DO RESÍDUO AO RECURSO: REVISÃO DAS ROTAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO E VALORIZAÇÃO DE LODOS DE ETAs E ETEs NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR

Mirella Pessôa Diniz[(1)]
Engenheira Agrícola e Ambiental pela UFRRJ. Mestre em Energias Renováveis pela UFT, com pesquisa em produção de biocombustíveis e gestão de resíduos sólidos. Pós-graduada em Meio Ambiente e Sustentabilidade e MBA em Gestão Ambiental. Especialista em saneamento e infraestrutura, com experiência em estudos de concepção, projetos, modelagem, gerenciamento de concessões e avaliação técnico-econômica de investimentos. Atua como Engenheira de Saneamento Sênior na Concremat Engenharia e Tecnologia.

Endereço[(1)]**:** Av. Nações Unidas, nº 14.401 – Torre Jatobá – 11º andar – Chácara Santo Antônio – São Paulo – SP – CEP: 04794-000 – País – Tel: +55 (11) 3250-7400 – e-mail: mirella.silva@concremat.com.br

RESUMO

A expansão dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário, impulsionada pelas metas de universalização do saneamento, tem resultado no aumento expressivo da geração de lodos em estações de tratamento de água (ETAs) e de esgoto (ETEs). Tradicionalmente destinados a aterros, aplicação agrícola ou incineração, esses resíduos ainda representam um desafio ambiental, operacional e econômico para o setor, ao mesmo tempo em que concentram matéria orgânica, nutrientes e compostos com potencial de reaproveitamento. Nesse contexto, novas estratégias de valorização vêm sendo propostas para transformar os lodos de passivos ambientais em fontes de energia e recursos. Este trabalho apresenta uma revisão da literatura recente sobre rotas de recuperação energética e valorização material aplicáveis aos lodos de ETA e ETE. Os estudos evidenciam que essas estratégias podem reduzir a dependência de soluções convencionais de disposição final, promover a recuperação de energia e recursos e contribuir para a sustentabilidade dos sistemas de saneamento. Mais do que resíduos a serem descartados, os lodos despontam como recursos estratégicos para a recuperação de energia, materiais e nutrientes, fortalecendo a transição do setor de saneamento para modelos de economia circular.

PALAVRAS-CHAVE: Economia Circular; Lodos de ETA e ETE; Recuperação de Recursos

INTRODUÇÃO

A ampliação dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário constitui um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável e para a promoção da saúde pública. No contexto das metas de universalização do saneamento, diversos países vêm ampliando seus sistemas de tratamento de água e esgoto, resultando em um aumento expressivo da geração de resíduos associados a esses processos, especialmente os lodos produzidos em estações de tratamento de água (ETAs) e estações de tratamento de esgoto (ETEs) (BAGHERI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Os lodos representam subprodutos inevitáveis dos processos de tratamento e sua geração tende a crescer à medida que novas unidades são implantadas e os índices de atendimento da população aumentam. Estima-se que a produção global de lodos de esgoto tenha alcançado aproximadamente 45 milhões de toneladas de matéria seca por ano, evidenciando a dimensão do desafio associado à sua gestão e disposição final (BAGHERI et al., 2023). Paralelamente, os lodos gerados em ETAs também vêm ganhando destaque em razão dos volumes produzidos e das dificuldades relacionadas à sua destinação ambientalmente adequada, especialmente em países em desenvolvimento (MATTOSO et al., 2024).

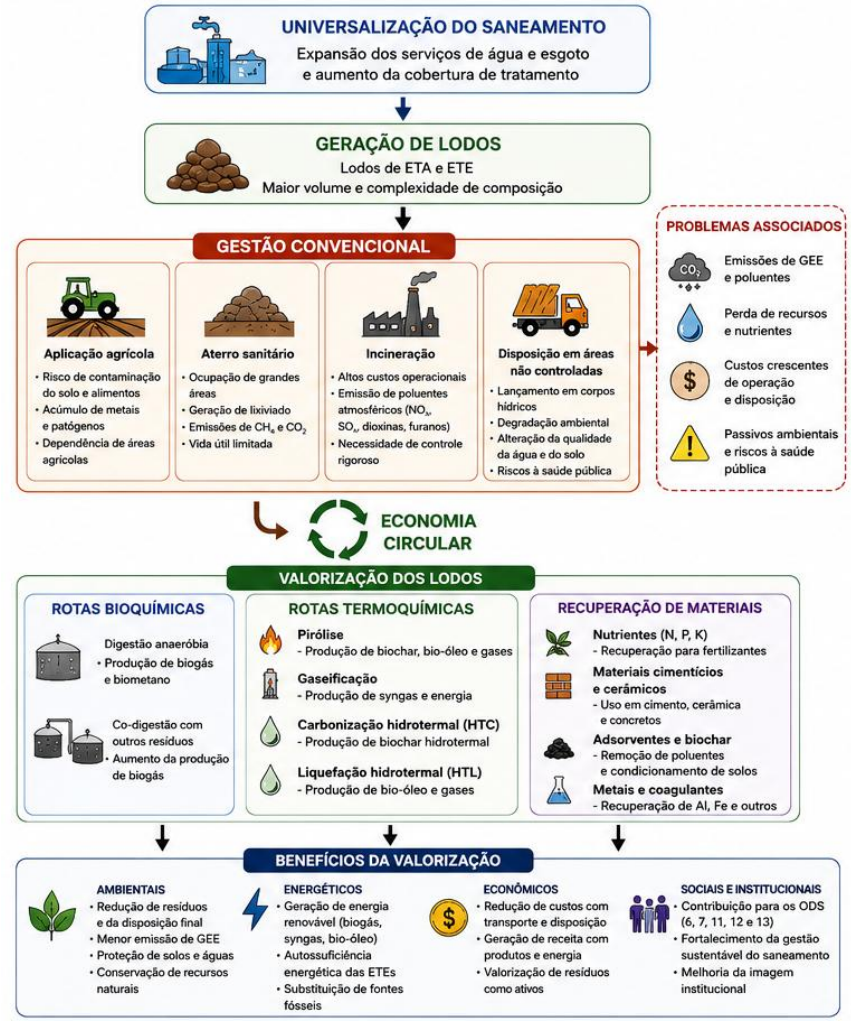
Apesar de apresentarem origens distintas, os lodos de ETA e ETE compartilham um desafio comum: a necessidade de gerenciamento seguro e sustentável. Tradicionalmente, esses resíduos têm sido destinados a aterros sanitários, aplicação agrícola, incineração ou, em situações mais críticas, descartados de forma inadequada no meio ambiente. Embora tais alternativas ainda sejam amplamente utilizadas, sua adoção tem sido cada vez mais questionada devido aos custos associados, à ocupação de áreas para disposição final, aos riscos ambientais e à perda de recursos potencialmente recuperáveis (BAGHERI et al., 2023; GROBELAK et al., 2024). No Brasil, esse cenário é particularmente relevante para os lodos de ETA, uma vez que parcela significativa dos municípios ainda adota formas inadequadas de destinação desses resíduos (FARIA et al., 2025).

Nos últimos anos, a crescente incorporação dos princípios da economia circular tem promovido uma mudança de paradigma na forma como os resíduos gerados pelo setor de saneamento são percebidos. Nessa abordagem, os lodos deixam de ser tratados exclusivamente como passivos ambientais e passam a ser reconhecidos como fontes potenciais de energia, nutrientes e matérias-primas para diferentes cadeias produtivas (KATHI et al., 2023; BASRI et al., 2025). Essa transição tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias voltadas à recuperação de recursos, alinhando a gestão dos resíduos aos objetivos de sustentabilidade, eficiência no uso de recursos e redução dos impactos ambientais.

Além do potencial energético associado à matéria orgânica presente nos lodos de ETE, estudos recentes destacam oportunidades de recuperação de nutrientes, produção de materiais de valor agregado e reaproveitamento industrial. Da mesma forma, os lodos de ETA vêm sendo investigados para aplicações em materiais cimentícios, produtos cerâmicos, geopolímeros e processos de recuperação de coagulantes, ampliando as possibilidades de inserção desses resíduos em modelos circulares de produção e consumo (MORA-LEÓN et al., 2022; SHAWALA et al., 2023; MATTOSO et al., 2024).

Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender as diferentes alternativas disponíveis para a valorização dos lodos gerados no setor de saneamento, bem como suas contribuições para a recuperação de energia, materiais e recursos. Conforme ilustrado na Figura 1, observa-se uma mudança gradual do modelo linear tradicional, baseado na disposição final dos resíduos, para uma abordagem fundamentada nos princípios da economia circular, na qual os lodos passam a ser reconhecidos como fontes potenciais de energia, nutrientes e matérias-primas para diferentes aplicações industriais. Essa transformação tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias e estratégias de valorização, reforçando o papel desses resíduos na construção de sistemas de saneamento mais sustentáveis.

Figura 1 - Transição da gestão convencional para a valorização sustentável dos lodos de ETA e ETE no contexto da economia circular.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

No Brasil, a discussão sobre a gestão sustentável dos lodos torna-se particularmente relevante diante das metas estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento, que prevê a ampliação da cobertura dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário nos próximos anos. Embora a universalização represente um avanço fundamental para a saúde pública e para a qualidade ambiental, ela também deverá resultar em aumento expressivo da geração de lodos provenientes dos processos de tratamento. Nesse contexto, estratégias baseadas exclusivamente na disposição final tendem a enfrentar desafios crescentes relacionados à disponibilidade de áreas para aterramento, aos custos operacionais e às exigências ambientais cada vez mais rigorosas. Assim, a recuperação de energia, materiais e nutrientes emerge como alternativa estratégica para conciliar a expansão dos serviços de saneamento com os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura recente acerca das principais rotas de valorização aplicáveis aos lodos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) e estações de tratamento de esgoto (ETEs), discutindo seu potencial para recuperação de energia, materiais e recursos no contexto da economia circular. Adicionalmente, busca-se identificar oportunidades, benefícios e limitações associadas às diferentes estratégias de valorização, contribuindo para a compreensão do papel desses resíduos na transição para modelos mais sustentáveis de gestão no setor de saneamento.

METODOLOGIA

O presente estudo consiste em uma revisão crítica da literatura técnico-científica sobre recuperação de energia, materiais e recursos a partir dos lodos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) e estações de tratamento de esgoto (ETEs), com enfoque nas contribuições dessas estratégias para a economia circular aplicada ao setor de saneamento.

Foram analisados 22 artigos científicos selecionados de forma intencional com base em sua relevância temática, aderência aos objetivos da pesquisa e publicação em periódicos indexados. A revisão contemplou estudos nacionais e internacionais que abordam diferentes rotas de valorização dos lodos, incluindo recuperação energética, recuperação de nutrientes, produção de biochar, recuperação de coagulantes e aplicações em materiais de construção. Também foram considerados trabalhos voltados à avaliação ambiental, econômica e regulatória das tecnologias propostas. O recorte temporal adotado compreendeu o período de 2021 a 2025, de forma a refletir os avanços mais recentes relacionados à recuperação de recursos e à economia circular aplicada ao setor de saneamento.

A análise buscou identificar tendências tecnológicas, oportunidades de recuperação de recursos, limitações para implementação em larga escala e perspectivas para consolidação da economia circular no setor de saneamento. A Tabela 1 apresenta uma síntese dos estudos selecionados e suas principais contribuições para o desenvolvimento do tema.

Tabela 1 - Síntese dos estudos selecionados e respectivas contribuições para a valorização de lodos de ETA e ETE.

REFERÊNCIA	TEMA PRINCIPAL	CONTRIBUIÇÃO
Bagheri et al. (2023)	Gestão de lodos	Evolução histórica da gestão dos lodos e transição para recuperação de recursos.
Basri et al. (2025)	Valorização sustentável	Oportunidades e desafios para inserção dos lodos em modelos circulares.
Enebe et al. (2023)	Recuperação energética	Produção de biogás e syngas como alternativas de geração de energia renovável.
Faria et al. (2025)	Mercado consumidor	Identificação de potenciais usuários para aproveitamento de lodos de ETA.
Gomes et al. (2022)	Biochar e construção civil	Aplicação de biochar de lodo de ETA como material cimentício sustentável.
Górka et al. (2022)	Gestão integrada de lodos	Experiência prática de gestão e aproveitamento de lodos em ETE.
Grobelak et al. (2024)	Fertilizantes e energia	Gestão de contaminantes em tecnologias de recuperação de nutrientes e energia.

REFERÊNCIA	TEMA PRINCIPAL	CONTRIBUIÇÃO
Haider et al. (2024)	Gestão sustentável de águas residuárias	Integração entre reúso, recuperação de recursos e sustentabilidade.
Hu et al. (2022)	Conversão termoquímica	Produção de energia e materiais visando neutralidade de carbono.
Kathi et al. (2023)	Recuperação de recursos	Integração entre tratamento, recuperação de recursos e economia circular.
Lima et al. (2024)	Energias renováveis em ETEs	Tecnologias para ampliação da recuperação energética em sistemas de esgoto.
Lima et al. (2026)	Aplicação ambiental de lodos de ETA	Reutilização de lodos em camadas de cobertura de aterros sanitários.
Martins et al. (2021)	Uso agrícola	Viabilidade econômica do aproveitamento agrícola de lodo compostado.
Mattoso et al. (2024)	Construção civil	Aplicações de lodos de ETA como substitutos de matérias-primas convencionais.
Mora-León et al. (2022)	Recuperação de coagulantes	Reutilização de coagulantes recuperados no tratamento de águas residuárias.
Rijo et al. (2024)	Rotas termoquímicas	Principais desafios e oportunidades da conversão termoquímica dos lodos.
Ronda et al. (2023)	Sustentabilidade	Comparação entre tecnologias waste-to-energy para gestão de lodos.
Shawala et al. (2023)	Recuperação de coagulantes	Circularidade de produtos químicos empregados no tratamento de água.
Viana et al. (2024)	Materiais sustentáveis	Produção de materiais a partir da reutilização de cinzas de lodos.
Vidyarthi et al. (2024)	Avaliação tecnoeconômica	Comparação de rotas para produção de energia verde a partir de lodos.
Wang e Nakakubo (2021)	Recuperação energética	Estratégias para implantação de sistemas de aproveitamento energético em ETEs.
Wang e Nakakubo (2022)	Autossuficiência energética	Cenários para transformação de ETEs em unidades produtoras de energia.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Observa-se predominância de estudos voltados aos lodos gerados em estações de tratamento de esgoto, refletindo o histórico interesse da literatura pelo potencial energético e pela recuperação de nutrientes associados a esses resíduos. Em contrapartida, os trabalhos relacionados aos lodos de estações de tratamento de água apresentam menor representatividade, concentrando-se principalmente em aplicações voltadas à recuperação de materiais, construção civil e reaproveitamento de coagulantes. Essa diferença evidencia que a valorização dos lodos de ETA ainda constitui uma temática emergente, reforçando a importância de ampliar as pesquisas voltadas ao aproveitamento desses resíduos e à integração de suas potencialidades em estratégias de economia circular aplicadas ao setor de saneamento.

ROTAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA E RECURSOS

Características de Aproveitamento

Os lodos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) e estações de tratamento de esgoto (ETEs) apresentam características distintas em função dos processos que lhes dão origem, influenciando diretamente seu potencial de aproveitamento e as rotas mais adequadas para sua valorização. A compreensão dessas diferenças é fundamental para a seleção de tecnologias capazes de promover a recuperação de energia, materiais e recursos de forma ambientalmente sustentável (MATTOSO et al., 2024; BASRI et al., 2025).

Os lodos de ETA são formados principalmente pelos sólidos removidos durante as etapas de coagulação, floculação e decantação da água bruta, sendo compostos predominantemente por partículas minerais, matéria orgânica natural e resíduos dos coagulantes empregados no tratamento, especialmente compostos à base de alumínio e ferro (SHAWALA et al., 2023; MATTOSO et al., 2024). Em razão de sua composição, esses resíduos apresentam elevado potencial para aplicações em materiais cimentícios, produtos cerâmicos, geopolímeros, adsorventes e processos de

recuperação de coagulantes, contribuindo para a redução do consumo de matérias-primas convencionais e para a inserção do setor de abastecimento de água em modelos de economia circular (MORA-LEÓN et al., 2022; MATTOSO et al., 2024).

Por outro lado, os lodos de ETE caracterizam-se por elevados teores de matéria orgânica, microrganismos e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, concentrando parcela significativa da carga poluidora removida durante o tratamento dos esgotos (KATHI et al., 2023; RIJO et al., 2024). Essas características favorecem sua utilização em processos voltados à recuperação energética, incluindo digestão anaeróbia, produção de biogás, gaseificação, pirólise e carbonização hidrotérmica, além de possibilitarem a recuperação de nutrientes para produção de fertilizantes e condicionadores de solo (HU et al., 2022; ENEBE et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Embora apresentem composições distintas, ambos os resíduos possuem potencial para inserção em estratégias de valorização alinhadas aos princípios da economia circular. Enquanto os lodos de ETA se destacam pelo aproveitamento material e pela recuperação de compostos de interesse industrial, os lodos de ETE apresentam maior vocação para recuperação energética e aproveitamento de nutrientes. Entretanto, avanços recentes têm demonstrado que diversas rotas tecnológicas podem ser aplicadas de forma complementar, ampliando as possibilidades de reaproveitamento e reduzindo a dependência de soluções convencionais de disposição final (KATHI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Sob a perspectiva da economia circular, a composição dos lodos constitui um dos principais fatores determinantes para a definição das estratégias de recuperação de recursos. Enquanto os lodos de ETA concentram predominantemente frações minerais e resíduos de coagulantes, os lodos de ETE apresentam elevada carga orgânica e nutrientes. Essa diferença faz com que os resíduos ocupem posições distintas dentro das cadeias de valorização, exigindo abordagens tecnológicas específicas e reforçando a necessidade de soluções integradas capazes de maximizar o aproveitamento dos recursos presentes em cada fluxo residual.

A Tabela 2 apresenta uma síntese comparativa das principais características dos lodos de ETA e ETE e de seus potenciais de valorização identificados na literatura recente.

Tabela 2 - Principais características e rotas potenciais de valorização dos lodos de ETA e ETE.

ASPECTO	LODO DE ETA	LODO DE ETE
Origem	Tratamento de água	Tratamento de esgoto
Composição predominante	Mineral	Orgânica
Principais constituintes	Al, Fe, SiO_2, argilas	Matéria orgânica, N, P
Potencial energético	Baixo a moderado	Elevado
Recuperação de nutrientes	Limitada	Elevada
Produção de biogás	Baixa	Elevada
Produção de biochar	Sim	Sim
Materiais cimentícios	Elevado potencial	Potencial moderado
Recuperação de coagulantes	Sim	Não aplicável
Aplicações principais	Construção civil, adsorventes, geopolímeros	Energia, fertilizantes, biochar

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Shawala et al. (2023), Mattoso et al. (2024), Mora-León et al. (2022), Rijo et al. (2024), Kathi et al. (2023) e Basri et al. (2025).

Rotas Bioquímicas de Valorização

Entre as alternativas atualmente disponíveis para a valorização dos lodos de ETE, os processos bioquímicos destacam-se por seu elevado grau de maturidade tecnológica e pela ampla aplicação em sistemas de saneamento ao redor do mundo. Essas rotas baseiam-se na conversão da matéria orgânica presente nos lodos em produtos de interesse energético, contribuindo simultaneamente para a redução da carga orgânica, estabilização do resíduo e recuperação de recursos (ENEBE et al., 2023; LIMA et al., 2024).

Dentre os processos bioquímicos, a digestão anaeróbia é a tecnologia mais amplamente empregada para o tratamento e aproveitamento energético dos lodos de esgoto. O processo consiste na degradação da matéria orgânica por microrganismos na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás, composto predominantemente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além da geração de um lodo estabilizado passível de aproveitamento posterior (WANG; NAKAKUBO, 2021; ENEBE et al., 2023).

Além da redução do volume e da estabilização do lodo, a digestão anaeróbia apresenta a vantagem de permitir a recuperação energética por meio da utilização do biogás para geração de eletricidade, calor ou biometano. Segundo Lima et al. (2024), o conteúdo energético presente nos esgotos e lodos pode ser significativamente superior à energia necessária para o próprio tratamento, evidenciando o potencial das ETEs para atuarem não apenas como unidades de controle ambiental, mas também como produtoras líquidas de energia.

Estudos recentes apontam que a integração da digestão anaeróbia com sistemas de aproveitamento energético pode contribuir para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a melhoria do balanço energético das estações de tratamento. Wang e Nakakubo (2022) demonstraram que a combinação entre digestão anaeróbia e tecnologias complementares de recuperação energética pode conduzir à autossuficiência energética de grandes ETEs, reduzindo simultaneamente as emissões de gases de efeito estufa associadas ao gerenciamento dos lodos.

Outra estratégia que vem ganhando destaque consiste na co-digestão anaeróbia, na qual os lodos são processados conjuntamente com outros resíduos orgânicos, como resíduos alimentares, resíduos agroindustriais e frações orgânicas de resíduos sólidos urbanos. Essa abordagem permite aumentar a produção de biogás, melhorar o desempenho operacional dos digestores e ampliar a recuperação energética dos sistemas (ENEBE et al., 2023; LIMA et al., 2024).

Apesar das vantagens associadas à digestão anaeróbia, alguns desafios ainda limitam sua aplicação em determinados contextos, incluindo a necessidade de controle operacional rigoroso, a sensibilidade dos microrganismos às condições do meio e os custos relacionados à implantação e manutenção das unidades de digestão. Ainda assim, a tecnologia permanece como uma das alternativas mais consolidadas para a valorização energética dos lodos de ETE, constituindo frequentemente a base para sistemas integrados de recuperação de energia e recursos no setor de saneamento (WANG; NAKAKUBO, 2021; VIDYARTHI et al., 2024).

Rotas Termoquímicas

Além dos processos bioquímicos, as tecnologias termoquímicas vêm ganhando destaque como alternativas promissoras para a valorização dos lodos gerados em ETEs e, mais recentemente, também dos lodos provenientes de ETAs. Essas rotas baseiam-se na conversão da matéria orgânica presente nos resíduos em produtos de valor agregado por meio da aplicação controlada de calor, permitindo a recuperação simultânea de energia e materiais, além da redução significativa do volume de resíduos destinados à disposição final (HU et al., 2022; RIJO et al., 2024).

Entre as principais tecnologias destacam-se a pirólise, a gaseificação e os processos hidrotérmicos, como a carbonização hidrotérmica (Hydrothermal Carbonization – HTC) e a liquefação hidrotérmica (Hydrothermal Liquefaction – HTL). Em conjunto, essas alternativas têm sido apontadas como importantes ferramentas para a transição de modelos convencionais de gestão para abordagens alinhadas aos princípios da economia circular e da neutralidade de carbono (HU et al., 2022; BASRI et al., 2025).

A pirólise consiste na decomposição térmica da matéria orgânica em ambiente com ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio, resultando na produção de três frações principais: biochar, bio-óleo e gases combustíveis. A proporção desses produtos depende das características do lodo e das condições operacionais empregadas, especialmente temperatura e tempo de residência. Além da recuperação energética, a tecnologia apresenta potencial para produção de materiais adsorventes, condicionadores de solo e precursores para aplicações industriais, ampliando as possibilidades de aproveitamento dos resíduos (HU et al., 2022; RIJO et al., 2024).

A gaseificação, por sua vez, promove a conversão parcial da matéria orgânica em uma corrente gasosa rica em monóxido de carbono, hidrogênio e metano, conhecida como gás de síntese ou syngas. Em comparação à digestão anaeróbia, essa tecnologia apresenta maior potencial de geração energética por unidade de massa processada, embora exija maior controle operacional e investimentos mais elevados para sua implantação. Avaliações tecnoeconômicas recentes indicam que a gaseificação apresenta desempenho energético superior a outras rotas de conversão, constituindo uma alternativa promissora para sistemas de maior porte e aplicações industriais (RONDA et al., 2023; VIDYARTHI et al., 2024).

Os processos hidrotérmicos vêm despertando interesse crescente devido à sua capacidade de processar lodos com elevados teores de umidade, reduzindo ou eliminando a necessidade de secagem prévia. Entre essas tecnologias, a HTC possibilita a produção de hydrochar, material com características semelhantes ao biochar e potencial para aplicações energéticas e ambientais, enquanto a HTL permite a obtenção de biocombustíveis líquidos com elevado conteúdo energético (HU et al., 2022; RIJO et al., 2024). Essas características tornam os processos hidrotérmicos particularmente atrativos para o tratamento de lodos de esgoto, que normalmente apresentam elevados teores de água.

Além da recuperação de energia, as rotas termoquímicas apresentam vantagens associadas à destruição de patógenos, redução de contaminantes orgânicos e diminuição expressiva do volume de resíduos gerados. Entretanto, desafios relacionados ao consumo energético, aos custos de implantação, à necessidade de controle operacional e à gestão dos subprodutos ainda representam barreiras para sua adoção em larga escala (RIJO et al., 2024; BASRI et al., 2025).

De forma geral, a literatura recente aponta que a escolha da rota tecnológica mais adequada depende das características do lodo, da escala de aplicação, dos objetivos de recuperação pretendidos e das condições econômicas locais. Nesse contexto, as tecnologias termoquímicas vêm sendo reconhecidas não apenas como alternativas para recuperação energética, mas também como plataformas para produção de materiais de valor agregado, contribuindo para a consolidação de estratégias mais sustentáveis de gestão dos resíduos gerados pelo setor de saneamento (RONDA et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Recuperação de Materiais e Recursos

Embora a recuperação energética represente uma das estratégias mais difundidas para o aproveitamento dos lodos gerados no setor de saneamento, estudos recentes demonstram que esses resíduos também constituem importantes fontes de nutrientes, compostos químicos e matérias-primas com potencial de reinserção em diferentes cadeias produtivas. Nesse contexto, a recuperação de recursos tem se consolidado como um dos principais pilares da economia circular aplicada aos sistemas de tratamento de água e esgoto, ampliando as possibilidades de aproveitamento dos lodos para além da simples geração de energia (KATHI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

As oportunidades de recuperação variam de acordo com a composição e as características dos resíduos gerados. Enquanto os lodos de ETA apresentam maior potencial para aplicações relacionadas à recuperação de materiais e ao reaproveitamento industrial, os lodos de ETE destacam-se pela recuperação de nutrientes e pelo aproveitamento agrícola e energético. Essa complementaridade amplia significativamente as possibilidades de inserção dos resíduos gerados pelo setor de saneamento em modelos produtivos alinhados aos princípios da economia circular (MATTOSO et al., 2024; BASRI et al., 2025).

A valorização dos lodos por meio da recuperação de materiais e recursos busca transformar resíduos tradicionalmente destinados à disposição final em insumos capazes de gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais. Essa abordagem envolve desde a recuperação de nutrientes para uso agrícola até a produção de materiais para a construção civil, adsorventes, biochar e compostos químicos reutilizáveis nos próprios processos de tratamento, contribuindo para o fechamento de ciclos produtivos e para a redução do consumo de recursos naturais (BAGHERI et al., 2023; GROBELAK et al., 2024).

Além da recuperação energética, a literatura recente destaca o crescente interesse pela recuperação de recursos estratégicos presentes nos lodos, especialmente fósforo, nitrogênio, alumínio e materiais carbonáceos. A recuperação desses componentes contribui para reduzir a dependência de matérias-primas não renováveis e fortalecer cadeias produtivas alinhadas aos princípios da economia circular. Segundo Kathi et al. (2023), a reinserção desses recursos nos ciclos produtivos representa uma das principais oportunidades para transformar sistemas de tratamento em plataformas de recuperação de valor.

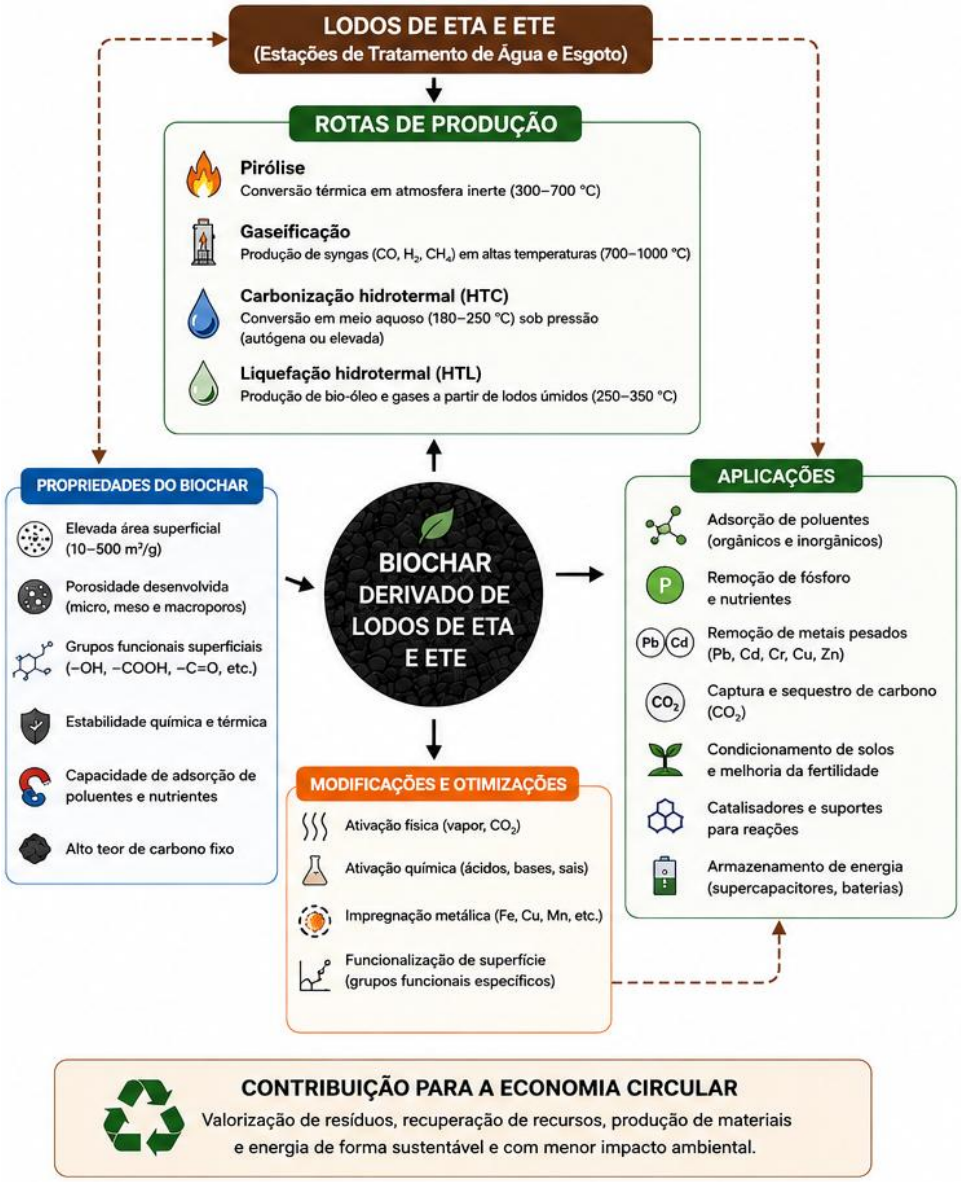
No caso dos lodos de ETA, estudos recentes têm demonstrado potencial para recuperação de coagulantes à base de alumínio e ferro, possibilitando seu reaproveitamento nos próprios processos de tratamento de água e esgoto. Mora-León et al. (2022) verificaram que coagulantes recuperados de lodos de ETA podem apresentar desempenho satisfatório no tratamento primário de esgotos domésticos, enquanto Shawala et al. (2023) destacam a recuperação de coagulantes como uma estratégia promissora para promover a circularidade interna dos sistemas de tratamento, reduzindo simultaneamente o consumo de produtos químicos e a geração de resíduos.

De forma complementar, o desenvolvimento de materiais derivados dos lodos vem ampliando as possibilidades de aproveitamento desses resíduos em setores como construção civil, recuperação ambiental e controle da poluição. Estudos conduzidos por Gomes et al. (2022), Mattoso et al. (2024) e Viana et al. (2024) demonstram aplicações promissoras envolvendo biochar, materiais cimentícios, produtos cerâmicos e reutilização de cinzas de lodo, evidenciando o potencial desses resíduos para substituição parcial de matérias-primas convencionais e redução dos impactos ambientais associados aos processos produtivos.

A diversidade de aplicações associadas aos produtos obtidos a partir dos lodos evidencia que a recuperação de recursos não se restringe a uma única rota tecnológica. Dependendo das características do resíduo e das condições operacionais adotadas, é possível obter produtos destinados à geração de energia, recuperação de nutrientes, produção de materiais para construção civil, adsorção de contaminantes e reaproveitamento de insumos químicos utilizados nos próprios sistemas de tratamento.

A Figura 2 sintetiza as principais rotas de conversão dos lodos de ETA e ETE, bem como as propriedades e aplicações associadas aos produtos obtidos, destacando o papel desses resíduos como fontes potenciais de energia, materiais e recursos no contexto da economia circular.

Figura 2 - Rotas de conversão, propriedades e aplicações de produtos derivados de lodos de ETA e ETE.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Potencial de Valorização dos Lodos de ETA

Os lodos gerados em estações de tratamento de água vêm sendo progressivamente reconhecidos como fontes potenciais de matérias-primas para diferentes aplicações industriais. Tradicionalmente destinados a aterros sanitários ou outras formas de disposição final, esses resíduos apresentam composição predominantemente mineral, caracterizada pela presença de sílica, alumina, óxidos de ferro e resíduos dos coagulantes utilizados no tratamento da água, o que favorece seu aproveitamento em processos de recuperação de materiais e substituição de matérias-primas convencionais (SHAWALA et al., 2023; MATTOSO et al., 2024).

Entre as aplicações mais promissoras destaca-se o uso dos lodos de ETA na construção civil. Estudos recentes demonstram que esses resíduos podem ser incorporados à produção de materiais cimentícios, concretos, argamassas, produtos cerâmicos e geopolímeros, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e para a diminuição da pegada ambiental associada à produção desses materiais (GOMES et al., 2022; MATTOSO et al., 2024; VIANA et al., 2024). Além dos benefícios ambientais, a substituição parcial de matérias-primas convencionais pode representar uma alternativa economicamente atrativa para setores intensivos em recursos minerais.

Outra estratégia relevante consiste na recuperação dos coagulantes presentes nos lodos. Mora-León et al. (2022) e Shawala et al. (2023) demonstram que compostos à base de alumínio e ferro podem ser recuperados e reutilizados em novas etapas do tratamento de água, reduzindo simultaneamente a geração de resíduos e o consumo de produtos químicos comerciais. Essa abordagem representa um exemplo direto da aplicação dos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de materiais dentro do próprio sistema produtivo.

Além das aplicações industriais, estudos recentes vêm investigando o uso dos lodos de ETA em soluções ambientais, incluindo materiais adsorventes para remoção de contaminantes, cobertura de aterros sanitários e condicionamento de áreas degradadas (LIMA et al., 2026). Essas alternativas ampliam as possibilidades de aproveitamento dos resíduos e reforçam seu potencial como recurso estratégico para diferentes setores.

No contexto brasileiro, Faria et al. (2025) identificaram, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, mais de uma centena de empreendimentos potencialmente aptos a utilizar lodos de ETA em processos produtivos, especialmente nos setores de cimento, concreto e cerâmica. Os resultados evidenciam que a valorização desses resíduos depende não apenas da viabilidade tecnológica, mas também da articulação entre geradores, usuários potenciais e instrumentos regulatórios capazes de estimular sua inserção em cadeias produtivas consolidadas.

Potencial de Valorização dos Lodos de ETE

Diferentemente dos lodos gerados em estações de tratamento de água, os lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto apresentam elevada concentração de matéria orgânica, nutrientes e microrganismos, características que ampliam significativamente suas possibilidades de aproveitamento energético e recuperação de recursos. Tradicionalmente considerados um passivo ambiental, esses resíduos vêm sendo progressivamente reconhecidos como fontes potenciais de energia, fertilizantes e produtos de valor agregado, alinhando-se aos princípios da economia circular e da gestão sustentável dos recursos (KATHI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Entre os recursos de maior interesse presentes nos lodos de ETE destacam-se o nitrogênio e o fósforo, nutrientes essenciais para a produção agrícola e cuja disponibilidade global tem despertado crescente preocupação devido à dependência de reservas minerais finitas. Nesse contexto, a recuperação desses elementos a partir dos lodos representa uma alternativa estratégica para reduzir a pressão sobre recursos naturais não renováveis e promover ciclos mais sustentáveis de produção de alimentos (KATHI et al., 2023; GROBELAK et al., 2024).

Além da recuperação direta de nutrientes, diversas pesquisas vêm demonstrando o potencial dos lodos de ETE para produção de biossólidos, compostos orgânicos e biofertilizantes destinados ao uso agrícola. Martins et al. (2021) destacam que processos de compostagem e estabilização adequadamente controlados podem transformar esses resíduos em produtos capazes de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, contribuindo para a reciclagem de nutrientes e para a redução do consumo de fertilizantes convencionais.

Outra importante frente de valorização consiste na recuperação energética. Conforme discutido anteriormente, a digestão anaeróbia permanece como a tecnologia mais consolidada para conversão da matéria orgânica presente nos lodos em biogás. Entretanto, estudos recentes indicam que os lodos de ETE podem ser inseridos em sistemas integrados de recuperação de recursos, nos quais a produção de energia ocorre simultaneamente à recuperação de

nutrientes e à obtenção de materiais de valor agregado, ampliando a eficiência global dos sistemas de tratamento (NAKAKUBO, 2021; ENEBE et al., 2023; WANG).

Experiências internacionais demonstram que essa abordagem integrada pode contribuir para transformar as estações de tratamento de esgoto em unidades produtoras de recursos. Wang e Nakakubo (2022) destacam que a combinação entre digestão anaeróbia, recuperação de nutrientes e aproveitamento energético do biogás tem permitido que diversas ETEs avancem em direção à autossuficiência energética, reduzindo simultaneamente emissões de gases de efeito estufa e custos operacionais.

Apesar dos avanços observados, desafios relacionados ao controle de contaminantes, aceitação pública, requisitos regulatórios e viabilidade econômica ainda limitam a expansão de determinadas aplicações. A presença potencial de metais pesados, contaminantes emergentes e microplásticos exige monitoramento adequado e critérios técnicos capazes de garantir a utilização segura dos produtos gerados (GROBELAK et al., 2024). Ainda assim, a literatura recente aponta que a valorização dos lodos de ETE representa uma das principais oportunidades para consolidar a transição do setor de saneamento para modelos mais circulares, resilientes e sustentáveis (KATHI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

DISCUSSÃO

Economia Circular e a Mudança de Paradigma na Gestão dos Lodos

A análise dos estudos selecionados evidencia que a gestão dos lodos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) e estações de tratamento de esgoto (ETEs) atravessa um período de transformação conceitual e tecnológica. Tradicionalmente, esses resíduos foram tratados sob uma lógica linear, na qual o principal objetivo consistia na remoção dos contaminantes e na destinação final ambientalmente adequada dos subprodutos gerados. Entretanto, o avanço dos princípios da economia circular vem promovendo uma mudança significativa nesse paradigma, estimulando a substituição de modelos centrados na disposição final por abordagens voltadas à recuperação de energia, nutrientes, materiais e compostos químicos de interesse econômico (BAGHERI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Essa transição reflete uma tendência observada globalmente no setor de saneamento, na qual estações de tratamento deixam de ser compreendidas exclusivamente como infraestruturas de controle da poluição e passam a ser reconhecidas como unidades de recuperação de recursos. Nesse contexto, água, energia, nutrientes e materiais passam a integrar uma nova lógica de gestão, baseada no reaproveitamento dos fluxos gerados durante os processos de tratamento e na redução da dependência de recursos externos (KATHI et al., 2023; HAIDER et al., 2024).

Os resultados apresentados ao longo desta revisão demonstram que os lodos constituem um dos principais elementos dessa transformação. A diversidade de rotas identificadas na literatura, incluindo digestão anaeróbia, pirólise, gaseificação, carbonização hidrotérmica, recuperação de nutrientes, recuperação de coagulantes e aplicações em materiais de construção, evidencia que esses resíduos possuem potencial para desempenhar funções que extrapolam amplamente sua concepção tradicional como passivos ambientais (HU et al., 2022; MATTOSO et al., 2024; RIJO et al., 2024).

Além dos benefícios associados à redução da disposição final e à recuperação de recursos, a valorização dos lodos apresenta forte alinhamento com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A recuperação de nutrientes e a ampliação da segurança hídrica contribuem diretamente para o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), enquanto a produção de biogás, biochar e combustíveis renováveis fortalece o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível). Da mesma forma, a reinserção de materiais em cadeias produtivas está alinhada aos princípios do ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), enquanto a redução das emissões associadas à disposição final e a substituição de matérias-primas convencionais contribuem para o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (HAIDER et al., 2024; BASRI et al., 2025).

Adicionalmente, diversas rotas de valorização contribuem para estratégias de descarbonização do setor de saneamento. A substituição de combustíveis fósseis por biogás, a produção de biochar com potencial de sequestro de carbono e a substituição parcial de matérias-primas minerais na construção civil representam mecanismos capazes de reduzir emissões associadas às cadeias produtivas tradicionais. Nesse contexto, a valorização dos lodos também se conecta às agendas globais de neutralidade climática e transição para uma economia de baixo carbono (HU et al., 2022; BASRI et al., 2025).

Sob essa perspectiva, a valorização dos lodos não deve ser interpretada apenas como uma alternativa para gerenciamento de resíduos, mas como um componente estratégico da transição para sistemas de saneamento mais resilientes, eficientes e sustentáveis. A adoção de modelos circulares permite ampliar a recuperação de recursos, reduzir impactos ambientais e fortalecer a integração entre os serviços de saneamento e outros setores produtivos, consolidando o papel dessas infraestruturas na promoção do desenvolvimento sustentável.

Os Lodos como Fontes de Valor

Os estudos analisados indicam que a principal transformação associada à economia circular no setor de saneamento não está apenas na adoção de novas tecnologias, mas na mudança da percepção sobre os próprios resíduos gerados pelos sistemas de tratamento. Historicamente, os lodos foram tratados como passivos ambientais e centros de custo, demandando investimentos contínuos para transporte, tratamento e disposição final. Entretanto, a literatura recente demonstra que esses materiais possuem potencial para geração de valor por meio da recuperação de energia, nutrientes, materiais e compostos químicos de interesse econômico (BAGHERI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Essa mudança de paradigma reflete uma tendência observada em diferentes setores produtivos, nos quais resíduos anteriormente destinados ao descarte passam a ser reconhecidos como fontes secundárias de recursos. No contexto do saneamento, essa transformação é particularmente relevante, uma vez que os lodos concentram matéria orgânica, nutrientes, compostos minerais e substâncias químicas que podem ser reinseridos em ciclos produtivos, reduzindo a dependência de matérias-primas virgens e contribuindo para o uso mais eficiente dos recursos naturais (KATHI et al., 2023; HAIDER et al., 2024).

Sob essa perspectiva, o valor associado aos lodos deixa de estar restrito à mitigação dos impactos ambientais decorrentes de sua disposição final e passa a incorporar benefícios relacionados à geração de energia renovável, recuperação de nutrientes, produção de materiais alternativos e reaproveitamento de insumos químicos. Essa abordagem amplia as possibilidades de integração entre o setor de saneamento e outras cadeias produtivas, como agricultura, energia, construção civil e indústria química, fortalecendo os princípios da economia circular e promovendo maior eficiência no uso dos recursos disponíveis.

Além dos benefícios econômicos e operacionais, a recuperação de recursos a partir dos lodos também está associada a estratégias de descarbonização e segurança de recursos. A produção de biogás pode contribuir para redução da dependência de combustíveis fósseis, enquanto o aproveitamento de biochar e a substituição parcial de matérias-primas convencionais em materiais de construção apresentam potencial para redução das emissões associadas a processos industriais intensivos em carbono (HU et al., 2022; BASRI et al., 2025). De forma semelhante, a recuperação de nutrientes e coagulantes pode reduzir a demanda por insumos produzidos a partir de recursos finitos, contribuindo para maior resiliência dos sistemas de abastecimento e tratamento.

Mais do que uma mudança terminológica, essa transformação representa uma redefinição do papel das estações de tratamento. Tradicionalmente concebidas como infraestruturas destinadas à remoção de poluentes e proteção ambiental, essas unidades passam gradualmente a ser reconhecidas como plataformas de recuperação de recursos, capazes de gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais simultaneamente. Nesse cenário, a capacidade de transformar resíduos em produtos e insumos de valor agregado tende a constituir um dos principais diferenciais dos sistemas de saneamento nas próximas décadas, especialmente diante das crescentes pressões associadas à escassez de recursos naturais, às mudanças climáticas e às exigências ambientais cada vez mais rigorosas.

Integração de Fluxos e Recuperação de Recursos no Setor de Saneamento

Um dos principais achados desta revisão refere-se à complementaridade existente entre os lodos gerados em ETAs e ETEs. Embora ambos sejam tradicionalmente classificados como resíduos do setor de saneamento, suas características físico-químicas e seus potenciais de aproveitamento diferem substancialmente, ampliando as possibilidades de recuperação de recursos quando analisados de forma integrada. Essa constatação sugere que a transição para modelos circulares não deve considerar os lodos como fluxos independentes, mas como componentes complementares de uma estratégia mais ampla de aproveitamento de recursos (KATHI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Historicamente, as pesquisas relacionadas à valorização dos lodos concentraram-se predominantemente nos resíduos provenientes das ETEs, em razão de seu elevado teor de matéria orgânica e do potencial associado à produção de biogás, biochar, syngas e biocombustíveis. Como consequência, as rotas bioquímicas e termoquímicas destinadas à

recuperação energética constituem atualmente uma das áreas mais consolidadas da literatura científica sobre gestão de lodos (HU et al., 2022; ENEBE et al., 2023; RIJO et al., 2024). Entretanto, os estudos mais recentes indicam que a recuperação de energia representa apenas uma das dimensões possíveis da economia circular aplicada ao saneamento.

Nesse contexto, os lodos de ETA vêm assumindo papel cada vez mais relevante devido ao seu potencial para substituição de matérias-primas minerais e reaproveitamento industrial. A elevada presença de sílica, alumina e compostos metálicos favorece aplicações em materiais cimentícios, geopolímeros, produtos cerâmicos, adsorventes e recuperação de coagulantes, ampliando significativamente o escopo das estratégias de recuperação de recursos disponíveis para o setor (MORA-LEÓN et al., 2022; SHAWALA et al., 2023; MATTOSO et al., 2024). Sob essa perspectiva, os lodos de ETA podem contribuir para reduzir a extração de recursos naturais e promover a circularidade em setores intensivos em matérias-primas, como a construção civil.

Por outro lado, os lodos de ETE destacam-se pela elevada concentração de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, além do potencial para geração de energia renovável. A recuperação desses recursos apresenta relevância estratégica em escala global, considerando tanto a crescente demanda por fertilizantes quanto a necessidade de ampliação da participação de fontes renováveis na matriz energética. Estudos recentes demonstram que a integração entre digestão anaeróbia, recuperação de nutrientes e aproveitamento agrícola dos biossólidos pode maximizar o aproveitamento dos resíduos gerados e reduzir a dependência de recursos não renováveis (MARTINS et al., 2021; WANG; NAKAKUBO, 2022; GROBELAK et al., 2024).

Essa complementaridade evidencia que os lodos de ETA e ETE não devem ser compreendidos como resíduos concorrentes, mas como recursos capazes de atender a diferentes demandas de recuperação dentro da economia circular. Enquanto os lodos de ETE apresentam maior vocação para produção de energia e reciclagem de nutrientes, os lodos de ETA destacam-se pela recuperação de materiais e reaproveitamento industrial. Em conjunto, esses fluxos permitem ampliar significativamente o potencial de circularidade dos sistemas de saneamento e diversificar as oportunidades de geração de valor associadas aos resíduos produzidos.

Outro aspecto relevante identificado na literatura refere-se à crescente integração entre diferentes rotas tecnológicas. Estudos comparativos demonstram que não existe uma solução única capaz de maximizar simultaneamente recuperação energética, reaproveitamento de materiais, recuperação de nutrientes e viabilidade econômica. Pelo contrário, as tecnologias apresentam características complementares e tendem a alcançar melhores resultados quando aplicadas de forma integrada (RONDA et al., 2023; VIDYARTHI et al., 2024). Sistemas capazes de combinar digestão anaeróbia, recuperação de nutrientes, produção de biochar e reaproveitamento de materiais representam uma tendência promissora para maximizar a recuperação de recursos e reduzir a dependência de soluções convencionais de disposição final.

Dessa forma, os resultados da revisão reforçam que a economia circular aplicada ao saneamento não deve ser compreendida apenas como a adoção isolada de tecnologias inovadoras, mas como a construção de sistemas integrados de recuperação de recursos. Nessa abordagem, os lodos deixam de ser considerados passivos ambientais e passam a desempenhar papel estratégico na produção de energia, materiais e insumos capazes de gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais simultaneamente.

Experiências Internacionais e Perspectivas para o Contexto Brasileiro

As experiências internacionais analisadas demonstram que a transição para modelos circulares de gestão dos lodos já se encontra em diferentes estágios de implementação ao redor do mundo. Embora as estratégias adotadas variem em função das condições regulatórias, econômicas e tecnológicas de cada país, observa-se uma convergência crescente em torno da recuperação de recursos como elemento central para a sustentabilidade dos sistemas de saneamento. Em diversos casos, os lodos deixaram de ser tratados exclusivamente como resíduos a serem descartados e passaram a integrar estratégias voltadas à produção de energia renovável, recuperação de nutrientes, reaproveitamento de materiais e redução das emissões de gases de efeito estufa (BAGHERI et al., 2023; HAIDER et al., 2024).

No Japão, por exemplo, estudos conduzidos por Wang e Nakakubo (2021; 2022) evidenciam o avanço de modelos integrados de recuperação de recursos em estações de tratamento de esgoto, combinando digestão anaeróbia, aproveitamento energético do biogás e recuperação de nutrientes. Essas iniciativas refletem uma visão estratégica na qual as ETEs passam a ser concebidas como unidades produtoras de recursos, contribuindo para a segurança energética, redução da dependência de combustíveis fósseis e mitigação das mudanças climáticas. Os resultados

demonstram que a integração entre diferentes tecnologias pode aumentar significativamente a eficiência global dos sistemas e ampliar os benefícios ambientais associados ao tratamento dos esgotos.

Experiências semelhantes também vêm sendo observadas em países europeus. Górka et al. (2022) destacam que a gestão dos lodos tem evoluído de abordagens focadas exclusivamente na disposição final para estratégias baseadas na recuperação de energia e materiais, impulsionadas por regulamentações ambientais mais restritivas e pela crescente valorização dos princípios da economia circular. Nesse contexto, tecnologias termoquímicas e processos de recuperação de recursos vêm sendo incorporados como alternativas capazes de reduzir a dependência de aterros sanitários e aumentar a eficiência dos sistemas de saneamento.

Além dos países industrializados, Haider et al. (2024) demonstram que regiões sujeitas à escassez hídrica e limitações de recursos naturais também vêm incorporando abordagens circulares em seus sistemas de saneamento. Nessas localidades, a recuperação de água, energia e nutrientes passa a desempenhar papel estratégico para garantir maior resiliência dos serviços e reduzir a vulnerabilidade associada à disponibilidade de recursos. Essa tendência reforça a compreensão de que a economia circular aplicada ao saneamento não constitui apenas uma alternativa ambientalmente desejável, mas uma necessidade crescente diante dos desafios globais relacionados à segurança hídrica, energética e alimentar.

No Brasil, essa discussão assume relevância ainda maior diante das metas de universalização estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento. A ampliação da cobertura dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário deverá resultar em aumento expressivo da geração de lodos nas próximas décadas, ampliando simultaneamente os desafios relacionados à sua gestão e as oportunidades associadas à recuperação de recursos. Nesse cenário, a adoção de estratégias circulares pode representar um importante instrumento para reduzir custos operacionais, minimizar impactos ambientais e ampliar a sustentabilidade dos serviços de saneamento.

Apesar do potencial identificado, a realidade brasileira ainda é marcada pela predominância de soluções convencionais de disposição final, especialmente em aterros sanitários. Embora essa alternativa desempenhe papel importante na gestão dos resíduos, sua adoção exclusiva limita o aproveitamento dos recursos presentes nos lodos e pode representar perda de oportunidades econômicas e ambientais. A literatura analisada sugere que a transição para modelos mais circulares dependerá não apenas da disponibilidade tecnológica, mas também da criação de instrumentos regulatórios, incentivos econômicos e mecanismos de articulação entre os diferentes atores envolvidos na cadeia de gestão dos resíduos (KATHI et al., 2023; BASRI et al., 2025).

Nesse contexto, os resultados obtidos por Faria et al. (2025), Mattoso et al. (2024), Gomes et al. (2022), Viana et al. (2024) e Lima et al. (2026) indicam que o país apresenta condições favoráveis para ampliação das aplicações dos lodos de ETA, especialmente nos setores de construção civil, produção de materiais cimentícios e recuperação ambiental. Da mesma forma, o potencial energético e agrícola associado aos lodos de ETE sugere oportunidades relevantes para integração entre saneamento, geração de energia renovável e reciclagem de nutrientes. A consolidação dessas oportunidades poderá contribuir para transformar um passivo operacional crescente em uma importante fonte de recursos para o desenvolvimento sustentável do setor.

Caminhos para a Consolidação da Transição Circular no Setor do Saneamento

Os resultados desta revisão demonstram que os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas reduziram significativamente as barreiras relacionadas à recuperação de energia, nutrientes e materiais a partir dos lodos gerados em ETAs e ETEs. Entretanto, a consolidação da economia circular no setor de saneamento depende de fatores que transcendem a disponibilidade de tecnologias e envolvem aspectos regulatórios, institucionais, econômicos e sociais.

Nesse contexto, a literatura analisada evidencia que a adoção bem-sucedida de estratégias circulares está diretamente associada à existência de políticas públicas capazes de estimular a recuperação de recursos e criar condições favoráveis para a inserção dos produtos recuperados em cadeias produtivas consolidadas (BAGHERI et al., 2023; BASRI et al., 2025). A valorização dos lodos exige não apenas soluções técnicas viáveis, mas também instrumentos regulatórios que forneçam segurança jurídica aos usuários finais, estabeleçam critérios de qualidade para os produtos gerados e promovam maior integração entre os setores de saneamento, energia, agricultura e construção civil.

Outro aspecto fundamental refere-se à criação e fortalecimento de mercados consumidores para os recursos recuperados. Embora diversos estudos demonstrem a viabilidade técnica da utilização de biochar, biossólidos, fertilizantes recuperados, materiais cimentícios e coagulantes regenerados, a expansão dessas aplicações depende da

existência de demanda estável e de mecanismos capazes de reduzir as incertezas associadas à sua comercialização (GOMES et al., 2022; SHAWALA et al., 2023; FARIA et al., 2025). Dessa forma, a construção de cadeias de valor para os produtos derivados dos lodos representa um dos principais desafios para a efetiva implementação da economia circular no setor.

A cooperação entre universidades, centros de pesquisa, prestadores de serviços de saneamento, órgãos reguladores e setor produtivo também desempenha papel estratégico nesse processo. Grande parte das tecnologias analisadas encontra-se em diferentes estágios de maturidade, exigindo avanços contínuos relacionados à otimização operacional, redução de custos, avaliação de impactos ambientais e ampliação da escala de aplicação (RIJO et al., 2024; VIDYARTHI et al., 2024). Nesse sentido, a aproximação entre pesquisa científica e implementação prática torna-se essencial para acelerar a transferência de conhecimento e reduzir o intervalo entre inovação e adoção pelo mercado.

Adicionalmente, a consolidação de estratégias circulares requer uma mudança na própria forma como os resíduos gerados pelo saneamento são percebidos. Conforme observado em diversos estudos, a transição para modelos baseados na recuperação de recursos depende da substituição gradual da lógica tradicional de disposição final por uma visão sistêmica, na qual os lodos passam a ser reconhecidos como fontes potenciais de energia, nutrientes e matérias-primas capazes de gerar benefícios econômicos e ambientais simultaneamente (KATHI et al., 2023; HAIDER et al., 2024). Essa mudança de percepção constitui um dos pilares para viabilizar a implementação de soluções mais sustentáveis e integradas.

Por fim, os resultados da revisão indicam que a transição circular no setor de saneamento não deve ser compreendida como um objetivo restrito à gestão dos lodos, mas como parte de um processo mais amplo de transformação dos sistemas de tratamento em plataformas de recuperação de recursos. Nessa perspectiva, ETAs e ETEs passam a desempenhar papel estratégico na produção de energia renovável, reciclagem de nutrientes, recuperação de materiais e redução das emissões associadas à gestão dos resíduos. A consolidação dessa visão poderá contribuir para ampliar a sustentabilidade do setor, fortalecer sua resiliência frente aos desafios futuros e posicionar o saneamento como um dos protagonistas da economia circular nas próximas décadas.

Entre o Potencial e a Aplicação Prática

Embora os avanços observados na literatura demonstrem o crescente potencial de recuperação de energia, materiais e nutrientes a partir dos lodos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) e estações de tratamento de esgoto (ETEs), os estudos analisados evidenciam que a consolidação da economia circular no setor de saneamento ainda depende da superação de importantes desafios técnicos, econômicos, regulatórios e institucionais. Nesse contexto, as lacunas identificadas não representam apenas limitações ao desenvolvimento das tecnologias existentes, mas também oportunidades para direcionar futuras pesquisas, estratégias de gestão e políticas públicas voltadas à recuperação de recursos.

Uma das principais limitações observadas refere-se à escassez de estudos em escala real capazes de avaliar simultaneamente o desempenho técnico, ambiental e econômico das diferentes rotas de recuperação de recursos. Grande parte das pesquisas concentra-se em avaliações laboratoriais ou em unidades piloto, dificultando a extrapolação dos resultados para condições operacionais reais. Ronda et al. (2023) e Vidyarthi et al. (2024) destacam a necessidade de ampliar análises multicritério que considerem, de forma integrada, eficiência energética, custos de implantação, operação, manutenção, logística e comercialização dos produtos obtidos. O avanço dessas avaliações é fundamental para apoiar a tomada de decisão por operadores, reguladores e investidores.

Outra lacuna relevante está associada à avaliação integrada dos impactos ambientais das diferentes tecnologias. Embora diversos estudos demonstrem benefícios relacionados à redução da disposição final e à recuperação de recursos, ainda são limitadas as pesquisas que utilizam ferramentas como Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para comparar os efeitos ambientais das rotas bioquímicas, termoquímicas e de recuperação de materiais sob diferentes cenários de aplicação (BAGHERI et al., 2023; BASRI et al., 2025). A ampliação dessas análises poderá fornecer subsídios mais robustos para seleção de tecnologias e formulação de políticas públicas alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

No caso dos lodos de ETA, observa-se que a literatura ainda apresenta menor volume de estudos quando comparada aos lodos de ETE, evidenciando que essa temática permanece em estágio relativamente emergente. Embora pesquisas recentes tenham demonstrado elevado potencial para aplicações em materiais cimentícios, geopolímeros, adsorventes, recuperação de coagulantes e recuperação ambiental, ainda existem desafios relacionados à padronização dos

materiais produzidos, à avaliação de desempenho em longo prazo e à ampliação das aplicações em escala comercial (MORA-LEÓN et al., 2022; SHAWALA et al., 2023; MATTOSO et al., 2024). Esse cenário reforça a necessidade de aprofundamento das pesquisas voltadas especificamente aos resíduos provenientes do tratamento de água, ampliando o conhecimento sobre suas características e possibilidades de aproveitamento.

Para os lodos de ETE, os principais desafios científicos estão relacionados ao monitoramento e controle de contaminantes emergentes, metais pesados, microplásticos e compostos orgânicos persistentes. Conforme discutido por Grobelak et al. (2024), a segurança ambiental dos produtos recuperados constitui um dos fatores determinantes para ampliação de aplicações agrícolas, energéticas e industriais. Dessa forma, o desenvolvimento de metodologias de monitoramento, critérios regulatórios e tecnologias de mitigação representa uma agenda relevante para pesquisas futuras, especialmente diante do aumento da complexidade dos contaminantes presentes nos sistemas de esgotamento sanitário.

Outra tendência observada na literatura refere-se à crescente integração entre diferentes tecnologias de recuperação de recursos. Estudos recentes indicam que sistemas híbridos capazes de combinar digestão anaeróbia, recuperação de nutrientes, produção de biochar, recuperação de materiais e aproveitamento energético tendem a apresentar maior potencial de circularidade quando comparados à adoção isolada de tecnologias específicas (WANG; NAKAKUBO, 2022; BASRI et al., 2025). Essa abordagem integrada representa uma das principais fronteiras para o desenvolvimento de estações de tratamento concebidas como verdadeiras unidades de recuperação de recursos, capazes de maximizar benefícios ambientais, energéticos e econômicos.

Entretanto, os desafios para consolidação da economia circular não se restringem às questões tecnológicas. Em muitos países, incluindo o Brasil, a gestão dos lodos ainda permanece fortemente associada a modelos convencionais de disposição final, refletindo uma lógica histórica voltada prioritariamente ao controle da poluição e não à recuperação de recursos (BAGHERI et al., 2023). Embora diversas tecnologias apresentem viabilidade técnica comprovada, sua implementação em larga escala depende da existência de condições regulatórias, institucionais e econômicas que favoreçam sua adoção.

No contexto brasileiro, destacam-se desafios relacionados à ausência de mercados consolidados para os produtos derivados dos lodos, à limitada integração entre os setores de saneamento, energia, agricultura e construção civil, bem como à necessidade de maior segurança regulatória para utilização dos materiais recuperados. Adicionalmente, fatores como custos logísticos, transporte, variabilidade das características dos resíduos e limitações de escala operacional podem influenciar diretamente a viabilidade das estratégias de recuperação de recursos. Essas barreiras ajudam a explicar por que muitas soluções permanecem restritas a estudos experimentais ou projetos-piloto, apesar dos resultados promissores observados na literatura.

Os resultados obtidos por Faria et al. (2025) demonstram a existência de setores potencialmente aptos a absorver materiais produzidos a partir dos lodos de ETA, especialmente na construção civil. Entretanto, permanecem limitadas as análises relacionadas à viabilidade econômica, aceitação do mercado, logística de distribuição e instrumentos regulatórios necessários para consolidar essas cadeias produtivas em escala nacional. De forma semelhante, embora os lodos de ETE apresentem elevado potencial para recuperação energética e reciclagem de nutrientes, sua inserção efetiva em modelos circulares depende do fortalecimento de mecanismos capazes de reconhecer e valorizar economicamente os benefícios ambientais decorrentes da recuperação de recursos.

Por fim, os estudos analisados sugerem que as futuras pesquisas deverão avançar progressivamente de uma abordagem centrada em tecnologias individuais para uma visão sistêmica da recuperação de recursos no saneamento. Mais do que identificar novas rotas de aproveitamento, será necessário compreender como integrar diferentes fluxos de resíduos, tecnologias, modelos de negócio e cadeias produtivas em estratégias capazes de maximizar benefícios ambientais, econômicos e sociais. Nesse cenário, a economia circular deixa de representar apenas um conceito orientador e passa a constituir uma estrutura estratégica para o planejamento dos sistemas de saneamento das próximas décadas, especialmente em um contexto de crescente pressão sobre recursos naturais, fortalecimento das exigências ambientais e expansão dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário.

CONCLUSÃO

A presente revisão evidenciou que os lodos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) e estações de tratamento de esgoto (ETEs) possuem elevado potencial para recuperação de energia, nutrientes, compostos químicos

e materiais de valor agregado, configurando-se como importantes recursos para a promoção da economia circular no setor de saneamento. Os estudos analisados demonstram que os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas ampliaram significativamente as possibilidades de aproveitamento desses resíduos, reduzindo sua associação exclusiva à disposição final e fortalecendo sua inserção em cadeias produtivas capazes de gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais.

Os resultados também evidenciaram que os lodos de ETA e ETE apresentam características distintas, porém complementares. Enquanto os lodos de ETE se destacam pelo potencial de recuperação energética e reciclagem de nutrientes, os lodos de ETA apresentam elevada aptidão para aplicações relacionadas à construção civil, produção de materiais, recuperação de coagulantes e reaproveitamento industrial. Essa complementaridade amplia as oportunidades de recuperação de recursos e reforça a necessidade de abordagens integradas capazes de maximizar o aproveitamento dos diferentes fluxos gerados pelos sistemas de tratamento.

A literatura analisada demonstra que a transição para modelos circulares já se encontra em andamento em diferentes países, impulsionada pela busca por maior eficiência no uso de recursos, redução das emissões de gases de efeito estufa, fortalecimento da segurança energética e mitigação dos impactos associados à disposição final de resíduos. Nesse contexto, a recuperação de recursos deixa de representar apenas uma alternativa tecnológica e passa a assumir papel relevante na transformação das estações de tratamento em unidades capazes de produzir energia, materiais e insumos de interesse econômico.

Para o contexto brasileiro, essa discussão torna-se particularmente relevante diante das metas de universalização dos serviços de saneamento e da consequente ampliação da geração de lodos prevista para as próximas décadas. A expansão da cobertura dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário tende a aumentar a pressão sobre os sistemas convencionais de gerenciamento de resíduos, historicamente baseados na disposição em aterros sanitários. Paralelamente, observa-se o fortalecimento das legislações ambientais, a crescente preocupação com a conservação dos recursos hídricos, a necessidade de redução das emissões associadas às atividades humanas e a limitação progressiva de áreas disponíveis para disposição final, fatores que reforçam a importância da adoção de estratégias mais sustentáveis para gestão dos lodos.

Embora desafios técnicos, econômicos, regulatórios e institucionais ainda estejam presentes, os estudos revisados indicam que muitas das soluções necessárias para recuperação de recursos já se encontram disponíveis ou em estágio avançado de desenvolvimento. Nesse cenário, as principais barreiras para a consolidação da economia circular no setor de saneamento parecem estar menos relacionadas à viabilidade tecnológica e mais associadas à criação de ambientes regulatórios favoráveis, ao fortalecimento de mercados consumidores para os produtos recuperados e à integração entre pesquisa, operadores de saneamento, setor produtivo e formuladores de políticas públicas.

Dessa forma, os lodos gerados em ETAs e ETEs não devem ser compreendidos apenas como resíduos a serem gerenciados, mas como fontes potenciais de energia, materiais, nutrientes e insumos capazes de contribuir para sistemas mais eficientes e sustentáveis. Em um cenário marcado pela crescente pressão sobre recursos naturais, pela ampliação das exigências ambientais e pela dificuldade crescente de expansão de áreas destinadas à disposição final de resíduos, a manutenção de modelos baseados exclusivamente em aterros sanitários tende a se tornar progressivamente menos compatível com os princípios da sustentabilidade e da economia circular.

O desafio das próximas décadas não será apenas ampliar a capacidade de tratamento dos resíduos gerados pelos sistemas de saneamento, mas incorporar efetivamente a recuperação de recursos como componente estruturante da gestão dos lodos. A forma como essa transição será conduzida poderá influenciar diretamente a capacidade do setor de responder às demandas por segurança hídrica, eficiência energética, conservação de recursos naturais e redução dos impactos ambientais, consolidando o saneamento como protagonista na construção de modelos de desenvolvimento mais circulares, resilientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAGHERI, M.; BAUER, T.; BURGMAN, L. E.; WETTERLUND, E. *Fifty years of sewage sludge management research: Mapping researchers' motivations and concerns*. Journal of Environmental Management, v. 325, p. 116412, 2023.

2. BASRI, S.; ORUGANTI, R. K.; PANDA, T. K.; BHATTACHARYYA, D. *Beyond conventional approaches: Sustainable valorization of sewage sludge – challenges and opportunities*. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 45, e01496, 2025.

3. ENEBE, N. L.; CHIGOR, C. B.; OBILEKE, K.; LAWAL, M. S.; ENEBE, M. C. *Biogas and Syngas Production from Sewage Sludge: A Sustainable Source of Energy Generation. Methane*, v. 2, n. 2, p. 192–217, 2023.

4. FARIA, A. A.; SILVA, L. R.; REIS, P. H. P.; SILVA, D. J.; OBRACZKA, M.; MAGALHÃES, M. S. Mapeamento de oferta e demanda de lodo de estações de tratamento de água na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Revista Internacional de Ciências, v. 15, n. 2, p. 77–89, 2025.

5. GOMES, S. D. C.; ZHOU, J. L.; ZENG, X.; LONG, G. *Water treatment sludge conversion to biochar as cementitious material in cement composite. Journal of Environmental Management*, v. 306, 114463, 2022.

6. GÓRKA, J.; CIMOCHOWICZ-RYBICKA, M.; POPROCH, D. *Sludge management at the Kraków-Płaszów WWTP—Case study. Sustainability*, v. 14, n. 13, p. 7982, 2022.

7. GROBELAK, A.; CAŁUS-MAKOWSKA, K.; JASIŃSKA, A.; KLIMASZ, M.; WYPART-PAWUL, A.; AUGUSTAJTYS, D.; BAOR, E.; SŁAWCZYK, D.; KOWALSKA, *A. Environmental impacts and contaminants management in sewage sludge-to-energy and fertilizer technologies: current trends and future directions. Energies*, v. 17, n. 19, p. 4983, 2024.

8. HAIDER, H.; GHUMMAN, A. R.; AL-SALAMAH, I. S.; ALHARBI, A.; EL-GHOUL, Y.; MARTUZA, M. A. *A strategic approach to sustainable wastewater management and reuse in Saudi Arabia. Environmental Research Communications*, v. 6, n. 7, p. 075009, 2024.

9. HU, M.; HU, H.; YE, Z.; TAN, S.; YIN, K.; CHEN, Z.; GUO, D.; RONG, H.; WANG, J.; PAN, Z.; HU, Z.-T. *A review on turning sewage sludge to value-added energy and materials via thermochemical conversion towards carbon neutrality. Journal of Cleaner Production*, v. 379, p. 134657, 2022.

10. KATHI, S.; SINGH, S.; YADAV, R.; SINGH, A. N.; MAHMOUD, A. E. D. *Wastewater and sludge valorisation: a novel approach for treatment and resource recovery to achieve circular economy concept. Frontiers in Chemical Engineering*, v. 5, p. 1129783, 2023.

11. LIMA, D.; LI, L.; APPLEBY, G. *A review of renewable energy technologies in municipal wastewater treatment plants (WWTPs). Energies*, v. 17, n. 23, p. 6084, 2024.

12. LIMA, E. A. F. L.; FILHO, D. A. S.; SCALIZE, P. S.; RODRIGUES, F. W. A.; OLIVEIRA, L. R. G.; MASCARENHA, M. M. A. Avaliação da viabilidade técnica do uso de lodo de estação de tratamento de água em camadas de cobertura de aterros sanitários. Scientia Plena, v. 22, n. 1, 2026.

13. MARTINS, S. F.; ESPERANCINI, M. S. T.; QUINTANA, N. R. G.; BARBOSA, F. S. Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP. Energia na Agricultura, v. 36, n. 2, p. 218-229, 2021.

14. MATTOSO, A. P.; CUNHA, S.; AGUIAR, J.; DUARTE, A.; LEMOS, H. *Valorization of water treatment sludge for applications in the construction industry: a review. Materials*, v. 17, n. 8, p. 1824, 2024.

15. MORA-LEÓN, A. G.; CASTRO-JIMÉNEZ, C. C.; SALDARRIAGA-MOLINA, J. C.; GARCÍA A., E. F.; CORREA-OCHOA, M. A. *Aluminium recovered coagulant from water treatment sludge as an alternative for improving the primary treatment of domestic wastewater. Journal of Cleaner Production*, v. 346, p. 131229, 2022.

16. RIJO, B.; NOBRE, C.; BRITO, P.; FERREIRA, P. *An overview of the thermochemical valorization of sewage sludge: principles and current challenges. Energies*, v. 17, n. 10, p. 2417, 2024.

17. RONDA, A.; HARO, P.; GOMEZ-BAREA, A. *Sustainability assessment of alternative waste-to-energy technologies for the management of sewage sludge. Waste Management*, v. 159, p. 52–62, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.025

18. SHAWALA, N. B. M.; RAZALI, N. A.; HAIROM, N. H. H.; YATIM, N. I. I.; RASI, N.; HARUN, M. H. C.; KASAN, N.; HAMZAH, S. *Parametric study of coagulant recovery from water treatment sludge towards water circular economy. Water Science and Technology*, v. 88, n. 12, p. 3142–3150, 2023. DOI: https://doi.org/10.2166/wst.2023.398

19. VIANA, P. B.; SILVA, G. M. M.; BASTOS, J. B. S.; MESQUITA, E. F. T. Produção de materiais sustentáveis a partir da reutilização de cinzas de lodo de efluentes: uma revisão sistemática de literatura. Conexões: Ciência e Tecnologia, v. 18, e022006, 2024.

20. VIDYARTHI, P. K.; ARORA, P.; BLOND, N.; PONCHE, J.-L. *Modelling and techno-economic assessment of possible pathways from sewage sludge to green energy in India. Journal of Environmental Management*, v. 366, p. 121856, 2024.

21. WANG, K.; NAKAKUBO, T. *Design of a sewage sludge energy conversion technology introduction scenario for large city sewage treatment plants in Japan: Focusing on zero fuel consumption. Journal of Cleaner Production*, v. 379, p. 134794, 2022.

22. WANG, K.; NAKAKUBO, T. *Strategy for introducing sewage sludge energy utilization systems at sewage treatment plants in large cities in Japan: A comparative assessment. Journal of Cleaner Production*, v. 316, p. 128282, 2021.