *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2022).

Para a pirólise se tornar uma realidade no tratamento de lodo de esgoto no Brasil e no mundo, precisa superar alguns desafios, tanto operacionais quanto de gestão. Singh *et al.* (2020) alertam que ainda há a necessidade de reduzir a produção líquida de CO₂ no processo e encontrar utilidade

prática dos subprodutos em escala comercial, levando à gestão sustentável de todos os resíduos da biomassa. Para os autores, um estudo aprofundado sobre análise de custos, segurança e modelos de negócio relevantes ajudaria os formuladores de políticas e as empresas a considerarem a pirólise como uma alternativa viável.

Diante desse contexto, esta pesquisa, por meio de uma revisão sistemática da literatura, objetivou discutir a utilização da pirólise como alternativa para destinação/valoração do lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto. A pesquisa explorou, principalmente, os benefícios e as limitações do emprego dessa tecnologia em relação a outros métodos de tratamento adotados.

2 MÉTODO PARA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura (RSL) e a descoberta do estado da arte de determinado assunto

são fundamentais em qualquer projeto de pesquisa, visto que novos conhecimentos se desenvolvem a partir dos já existentes. Diversos autores apontam que o entendimento da literatura existente deve ser o primeiro passo na condução de um trabalho científico (Tranfield *et al.*, 2003; Pan *et al.*, 2013; Thomé *et al.*, 2016, Cauchick, 2019).

A forma de condução de uma RSL é muitas vezes tratada como uma tarefa simples e de fácil realização, porém, a falta de empenho e método nessa atividade impacta significativamente na qualidade dos resultados. Neste caso, a qualidade consiste em termos de abrangência, profundidade, rigor, consistência, clareza, análise e síntese do que já foi produzido sobre o assunto (Cauchick, 2019).

O método de pesquisa adotado na RSL foi elaborado com base nos estudos de Tranfield *et al.* (2003), Pan *et al.* (2013), Thomé *et al.* (2016) e Cauchick (2019). O quadro 1 explicita o método de pesquisa e o método de condução do trabalho.

Quadro 1 – Métodos de Pesquisa e Trabalho adotados.

Método de Pesquisa	Método de Trabalho
Etapa 1 – Planejamento da Revisão Seleção do tema; localização e leitura da literatura para visão geral; definição do escopo da revisão, definição das questões de pesquisa.	Base de Dados: Scopus e Web of Science (WOS); String de Busca (WOS): TITLE-ABS-KEY (sewage sludge AND pyrolysis AND (valuation OR assessment OR impact); String de Busca (Scopus): TITLE-ABS-KEY (pyrolysis OR biochar OR bio-char) AND sewage sludge AND (environment OR environmental OR social) AND (evaluation OR impact OR assessment) Leitura de 641 resumos.
Etapa 2 – Condução da Revisão Identificação e seleção do material; análise da qualidade das publicações, extração dos dados, análise e interpretação.	1) Seleção e leitura completa de 87 artigos; 2) Definição dos temas abordados; 3) Seleção dos 32 artigos mais relevantes.
Etapa 3 – Disseminação dos Resultados Organização e seleção da informação a ser apresentada; estruturação da apresentação do relatório.	1) Relatórios técnicos; 2) Publicação de artigos; 3) Apresentação às partes interessadas.

Foram utilizadas as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. As palavras-chave utilizadas na base *Web of Science* foram aplicadas nas buscas da seguinte forma: *sewage sludge AND pyrolysis AND (valuation OR assessment OR impact)*. Para diversificar o caminho de pesquisa e ampliar a possibilidade de novos resultados, as buscas na base *Scopus* receberam algumas alterações nos termos, sendo realizada da forma que se apresenta: *(pyrolysis OR biochar OR bio-char) AND sewage sludge AND (environment OR environmental OR social) AND (evaluation OR impact OR assessment)*. Ambas as buscas abrangeram os campos título, resumo e palavras-chave.

Essa aplicação resultou em uma resposta de 641 artigos. Sobre esse conjunto, foram feitas análises bibliométricas, utilizando a ferramenta computacional *VOSviewer*, para desenvolvimento de conhecimento – ainda panorâmico – sobre características importantes e temas relevantes da amostra de artigos encontrada.

A fim de sintetizar o resultado para favorecer uma investigação aprofundada, foram lidos os títulos e resumos destes 641 artigos. Neles, foram encon-

trados diversos grupos com temas e abordagens semelhantes e, assim, foram selecionados 87, que se mostraram mais pertinentes e relevantes para a leitura analítica (Adler; Doren, 2010).

Em seguida, procedeu-se a leitura analítica dos 87 artigos e, por critério de relevância, abrangência e adequação ao objetivo do presente estudo, 32 serviram como material de trabalho para a continuidade da pesquisa.

3 DISCUSSÃO E RESULTADOS

3.1 Análise bibliométrica sobre amostra inicial

Ao todo, foram encontrados 641 artigos; destes, 298 (46,5%) têm origem na China e 55 (8,6%) nos Estados Unidos, sendo os países que mais publicaram materiais a respeito do tema. O Brasil aparece na oitava posição, com 31 (4,8%) artigos publicados. Entre os autores que aparecem com mais publicações a partir do filtro utilizado, estão: Wang, Y., com 16 artigos; Wang, H. com 14 artigos; e Ok, Y. S. e Li, J., com 13 artigos publicados cada. Também foram selecionados os dez principais periódicos internacionais que publicam sobre o assunto, como mostra a figura 1.

JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS	52 Artigos
FUEL	32 Artigos
WASTE MANAGEMENT	35 Artigos
BIOSOURCE TECHNOLOGY	33 Artigos
ENERGY FUELS	24 Artigos
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	16 Artigos
CHEMOSPHERE	15 Artigos
ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	13 Artigos
ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH	12 Artigos
ADVANCED MATERIALS RESEARCH	11 Artigos

Figura 1 – Periódicos internacionais que mais publicam sobre pirólise de lodo de esgoto.

A variedade de revistas encontradas mostra a interdisciplinaridade do assunto. A pirólise do lodo de esgoto apresenta grande potencial na geração de energia, de combustível líquido e de fertilizante para o solo, também sendo uma forma de destinação adequada e economicamente atra- tiva do lodo no meio ambiente.

Foi desenvolvido um mapa de palavras-chave no software VOSviewer, de acordo com a frequência de aparição dos termos e a forma como eles se associam, apresentado na figura 2. Tal método facilita a visualização das palavras mais utili- zadas, mostra como os assuntos se relacionam e a direção dos principais esforços dos pesquisadores.

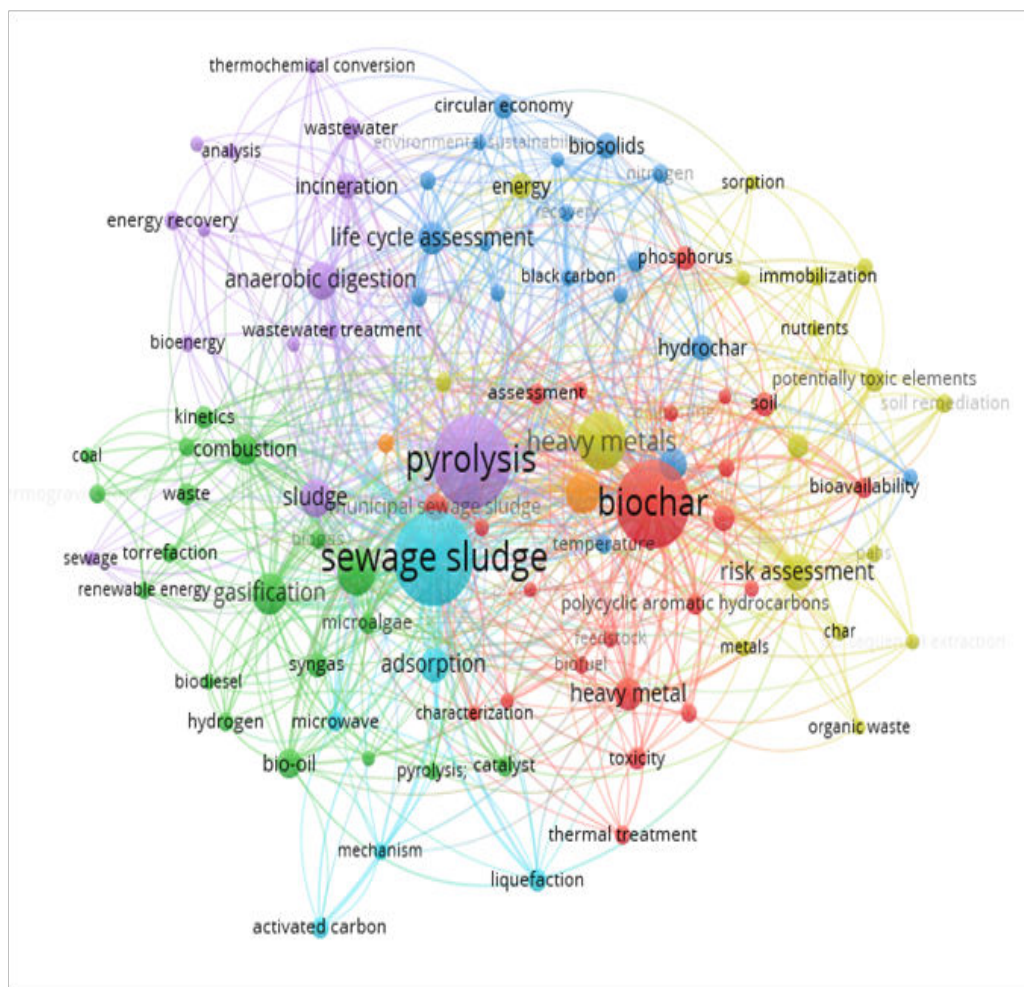


Figura 2 – Mapa de palavras-chaves e suas interações com a mescla das buscas via bases Scopus e WOS.

No mapa, é possível perceber a expressiva quan- tidade de artigos relacionados ao *biochar*, um dos subprodutos da pirólise. Apesar do termo não ter sido utilizado nos filtros de busca, a quantidade de vezes em que aparece se assemelha aos termos principais “*sewage sludge*” e “*pyrolysis*” e

supera significativamente os termos “*valuation*”, “*assessment*” e “*impact*”. Tal resultado mostra como os esforços dos pesquisadores estão mais voltados para o estudo sobre a produção, o apro- veitamento e a composição do *biochar*, do que para assuntos relacionados ao bio-óleo, singás

ou modelos de avaliação de impacto. Além disso, o termo “*heavy metals*”, também encontrado com frequência, está totalmente associado à composição química do *biochar*.

Além disso, o mapa evidencia alguns grupos de trabalho importantes relacionados à pirólise. Na parte superior, de tom azulado, estão pesquisas que abordam o tema pelo foco ambiental e social, com artigos sobre economia circular, avaliação do ciclo de vida, geração de energia limpa, alerta para práticas poluentes, entre outros temas que trazem a pirólise como instrumento no combate às mudanças climáticas. No canto direto, de tom alaranjado, encontram-se estudos de química sobre a composição do lodo, as reações dos elementos no reator de pirólise, a estabilização de metais pesados e sua biodisponibilidade, e mais. No canto esquerdo, esverdeado, nota-se a comparação entre dife-

rentes tecnologias de destinação e a geração de seus subprodutos.

3.2. Pirólise para tratamento de lodo de esgoto

A partir da leitura dos resumos e, posteriormente, dos artigos selecionados, foi possível perceber quais são as principais questões relacionadas à pirólise de lodo de esgoto, e os 32 artigos finais foram, então, agrupados de acordo com os seus temas específicos, se organizando em quatro categorias principais: 1) Avaliações ambientais, econômicas e sociais; 2) Comparação entre tecnologias de destinação do lodo; 3) Experimentos operacionais com pirólise; e 4) Análise dos subprodutos gerados no processo.

O quadro 2 mostra o agrupamento criado com os artigos selecionados. Nota-se que os artigos comumente abordam diversos temas relacionados à pirólise em uma mesma publicação, por isso aparecem em mais de uma categoria.

Quadro 2 – Agrupamento de artigos por tema de abordagem.

Grupos	Descrição	Artigos
Comparação entre tecnologias para destinação do lodo de esgoto	Avaliação das vantagens e desvantagens da pirólise em comparação a outras tecnologias de destinação e/ou valoração do lodo de esgoto.	Gao <i>et al.</i> (2020); Gil-Lalaguna <i>et al.</i> (2014); Cao e Pawlowski (2013); Mills <i>et al.</i> (2014); Oladejo <i>et al.</i> (2019); Raheem <i>et al.</i> (2018); Samolada e Zabaniotou (2014); Zhou <i>et al.</i> (2017).
Experimentos operacionais com pirólise de lodo de esgoto	Conclusões que tenham sido obtidas por meio de testes reais realizados em reator de pirólise com lodo de esgoto.	Barry <i>et al.</i> (2019); Ding e Jiang (2013); Folgueras, Alonzo e Días (2013); Freddo, Caib e Reid (2012); Kim e Parker (2008); Jin <i>et al.</i> (2016); Gao <i>et al.</i> (2020); Kwon <i>et al.</i> (2018); Udayanga <i>et al.</i> (2019); Shahbeig e Nosrati (2020); Li <i>et al.</i> (2021)
Análise dos subprodutos da pirólise de lodo de esgoto	Análises das propriedades e da utilização de um dos três subprodutos gerados na pirólise: <i>biochar</i> , <i>bio-óleo</i> e <i>singás</i> .	Barry <i>et al.</i> (2019); Gao <i>et al.</i> (2020); Freddo, Caib e Reid (2012); Jin <i>et al.</i> (2016); Gievers, Loewen e Nelles (2013); Kim e Parker (2008); Li <i>et al.</i> (2021); Wang <i>et al.</i> (2021); Jin <i>et al.</i> (2016); Singh <i>et al.</i> (2020).
Avaliações ambientais, econômicas e sociais da pirólise de lodo de esgoto	Avaliações de impactos ambientais, econômicos e sociais realizados com planta de pirólise de lodo de esgoto.	Huang, Mohamed e Lia (2022); Cao e Pawlowski (2013); Gievers, Loewen e Nelles (2013); Luo <i>et al.</i> (2021); Barry <i>et al.</i> (2019); Gao <i>et al.</i> (2020); Luo <i>et al.</i> (2021); Mills <i>et al.</i> (2014); Xin <i>et al.</i> (2018); Mainardis <i>et al.</i> (2021); Par, Ito e Suzuki (1984); Gil-Lalaguna <i>et al.</i> (2014); Shahbeig e Nosrati (2020); Xin <i>et al.</i> (2018); Mills <i>et al.</i> (2014); Zhou <i>et al.</i> (2017); Huang, Mohamed e Lia (2022); Li <i>et al.</i> (2021); Jin <i>et al.</i> (2016); Luo <i>et al.</i> (2021); Wang <i>et al.</i> (2021); Yuan, <i>et al.</i> (2015).

A busca exploratória evidenciou as fronteiras das pesquisas recentes sobre pirólise e forneceu a base para a realização de buscas mais específicas.

Entre o grupo de artigos sobre experimentos operacionais, destacam-se os testes de co-pirólise, que analisam os resultados de diferentes produtos utilizados como aditivos ao lodo de esgoto no reator; a influência das variáveis do processo (temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, pressão, etc.) no rendimento dos subprodutos; e a influência da composição do lodo (umidade, metais pesados, constituintes orgânicos, etc.) nas características dos subprodutos e/ou na avaliação de riscos ambientais.

Em relação à aplicação dos subprodutos, a ênfase dos artigos se dá, principalmente, na utilização do *biochar*. Como componente agrícola, o *biochar* do lodo de esgoto tem alta estabilidade e intensifica a suplementação de nutrientes (P e N) e matéria orgânica, aumenta a capacidade de troca catiônica, tem capacidade de correção da acidez do solo e diminui a perda de nutrientes por lixiviação (Laird *et al.*, 2010). Dependendo de sua área superficial, polaridade e porosidade, também pode ser utilizado como adsorvente para remoção de contaminantes antibióticos de águas residuais, sendo capaz de absorver diferentes antibióticos de variados ecossistemas (Yao *et al.*, 2013). Ainda como adsorvente, Zhou *et al.* (2017) relatam que o *biochar* do lodo de esgoto é mais eficaz do que o carvão ativado na adsorção de metais pesados (Cd, Cu, Zn e Pb), devido ao seu alto teor de grupo ácido. Além disso, outros estudos realizados por autores como Mu'azu *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2015) trazem o poder de adsorção do *biochar* em corantes têxteis e compostos fenólicos A.

A revisão sobre modelos de avaliação foi feita em torno dos três pilares da sustentabilidade, e, assim, foram analisados, separadamente, os temas de avaliação social, ambiental e econômica. O tema da avaliação social sobre plantas de pirólise de lodo de esgoto é bem pouco explorado na literatura. Nas buscas realizadas, foi possível encontrar inclinações de aspectos sociais, como em Shahbeig e Nosrati (2020) e Zhou *et al.* (2020), mas nenhuma metodologia contundente ou ferramenta computacional

de apoio. Em relação à avaliação ambiental, o principal método encontrado foi a análise do ciclo de vida (ACV), com utilização de diversos indicadores, como emissão líquida de carbono e energia consumida em cada fase, como visto em Cao e Pawlowski (2013), Gievers, Loewen e Nelles (2021), Luo *et al.* (2021), entre outros. Apesar do trabalho ter foco na literatura internacional, neste caso vale destacar a revisão crítica de ACV para lodo de esgoto, realizada no Brasil por Lopes *et al.* (2017). Na avaliação ambiental também foram encontrados testes para estipular a quantidade de metais pesados no *biochar* e sua biodisponibilidade, encontrados em Li *et al.* (2021), Wangz *et al.* (2021), Yuanz *et al.* (2015) e Gao *et al.* (2017). O grupo de avaliação econômica aborda o custo de instalação e manutenção da planta, com a utilização, principalmente, de ferramentas como fluxo de caixa, VPL e TIR. Os resultados alertam para o alto consumo de energia na secagem inicial do lodo e da importância da utilização dos subprodutos, determinante para equilibrar o balanço energético do processo e seu resultado financeiro (Barry *et al.* 2019; Luo *et al.*, 2021; Shahbeig; Nosrati, 2020; Xin *et al.*, 2018; Mills *et al.*, 2014).

Nesta revisão, foram explorados, com mais profundidade, os artigos que realizaram comparações entre diferentes tecnologias que podem ser utilizadas para destinação do lodo de esgoto, como exibido no tópico seguinte.

3.3 Comparação entre tecnologias para destinação do lodo de esgoto

Diversos autores avaliam as vantagens e desvantagens da pirólise em comparação a outras tecnologias de destinação e/ou valoração do lodo de esgoto. Em geral, a pirólise se destaca como um dos métodos mais eficientes do ponto de vista econômico e ambiental.

Gao *et al.* (2020) fizeram uma revisão crítica aprofundada sobre os principais métodos de conversão termoquímica do lodo de esgoto: combustão, pirólise e gaseificação. Em termos ambientais, os autores afirmam que as emissões de poluentes são consideravelmente menores para a pirólise, enquanto a combustão e incineração produzem mais poluentes nos gases e cinzas, resultando em danos ambientais

e custos de manutenção elevados. O artigo ainda destaca a capacidade da pirólise em reduzir o volume de lodo e não produzir resíduo descartável e frisa a importância do uso de catalisadores e aditivos para melhorar a qualidade dos subprodutos. Os autores apresentam as formas de destinação do lodo mais utilizadas em alguns países, sendo possível perceber

que o despejo inapropriado, os aterros sanitários e a incineração são os destinos mais comuns, o que reforça a necessidade de pesquisas em alternativas menos impactantes.

Oladejo *et al.* (2019) também realizaram uma vasta revisão sobre os métodos de destinação do lodo, como apresentado o quadro 3.

Quadro 3 – Benefícios e limitações dos métodos de tratamento de lodo.

Método	Categoria	Benefícios	Limitações
Digestão Anaeróbia	Tecnológica	- Aceita alto grau de umidade; - Biogás de alto poder calorífico; - Potencial para usinas combinadas de calor e energia.	- Alto tempo de reação; - Alta emissão de poluentes orgânicos no processo; - Baixa eficiência de conversão.
	Social e Ambiental	- Baixa emissão de carbono; - Criação de emprego local; - Uso do resíduo como fertilizante.	- Produz odor na localidade; - Requer tratamento apropriado para não causar riscos à saúde e ao meio ambiente.
	Econômica	- Elimina custos de transporte e descarte em aterros. - Possível venda de fertilizante e biogás	- Alto investimento e custo de manutenção.
	Pesquisas Futuras	- Rendimento e qualidade do biogás; Redução do tempo de reação; Pré tratamento do lodo; Redução de custos.	
Combustão	Tecnológica	- Tecnologia madura e conhecida; - Geração de calor e eletricidade; - Gás de combustão sem poluentes orgânicos.	- Necessidade de lodo de esgoto com baixa umidade; - Resíduos precisam ser destinados de forma adequada.
	Social e Ambiental	- Pode ser combinado com outros combustíveis para reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE); - Fácil integração com tecnologias de captação de poluentes.	- Alta emissão de CO ₂ , NOx e SOx; - Pouca aceitação da população.
	Econômica	- Infraestrutura já existente; - Possibilidade de cutilização de combustíveis para reduzir custo; - Potencial economia de energia no processo de tratamento do lodo.	- Alto custo com tecnologia de limpeza de gás combustível; - Alto custo com destinação das cinzas; - Baixo controle de poluentes.
	Pesquisas Futuras	Problemas de corrosão; Reutilização das cinzas; emissões de metais pesados; Técnicas mais econômicas e eficientes de pré-processamento para secagem.	
Gaseificação	Tecnológica	- Altamente eficiente; - Potencial para produção de combustível líquido ou singás; - Tecnologia autossustentável.	- Lodo deve ter menos de 30% de umidade; - Reação complexa; - Tecnologia em estágio inicial.
	Social e Ambiental	- Desperdício mínimo; - Baixa emissão de GEE; - Baixa concentração de metais pesados.	- Poluentes orgânicos no exaustor; - Formação de poluentes tóxicos.
	Econômica	- Usinas em larga escala são mais viáveis economicamente; - Potencial de venda de energia de baixo carbono para indústrias.	- Alto custo de investimento e manutenção.
	Pesquisas Futuras	Experimentos operacionais para rendimento e qualidade do gás; Remoção de alcatrão no processo, problemas de corrosão; Técnicas de redução das emissões; Técnicas de pré-processamento para secagem do lodo.	
Pirólise	Tecnológica	- Potencial de desperdício zero; - Pode ser utilizado com lodo cru ou digerido; - Potencial para produção de combustível líquido ou singás.	- Lodo deve ter baixo teor de umidade; - Reação complexa; - Tecnologia em estágio inicial.
	Social e Ambiental	- Mínimo desperdício; - Baixa emissão de metais pesados.	- Possibilidade de concentração de metais pesados no <i>biochar</i> .
	Econômica	- Usinas em larga escala são mais viáveis economicamente; - Potencial de venda de energia de baixo carbono, <i>biochar</i> e bio-óleo para indústrias.	- Alto custo de investimento e manutenção.
	Pesquisas Futuras	Experimentos operacionais para rendimento e qualidade dos subprodutos; Possibilidades de utilização dos subprodutos; Técnicas de pré-processamento para secagem do lodo.	

Fonte: Adaptado de Oladejo *et al.*, 2019.

Em síntese, os autores explicam que o tempo de reação da digestão anaeróbia é demasiado longo e tem baixa eficiência de conversão de matéria orgânica, resultando em um lodo digerido de pouca biodegradabilidade e alto teor de orgânicos, impróprio para aplicações agrícolas, além de emitir gases poluentes no processo e demandar um alto valor de investimento e manutenção da planta. Entre as tecnologias termoquímicas, os autores corroboram a opinião de que a combustão é extremamente poluente, com elevadas emissões de CO₂, NOx e SOx, por exemplo, além de necessitarem de um plano de gestão dos resíduos (cinzas), apresentarem alto custo com limpeza dos gases e pouca aceitação por parte da população.

A gaseificação, assim como a pirólise, se mostra uma tecnologia mais complexa e em fase inicial de aplicação, no entanto, requer um lodo de entrada com teor ainda mais baixo de umidade e alto custo de lavagem dos gases. A gaseificação é vista pelos autores como uma pirólise estendida, que utilizará os voláteis e o carvão para oxidação e geração de outros tipos de reação, tornando o processo mais caro e com grandes fatores de risco. No estudo, a pirólise se mostra como o método mais promissor e factível de recuperação de energia do lodo, em termos ambientais, econômicos e sociais. Apesar dos elogios, o estudo aponta tópicos críticos e destaca o alto consumo de energia associado ao processo de secagem do lodo.

Cao e Pawlowski (2012) também compararam a pirólise de lodo esgoto com a digestão anaeróbia em termos de eficiência energética. A conclusão do estudo é que a digestão anaeróbia não tem capacidade de recuperar energia suficiente do lodo, como a pirólise, além de poder causar uma ampla gama de impactos ao meio ambiente se for tratada de forma inadequada. Constatou-se que a digestão anaeróbia requer um tempo de retenção de sólidos de vários dias, uma grande necessidade de espaço para os digestores, baixa variedade de

produtos e investimento de capital superior em comparação com processos termoquímicos.

Outros trabalhos, como o de Raheem *et al.* (2018), Samolada e Zabaniotou (2014) e Gil-Lalaguna *et al.* (2014), colocam os mesmos métodos já citados como as principais tecnologias para destinação e valoração do lodo de esgoto, chegando a resultados semelhantes sobre a pirólise.

4 CONCLUSÃO

Em teoria e no debate acadêmico, a pirólise se apresenta como a alternativa mais promissora para destinação/valoração do lodo de esgoto. Quando comparada a outras opções de descarte e de tratamentos termoquímicos, como digestão anaeróbia, incineração e gaseificação, a pirólise apresenta amplas vantagens em termos ambientais, econômicos e sociais.

A pirólise é capaz de proporcionar uma destinação adequada para o lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto com mínimo impacto sobre o meio ambiente e reduzindo drasticamente os custos com a gestão de resíduos. O lodo, que geralmente é levado para aterros sanitários – acelerando o tempo de saturação e diminuindo a vida útil –, além dos gastos e riscos ambientais com transporte e despejo, passa a ser utilizado em um processo sustentável com a geração de três subprodutos (singás, bio-óleo e *biochar*), com alto valor comercial e/ou potencial de aplicação.

A avaliação dos subprodutos mostra que eles são os principais responsáveis por equilibrar o balanço energético e financeiro do processo de pirólise, principalmente devido ao excesso de gasto na etapa de secagem, e, portanto, a escolha da sua forma de destinação é fundamental para a viabilidade do projeto.

O principal problema apontado pelos indicadores de avaliação utilizados nos estudos é justamente o processo de secagem, ainda na etapa de pré-tratamento, para que possa ser alimentado no reator

de pirólise. A secagem do lodo é uma atividade que demanda alto consumo energético, equipamentos específicos e, conseqüentemente, mais recursos financeiros. Por esse motivo, foi possível perceber, na bibliometria desenvolvida, pesquisas recentes que buscam maneiras alternativas de diminuição do teor de umidade, principalmente com aditivos químicos e co-pirólise. A literatura deixa explícita, ainda, uma preocupação especial com a quantidade de metais pesados contidos no *biochar* e sua estabilidade, que podem comprometer a utilização no solo.

Por fim, vale destacar que a utilização da pirólise como alternativa para a gestão do lodo nas ETE necessita de mais trabalhos sobre sua aplicabilidade. A massiva conclusão dos estudos com referência em testes realizados em bancada, apesar de elucidar pontos importantes, ignora aspectos reais da implementação de uma planta em escala comercial, como custos de implantação e manutenção, comercialização e aplicação dos produtos, modelos de negócio, licenciamento ambiental, regulação e legislação, entre outros. Todos esses temas são ótimas oportunidades para desenvolver trabalhos futuros.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Vieira FB, Silva GV, Lemos MAFP; **Aquisição de Financiamento:** Cardoso R, Barros CFO; **Investigação:** Vieira FB, Silva GV, Lemos MAFP; **Metodologia:** Silva GV; **Administração do Projeto:** Cardoso, R; **Supervisão:** Silva GV, Cardoso R, Barros CFO; **Validação:** Silva GV, Cardoso R, Barros CFO; **Redação Original:** Vieira FB; **Redação – Revisão e Edição:** Vieira FB, Silva GV, Cardoso R, Barros CFO.

6 FINANCIAMENTO

Este artigo integra o projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Modelo de Negócio para Tratamento de Lodo por Pirólise Lenta à Tambor Rotativo em Tratamento de Esgoto do Estado do

Rio de Janeiro”. O projeto recebe financiamento da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e envolve, entre outros agentes, pesquisadores da Universidade Federal Fluminense (UFF) e a Prolagos, concessionária responsável pelos serviços de saneamento básico em municípios da Região dos Lagos, no norte do estado do Rio de Janeiro.

7 7 REFERÊNCIAS <SUB1>

- ADLER, M. J.; VAN DOREN, C. **Como ler livros** – Guia Clássico para a leitura inteligente. Tradução: Edward Horst Wolff e Pedro Sette-Câmara. 19. ed. São Paulo: É Realizações Editora, 2010.
- BARRY, D. *et al.* Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdã, v. 122, p. 472-480, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.041>
- CAO, Y; PAWŁOWSKI, A. Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: Evaluating energy and greenhouse gas emissions implications. **Bioresour Technology**, Barking, v. 127, p. 81-91, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.135>
- CAUCHICK-MIGUEL, P. A. **Metodologia científica para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- DING, H. S.; JIANG, H. Self-heating co-pyrolysis of excessive activated sludge with waste biomass: Energy balance and sludge reduction. **Bioresour Technology**, Barking, v. 133, p. 16-22, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.090>
- FOLGUERAS, M. B; ALONSO, M.; DÍAZ, R. M. Influence of sewage sludge treatment on pyrolysis and combustion of dry sludge. **Energy**, Amsterdã, v. 55, p. 426-435, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.063>
- GAO, N. *et al.* Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 79, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100843>
- GIEVERS, F.; LOEWEN, A.; NELLES, M. Life cycle assessment of sewage sludge pyrolysis: Environmental impacts of *biochar* as carbon sequestrator and nutrient recycler. **Detritus**, Padova, v. 16, p. 94-105, 2013. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15111>
- GIL-LALAGUNA, N. *et al.* Energetic assessment of air-steam gasification of sewage sludge and of the integration of sewage sludge pyrolysis and air-steam gasification of char. **Energy**, Amsterdã, v. 76, p. 652-662. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.061>

- HIRATA, D. *et al.* O uso de informações patentárias para a valorização de resíduos industriais: o caso do lodo de tratamento de esgoto doméstico. **Revista de Ciências da Administração**, Florianópolis, v. 17, n. 43, p. 55-71, 2015.
- HUANG, C.; MOHAMED, B. A.; LI, L. Y. Comparative life-cycle assessment of pyrolysis processes for producing bio-oil, *biochar*, and activated carbon from sewage sludge. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdã, v. 181, 2022.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional do Saneamento Básico**. Brasília, DF: Ministério da Saúde. 2017.
- JIN, J. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in *biochars* derived from municipal sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. 320, p. 417-426, 2016.
- KIM, Y.; PARKER, W. A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. **Bioresource Technology**, Amsterdã, v. 99, n. 5, p. 1409-1416, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.056>.
- KWON, E. E. *et al.* Effects of calcium carbonate on pyrolysis of sewage sludge. **Energy**, Amsterdã, v. 153, p. 726-731, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.100>
- LI, B. *et al.* Experimental investigation into the effect of pyrolysis on chemical forms of heavy metals in sewage sludge *biochar* (SSB), with brief ecological risk assessment. **Materials**, Basel, v. 14, n. 2, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14020447>.
- LOPES, T. A. S. *et al.* Revisão crítica da literatura sobre aplicação da avaliação de ciclo de vida ao tratamento de esgotos. **Revista DAE**, São Paulo, v. 65, n. 208, 2017.
- LUO, H.; CHENG, F.; YU, B. Full-scale municipal sludge pyrolysis in China: Design fundamentals, environmental and economic assessments, and future perspectives. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 795, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148832>
- MAINARDIS, M. *et al.* Life cycle assessment of sewage sludge pretreatment for biogas production: From laboratory tests to full-scale applicability. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 322, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129056>
- MIKI, M. K.; ANDRIGUETI, E. J.; SOBRINHO, P. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T. *et al.* (org.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. p. 41-87.
- MILLS, N. *et al.* Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. **Waste Management**, Nova York, v. 34, p. 185-195, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.024>
- OLADEJO, J. *et al.* A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods. **Energies**, Basel, v. 12, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12010060>
- OLIVEIRA, J. F.; FUJI, K.; BEVILACQUA, P. D. Caracterização da exposição humana a lodo de esgoto sanitário na cadeia: tratamento, uso agrícola e consumo de hortaliças. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, 2021.
- RAHEEM, A. *et al.* Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdã, v. 337, p. 616-641, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>
- SAMOLADA, M. C.; ZABANIOTOU, A. A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. **Waste Management**, Nova York, v. 34, n. 2, p. 411-420, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.003>
- SHAHBEIG, H.; NOSRATI, M. Pyrolysis of municipal sewage sludge for bioenergy production: Thermo-kinetic studies, evolved gas analysis, and techno-socio-economic assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 119, 2019.
- SILVA, L. G. *et al.* Pirólise de passivo de aterro de resíduos industriais para geração de carvão. **Revista DAE**, São Paulo, v. 70, n. 237, p. 229-243, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.063>
- SINGH, S. *et al.* A sustainable paradigm of sewage sludge *biochar*: Valorization, opportunities, challenges and future prospects. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 269, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122259>
- THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, L. F.; SCAVARDA, A. J. Conducting systematic literature review in operations management. **Production Planning & Control**, Abingdon v. 27, n. 5, p. 408-420, 2016.
- WANG, Z. *et al.* Effect of temperature on pyrolysis of sewage sludge: *Biochar* properties and environmental risks from heavy metals. **E3S Web of Conferences**, Les Ulis, v. 237, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202123701040>
- XIN, C. *et al.* Economical feasibility of bio-oil production from sewage sludge through Pyrolysis. **Thermal Science**, Amsterdam, v. 22, p. 459-467. <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI170921258X>
- YUAN, X. Z. *et al.* Speciation and environmental risk assessment of heavy metal in bio-oil from liquefaction/pyrolysis of sewage sludge. **Chemosphere**, Oxford, v. 120, p. 645-652, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.010>
- ZHOU, D. *et al.* Effects of *biochar*-derived sewage sludge on heavy metal adsorption and immobilization in soils. **International journal of environmental research and public health**, Basel, v. 14, n. 7, 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph14070681>