INFLUÊNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETA NA DEFINIÇÃO DE ROTAS DE APROVEITAMENTO E VALORIZAÇÃO

Isabella Pereira de Lima[(1)]
Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestranda em Engenharia Civil pela UFJF.
Lucas de Oliveira Duboc[(2)]
Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).
Carlos Breno Ferreira de Oliveira[(3)]
Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.
Lucas de Almeida Chamhum-Silva[(4)]
Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Diretor do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (CR ETES).

Endereço[(4)]**:** Rua Ceará, 1566, 11° andar, Funcionários – Belo Horizonte - MG - CEP: 30150-314 - Brasil - Tel: +55 (32) 98875-0525 - e-mail: lucas.chamhum@cretes.com.br

RESUMO

O lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETAs) representa um importante desafio para o setor de saneamento devido aos elevados volumes produzidos e à variabilidade de suas características físicas, químicas e microbiológicas. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a influência da caracterização do lodo de ETA na definição de alternativas de aproveitamento do resíduo. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura nacional e internacional, contemplando estudos de caracterização e aplicações do lodo em diferentes setores. Os resultados demonstraram que propriedades como teor de sólidos, granulometria, umidade, concentração de ferro e alumínio, matéria orgânica, pH e presença de microrganismos influenciam diretamente a viabilidade das rotas de aproveitamento. Observou-se que lodos com maior fração mineral apresentam potencial para aplicações na construção civil e em obras geotécnicas, enquanto materiais com maiores teores de matéria orgânica e nutrientes podem ser empregados como componentes de substratos agrícolas, desde que atendidos critérios ambientais e sanitários. Também foram identificadas aplicações em processos adsorventes e no co-tratamento em estações de tratamento de esgotos. Conclui-se que a caracterização do lodo constitui etapa fundamental para a seleção de estratégias de reaproveitamento alinhadas aos princípios da economia circular e da gestão sustentável de resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de ETA, Caracterização físico-química, Valorização de Resíduos.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água tratada no Brasil e no mundo tem impulsionado a expansão das Estações de Tratamento de Água (ETAs), que, por sua vez, geram volumes expressivos de resíduos sólidos denominados lodo de ETA. Estimativas nacionais indicam que para cada metro cúbico de água tratada são gerados entre 0,1% e 1% do volume em lodo, o que, na escala de operação das grandes ETAs brasileiras, representa milhares de toneladas de resíduo ao ano (Richter, 2001).

Esse resíduo é formado principalmente por partículas removidas da água bruta durante os processos de coagulação, floculação e sedimentação, associadas aos produtos da hidrólise dos coagulantes empregados, em geral, sais de alumínio (sulfato de alumínio, PAC) ou de ferro (cloreto férrico, sulfato ferroso clorado) (Richter, 2001). O resultado é um material de composição altamente variável, influenciado pelo tipo de manancial, pela sazonalidade, pelo tipo de coagulante e pelas condições operacionais da estação (Richter, 2001).

A ausência de uma regulamentação federal específica para o gerenciamento do lodo de ETA no Brasil, diferentemente do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE), que conta com a Resolução CONAMA n.º 498/2020, reforça a relevância de estudos que subsidiem práticas de caracterização, tratamento e reaproveitamento tecnicamente embasadas. Na prática, grande parte do lodo é descartada diretamente em corpos hídricos ou em aterros sanitários, o que além de inadequado ambientalmente, representa um desperdício de recursos com potencial de valorização (Morselli *et al*., 2022; Rossi *et al*., 2025).

Nesse cenário, diversas pesquisas nacionais e internacionais têm demonstrado que o lodo de ETA pode ser aproveitado em distintos setores, incluindo a construção civil (cerâmicas, concretos e argamassas), a agricultura (substratos para mudas e condicionamento de solos), a geotecnia (revestimento de aterros sanitários e melhoramento de solos), o co-tratamento em ETEs e a possibilidade de atuar como adsorvente de contaminantes. A viabilidade de cada rota, no entanto, está diretamente condicionada às características físico-químicas, mineralógicas e microbiológicas do resíduo (Tartari *et al*., 2011; Xu *et al*., 2020).

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo central analisar como as propriedades do lodo de ETA (obtidas por meio de caracterizações reportadas em variados estudos) influenciam a seleção e a viabilidade das diferentes rotas de aproveitamento. A partir de uma revisão da literatura nacional e internacional, buscou-se identificar os parâmetros de caracterização mais relevantes para cada alternativa de reaproveitamento, contribuindo para a consolidação de critérios técnicos que orientem a gestão sustentável desse resíduo.

3. METODOLOGIA UTILIZADA

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, desenvolvida com o objetivo de analisar a influência das características do lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs) na definição de alternativas de aproveitamento e valorização desse resíduo. A pesquisa foi fundamentada em publicações técnico-científicas nacionais e internacionais relacionadas à caracterização do lodo de ETA e às diferentes rotas de reaproveitamento reportadas na literatura.

O levantamento bibliográfico foi realizado em bases de dados científicas, incluindo Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SciELO e Portal de Periódicos CAPES, complementado por consultas a dissertações, teses, relatórios técnicos de instituições de pesquisa, companhias de saneamento e organismos internacionais com atuação nas áreas de tratamento de água e gestão de resíduos. Foram priorizados estudos que apresentassem resultados de caracterização física, química, microbiológica e mineralógica do lodo de ETA, bem como avaliações de seu emprego em aplicações agrícolas, geotécnicas, adsorventes, na construção civil, em recuperação de áreas degradadas e no co-tratamento em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs).

Após a seleção do material bibliográfico, procedeu-se à análise qualitativa das informações, organizando-se os resultados em dois eixos principais: (i) caracterização do lodo de ETA e (ii) alternativas de aproveitamento. A etapa final consistiu na correlação entre as propriedades identificadas na literatura e as respectivas rotas de aplicação, permitindo a elaboração de uma síntese das características que favorecem cada forma de aproveitamento e a discussão de seu potencial sob a perspectiva da gestão sustentável de resíduos e da economia circular.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETA

4.1.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas do lodo de ETA determinam diretamente seu comportamento durante o manejo operacional e condicionam as possibilidades de reaproveitamento. Em termos de coloração, o lodo varia do acastanhado ao avermelhado quando coagulantes férricos são utilizados, enquanto lodos produzidos com sais de alumínio tendem a apresentar coloração bege a marrom-claro; resíduos de cal mostram aspecto esbranquiçado (Ackah *et al*., 2018).

A granulometria é predominantemente fina, formada por conglomerados de partículas de distintos tamanhos com aparência porosa, unidas por forças fracas. Essa predominância de partículas finas confere ao lodo elevada superfície específica e tendência à formação de suspensões estáveis, dificultado os processos de sedimentação e adensamento sem o emprego de coagulantes ou floculantes adicionais (Tartari *et al*., 2011).

O teor de umidade do lodo fresco é usualmente muito elevado. Estudos nacionais reportam concentrações de sólidos suspensos totais (SST) em lodos *in natura* tipicamente baixas, da ordem de 4% (umidade de 94 a 99%), antes de etapas de adensamento e desaguamento, enquanto lodos submetidos a desaguamento mecânico podem alcançar teores de sólidos entre 16% e 18% ou mais (Roque; Montalvan; Boscov, 2021). Internacionalmente, Hsieh e Raghu (2008) relataram teores de sólidos entre 14,8% e 82% em resíduos desidratados de dez ETAs norte-americanas.

A densidade de grãos situa-se em valores próximos a 2,4–2,8 $g \cdot cm^{-3}$ para lodos mais minerais, enquanto lodos com maior fração orgânica exibem massa específica menor — valores próximos a 1,54 $g \cdot cm^{-3}$ têm sido reportados para lodos de alumínio (Ackah *et al*., 2018). A porosidade interna, com áreas superficiais que podem superar 100 $m^2 \cdot g^{-1}$, favorece a capacidade de adsorção, mas também pode dificultar a drenagem em leitos de secagem (Xu *et al*., 2020).

4.1.2. PROPRIEDADES QUÍMICAS

A composição química do lodo de ETA é determinada pela interação entre o coagulante utilizado e a qualidade da água bruta. A presença de metais residuais provenientes dos coagulantes, especialmente ferro e alumínio, constitui a marca mais evidente dessa matriz. Em ETAs que empregam coagulantes férricos, são comuns concentrações de ferro total superiores a 20.000 $mg \cdot L^{-1}$, podendo ultrapassar 50.000 $mg \cdot L^{-1}$ em períodos de estiagem (Rossi *et al*., 2025). Em ETAs que utilizam coagulantes a base de alumínio, os lodos podem conter entre 100.000 e 153.000 $mg.kg^{-1}$ de alumínio, enquanto lodos de cloreto férrico apresentam teores de ferro entre 170.000 e 182.600 $mg.kg^{-1}$ (Xu *et al*., 2020).

A matéria orgânica constitui outro componente relevante do ponto de vista químico e pode estar associada a compostos naturais presentes na água bruta, como ácidos húmicos e fúlvicos. No lodo analisado por Rossi *et al*. (2025), a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) foi de 0,74, indicando uma proporção elevada da fração volátil.

O pH do lodo de ETAs brasileiras tende a se manter na faixa neutra, com valores variando de 5,0 a 8,4, como resultado do equilíbrio entre a alcalinidade natural da água bruta e os produtos da hidrólise dos coagulantes. Lodos de sais metálicos (alumínio ou ferro) tendem a ser mais neutros ou levemente ácidos (pH entre 5,1 e 8,0), enquanto lodos de cal apresentam caráter mais alcalino, com pH próximo de 11,0 (Hsieh; Raghu, 2008). Esse

parâmetro é central para interpretações químicas, pois determina a solubilidade do ferro e do alumínio, o estado de oxidação predominante e a eficiência de processos de pós-tratamento.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um dos indicadores químicos mais utilizados para avaliar o potencial poluidor do lodo. O estudo de Rossi *et al*. (2025) mostrou valores bastante elevados, reportando médias de 17.306 mg·L^{-1}. Parâmetros traço como fósforo, manganês e sílica também apresentam importância agronômica e ambiental. O fósforo tende a ser sorvido pelos precipitados férricos e alumínicos, conferindo ao lodo elevada capacidade de adsorção de fósforo (CMAP), o que ao mesmo tempo representa um potencial para uso ambiental e uma limitação agronômica, pois reduz a disponibilidade desse nutriente para as plantas (Lucon, 2012).

4.1.3. PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS

A caracterização microbiológica do lodo de ETA é fundamental para compreender os riscos sanitários associados ao seu manejo e destinação final. Estudos nacionais evidenciam que o lodo proveniente de decantadores apresenta concentrações elevadas de microrganismos indicadores de contaminação fecal. Burgos *et al*. (2015) identificaram níveis expressivos de coliformes totais (14 × 10^6 NMP·100 mL^{-1}), *Escherichia coli* (4,8 × 10^5 NMP·100 mL^{-1}), *Enterococcus* spp. e *Clostridium* spp. no lodo bruto da ETA Tibagi, demonstrando que o lodo concentrado retém microrganismos em níveis muito superiores aos da água bruta.

Rossi *et al*. (2025) reportaram concentrações de *E. coli* variando de 8,4 × 10^3 a 2,53 × 10^6 UFC ·100 mL^{-1} em lodo de uma ETA da Zona da Mata Mineira, além de Esporos de Bactérias Aeróbias (EBA) variando de 1,53 × 10^5 a 1,60 × 10^7 UFC ·100 mL^{-1}. Esses organismos são reconhecidos como indicadores potenciais para a remoção de cistos de Giardia e oocistos de *Cryptosporidium*, evidenciando a relevância sanitária do monitoramento microbiológico. Internacionalmente, Turner *et al*. (2023) verificaram que a comunidade de microrganismos no lodo está diretamente ligada à qualidade da água bruta, influenciada pelo tipo de solo do local, tipo de água bruta e atividades antrópicas nas proximidades.

4.1.4. PROPRIEDADES MINERALÓGICAS

A composição mineralógica do lodo de ETA é determinada pela combinação entre as partículas argilosas e inorgânicas da água bruta e os precipitados resultantes da hidrólise dos coagulantes. Por meio de técnicas como difratometria de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX), estudos revelam que esses resíduos contêm misturas de minerais cristalinos (calcita, quartzo, feldspatos) e grande fração amorfa constituída por hidróxidos metálicos de alumínio e ferro (Ackah *et al*., 2018; Xu *et al*., 2020).

Em lodos de alumínio, predominam quartzo e fases amorfas de $Al(OH)_3$, frequentemente associadas a matéria orgânica, enquanto a presença dominante de calcita em lodos de cal explica sua forte alcalinidade. Em estudos com lodos da região nordeste do Brasil, foram identificados minerais como caulinita e quartzo, refletindo a formação geológica regional dos mananciais (Oliveira *et al*., 2023). A natureza pouco cristalina e a elevada área superficial conferem aos lodos alta capacidade de adsorção de fosfato, metais pesados e alguns micropoluentes emergentes (Xu *et al*., 2020).

4.2. ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO DO LODO DE ETA

4.2.1. CO-TRATAMENTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

O co-tratamento do lodo de ETA em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) representa uma das alternativas mais estudadas para a destinação ambientalmente adequada desse resíduo. A prática baseia-se na introdução do lodo de ETA no sistema de tratamento de esgoto, aproveitando a infraestrutura existente e os potenciais sinérgicos entre os resíduos.

Ao se avaliar o co-tratamento deve-se considerar aspectos importantes, como: fluxograma de tratamento do esgoto, folga hidráulica e de capacidade de sólidos da ETE receptora; monitoramento contínuo das concentrações de sólidos suspensos totais (SST) e metais, especialmente ferro e alumínio; sistema de equalização do lodo antes do lançamento, para evitar cargas de choque; e controle dos limites de carga mássica de sólidos, que em sistemas com digestão anaeróbia não deve ultrapassar 60 mg SST·L^{-1} no esgoto (Sena, 2011).

Marguti (2012) demonstrou, em estudo em escala real, que o co-tratamento de lodo de ETA em ETE por lodos ativados é tecnicamente viável. Embora a introdução do lodo tenha provocado aumento expressivo nas concentrações afluentes de ferro (aproximadamente cinco vezes superiores) e de fósforo (acréscimo da ordem de 50%), a ETE apresentou melhora na remoção global de sólidos, com concentrações de SST no efluente final cerca de 30% menores. A remoção de fósforo foi significativamente beneficiada, com redução da concentração no efluente de 2,7 mg·L^{-1} para 0,7 mg·L^{-1}, atribuída à presença de ferro no lodo da ETA.

Internacionalmente, Rebosura Jr. *et al*. (2020) demonstraram que a dosagem de lodo de ETA rico em ferro a 10 mg Fe·L^{-1} na linha de esgotos resultou em redução de sulfeto dissolvido no coletor do efluente tratado, queda na concentração de fósforo no efluente e melhoria da sedimentabilidade do lodo ativado (IVL reduzido de 193 para 108 mL·g^{-1}).

Do ponto de vista das características do lodo que favorecem essa rota, destacam-se: o alto teor de ferro ou alumínio (para remoção de fósforo e controle de sulfetos), a ausência de metais pesados acima dos limites regulatórios e a compatibilidade de concentração de sólidos com a capacidade da ETE receptora.

4.2.2. APLICAÇÃO NO SOLO — AGRICULTURA E SILVICULTURA

A aplicação de lodo de ETA no solo para fins agrícolas e silviculturais tem sido amplamente investigada como alternativa de aproveitamento que alia destinação ambientalmente adequada ao fornecimento de insumos para a produção vegetal. Para que essa rota seja viável, são necessários: atendimento aos critérios de metais potencialmente tóxicos estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 498/2020 (usualmente adaptada para o lodo de ETA); análise microbiológica para garantia de segurança sanitária; caracterização química para verificação da relação C/N, pH e teor de nutrientes; e definição de doses e espécies adequadas para evitar fitotoxidez (Morselli *et al*., 2022; Cunha; Stachiw; Quadros, 2020).

Cunha, Stachiw e Quadros (2020) avaliaram o lodo de ETA como componente de substrato para germinação de mudas florestais e evidenciaram respostas distintas entre espécies. Para o ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*), o tratamento com 45% de lodo apresentou germinação de 90,18%, enquanto o eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) mostrou maior sensibilidade, com melhores resultados obtidos apenas com 15% de incorporação. Cruz (2018) verificou que a combinação de 25% de lodo de ETA com 75% de lodo de ETE apresentou 100% de sobrevivência para aroeira-pimenteira e melhores índices de qualidade de mudas.

Uma limitação importante foi demonstrada por Lucon (2012): o lodo de ETA apresentou Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) de 16,3 mg·g^{-1}, podendo duplicar a capacidade do solo de reter fósforo e atuar

como dreno do nutriente. A fração de mineralização do nitrogênio orgânico foi de apenas 0,45%, indicando que praticamente todo o N presente no lodo permanece indisponível para as plantas.

As características do lodo que favorecem essa rota incluem: teores adequados de macronutrientes (Ca, Mg, K), matéria orgânica elevada, baixas concentrações de metais potencialmente tóxicos (arsênio, cádmio, chumbo abaixo dos limites regulatórios), pH próximo da neutralidade e relação SV/ST inferior a 0,70. Lodos com alta capacidade de adsorção de fósforo são mais indicados para solos já enriquecidos em P, atuando como agentes de sequestro do nutriente em vez de fertilizantes (Lucon, 2012).

4.2.3. RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

A aplicação do lodo de ETA em áreas degradadas, como cascalheiras, áreas de mineração e solos impactados por atividades antrópicas, aproveita suas propriedades de condicionamento físico-químico do solo para favorecer a revegetação e a estabilização geoquímica. Para essa rota, são necessários: avaliação da compatibilidade entre a composição do lodo e o tipo de contaminante presente na área degradada; monitoramento do lençol freático para verificar lixiviação de metais; complementação com fontes de matéria orgânica e nutrientes; e seleção de espécies vegetais tolerantes.

Teixeira, Melo e Silva (2005) demonstraram que a aplicação de lodo de ETA à base de cloreto férrico em solo degradado promoveu elevação expressiva do pH (de 5,5 para até 7,9), aumento dos teores de cálcio, magnésio e potássio extraíveis, e incremento no carbono orgânico total. Entretanto, também foi verificado aumento na condutividade eletrolítica, com risco de salinização em doses elevadas.

As propriedades que favorecem essa aplicação são: elevado teor de CaO (capacidade de neutralização da acidez), concentrações moderadas de metais (Fe, Al) que atuam imobilizando contaminantes presentes no solo degradado, capacidade de adsorção de fósforo (para solos com excesso desse nutriente) e textura fina para melhoria da retenção hídrica. Lodos com baixos teores de metais pesados regulamentados (Cd, Pb, As, Hg) apresentam maior segurança ambiental para essa aplicação (Morselli *et al*., 2022).

4.2.4. USO COMO MATERIAL ADSORVENTE

A elevada capacidade de adsorção do lodo de ETA, associada à presença de hidróxidos de ferro e alumínio com grande área superficial específica, posiciona esse resíduo como adsorvente de baixo custo para remoção de contaminantes em corpos hídricos e efluentes. Para uso como material adsorvente, as condições necessárias incluem: granulometria adequada (lodos mais finos apresentam maior eficiência cinética); pré-tratamento por secagem, moagem e, em alguns casos, ativação química ou térmica; e controle do pH do meio, que influencia diretamente a eficiência da adsorção.

Chao (2006) demonstrou remoção de até 100% do fósforo presente em efluentes, com concentrações reduzidas de 2,9 mg $P \cdot L^{-1}$ para 0,01 mg $P \cdot L^{-1}$, utilizando dosagem de 37 mg de lodo por litro, pH 4,5 e tempo de mistura de 15 minutos. Ritter (2020) verificou que o lodo fino (diâmetro inferior a 0,1 mm) apresentou eficiência de remoção de fósforo de aproximadamente 90% em sistemas de colunas de leito fixo, com vida útil estimada de 416 dias para 100 kg de material tratando efluente de wetland construído.

Para além do fósforo, estudos recentes expandiram as aplicações adsortivas. Martins (2021) avaliou a produção de adsorventes a partir do lodo de ETA para remoção de hormônios disruptores endócrinos (17β-estradiol e 17α-etinilestradiol), com eficiências de remoção variando entre 69,9% e 94,3%.

As características do lodo que favorecem essa rota são: alta área superficial específica (superior a 100 $m^2 \cdot g^{-1}$), predomínio de hidróxidos amorfos de Al ou Fe, granulometria fina e baixo teor de matéria orgânica interferente.

Lodos de alumínio são mais eficientes para adsorção de fósforo e fluoreto, enquanto lodos de ferro apresentam melhor desempenho na remoção de arsênio e metais pesados (Truong; Kim, 2021).

4.2.5. USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A incorporação do lodo de ETA na construção civil apresenta-se como alternativa de elevado potencial, especialmente em cerâmicas, concretos e argamassas. Para essa rota, as condições necessárias incluem: desaguamento e secagem prévia do lodo; moagem para padronização granulométrica; em alguns casos, calcinação ou sinterização a temperaturas específicas; e verificação da compatibilidade química com os demais materiais da mistura.

Em cerâmicas vermelhas, Silva (2025) demonstrou que teores de até 15% de substituição da argila por lodo de ETA resultaram em resistência à compressão de 41,33 MPa, valor significativamente superior aos mínimos exigidos para blocos estruturais. Kizinievič *et al*. (2013) verificaram que 5% de lodo rico em Fe_2O_3 em massas cerâmicas produziu corpos com resistência à compressão entre 48,5 e 53,8 MPa e absorção de água reduzida.

Em concretos, Hoppen *et al*. (2005) evidenciaram que teores de até 5% de lodo úmido mantêm desempenho compatível com aplicações estruturais, enquanto 10% é o limite operacional recomendado para não comprometer a trabalhabilidade e a absorção de água.

As propriedades do lodo que favorecem seu uso na construção civil são: composição mineralógica rica em sílica e alumínio (que conferem propriedades pozolânicas após calcinação), baixos teores de metais pesados que possam lixiviar na matriz cimentícia, granulometria fina compatível com agregados miúdos e textura que favorece a sinterização em cerâmicas. Lodos com maior teor de Fe_2O_3 contribuem para a coloração vermelha e para a resistência mecânica de cerâmicas, enquanto lodos de alumínio são mais adequados para aplicações cimentícias (Ackah *et al*., 2018).

4.2.6. APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS E EM ATERROS SANITÁRIOS

O emprego do lodo de ETA em camadas de aterros sanitários e em aplicações geotécnicas aproveita sua baixa permeabilidade, plasticidade e capacidade de adquirir resistência ao longo do tempo. A viabilidade dessa rota requer teor de sólidos totais superior a 50% para utilização como material de cobertura, ausência de características de periculosidade, granulometria semelhante à de solos argilo-siltosos e condutividade hidráulica preferencialmente inferior a 1×10^{-9} m·s^{-1} para aplicação como barreira impermeabilizante (*liner*).

Montalvan e Boscov (2019) demonstraram que a adição de lodo a solos arenosos lateríticos em proporções solo:lodo de 3:1 a 5:1 (em massa úmida) reduz significativamente a condutividade hidráulica, alcançando valores da ordem de 10^{-9} m·s^{-1}, compatíveis com revestimentos de fundo de aterros sanitários. Marçal *et al*. (2023) verificaram que o lodo da ETA Meia Ponte pode substituir o solo virgem como material de recobrimento em aterro sanitário em Aparecida de Goiânia, com boa trabalhabilidade em períodos secos e comportamento pastoso em períodos chuvosos, atuando como barreira hidráulica provisória.

Internacionalmente, Bashar *et al*. (2016) confirmaram similaridade mineralógica de aproximadamente 70% entre lodo de ETA e argila convencional utilizada em *liners*, com a caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) como mineral principal em ambos.

As características do lodo que favorecem aplicações geotécnicas são: baixa permeabilidade, comportamento tixotrópico (ganho de resistência com o tempo de repouso), granulometria fina que melhora a compacidade de solos arenosos, capacidade de adsorção que reduz a mobilidade de contaminantes em lixiviados e ausência de compostos orgânicos voláteis e metais em concentrações que ultrapassem os limites regulatórios (Tsugawa *et al*., 2019).

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 DESAFIOS NA GESTÃO DO LODO DE ETA

A gestão do lodo de ETA no Brasil enfrenta um conjunto de desafios que perpassam desde a fase de geração até a destinação final. A elevada variabilidade das características físico-químicas e microbiológicas do resíduo, condicionada pelo tipo de manancial, sazonalidade e coagulante empregado, impõe a necessidade de caracterizações periódicas e específicas para cada estação, inviabilizando a adoção de parâmetros únicos ou generalizados de gestão (Tartari *et al*., 2011).

O alto teor de umidade do lodo in natura (94% a 99%) representa um dos principais obstáculos operacionais, pois dificulta o transporte, aumenta o volume a ser gerenciado e eleva os custos com desaguamento e disposição final. Mesmo após tratamento mecânico (centrifugação ou filtro-prensa), os teores de sólidos raramente superam 25 a 30%, e o comportamento reológico do material, com alta compressibilidade e viscosidade, impõe desafios adicionais ao processo (Hsieh; Raghu, 2008).

Do ponto de vista ambiental, o descarte inadequado do lodo em corpos hídricos, prática ainda comum em parte das ETAs brasileiras, pode provocar impactos significativos, incluindo o aumento da turbidez, a introdução de patógenos e compostos adsorvidos (metais, pesticidas, micropoluentes) e a perturbação dos ecossistemas aquáticos. Rossi *et al*. (2025) alertam que o lançamento de lodo em corpos d'água a jusante de pontos de captação pode comprometer a qualidade da água bruta, elevando os custos operacionais do tratamento.

5.2 CORRELAÇÃO ENTRE CARACTERIZAÇÃO E ROTAS DE APROVEITAMENTO

A análise integrada dos estudos revisados permite estabelecer relações diretas entre as propriedades do lodo e a viabilidade das diferentes rotas de aproveitamento. O Quadro 1 sintetiza as principais características do lodo e as rotas de aproveitamento às quais estão mais associadas.

Quadro 1 - Correlação entre características do lodo de ETA e rotas de aproveitamento.

Característica do Lodo	Rota de Aproveitamento Favorecida	Referências
Alto teor de Fe ou Al (coagulante metálico)	Co-tratamento em ETE (remoção de P e S)	Marguti (2012); Rebosura Jr. *et al*. (2020)
Baixo teor de matéria orgânica, alta fração mineral	Construção civil (cerâmica, concreto, agregados)	Hoppen *et al*. (2005); Kizinievič *et al*. (2013)
Alta área superficial específica, hidróxidos amorfos de Al ou Fe	Adsorção (P, metais, corantes, hormônios)	Chao (2006); Ritter (2020)
Teores adequados de Ca, Mg, K; baixa concentração de metais regulados	Agricultura/Silvicultura (substrato, condicionador)	Cunha, Stachiw e Quadros (2020)
Alto teor de CaO, granulometria fina, pH elevado	Recuperação de áreas degradadas (correção de acidez)	Teixeira, Melo e Silva (2005)

Baixa permeabilidade (10^{-9} m/s), comportamento tixotrópico	Geotecnia e camadas de aterros sanitários	Montalvan; Boscov (2019); Marçal *et al*. (2023)
pH próximo da neutralidade, SV/ST < 0,70, metais abaixo dos limites legais	Aproveitamento agrícola (conformidade regulatória)	Morselli *et al*. (2022); CONAMA 498/2020

Fonte: elaboração própria.

A análise da tabela evidencia que não existe uma rota única de aproveitamento universal para o lodo de ETA. A escolha da alternativa mais adequada depende fundamentalmente do perfil de caracterização de cada lodo, que por sua vez reflete as especificidades do manancial, do coagulante e das condições operacionais de cada ETA. Lodos com forte predomínio mineral e alta área superficial são os mais versáteis, podendo ser direcionados tanto para adsorção quanto para a construção civil, enquanto lodos com maior fração orgânica e nutrientes têm maior potencial agrícola, mas exigem maior atenção ao risco sanitário.

Um aspecto transversal identificado nos estudos analisados refere-se à influência do coagulante empregado no tratamento da água sobre as características do lodo gerado e, consequentemente, sobre seu potencial de aproveitamento. Os resíduos provenientes de ETAs que utilizam sais férricos tendem a apresentar maiores concentrações de ferro e elevada afinidade por compostos fosfatados e sulfetados, favorecendo aplicações relacionadas ao co-tratamento em ETEs, à adsorção de fósforo e à imobilização de contaminantes em solos degradados (Marguti, 2012; Rebosura Jr. *et al*., 2020). Por outro lado, lodos oriundos da coagulação com sais de alumínio apresentam elevada capacidade de adsorção de fósforo e fluoreto, sendo frequentemente associados ao desenvolvimento de materiais adsorventes e a determinadas aplicações em materiais cimentícios (Truong; Kim, 2021). Dessa forma, a escolha do coagulante não influencia apenas o desempenho da ETA, mas também condiciona as possibilidades futuras de valorização do resíduo gerado, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada entre operação da estação e gestão do lodo.

Além da composição química, a composição mineralógica mostrou-se um fator determinante para a definição das rotas de aproveitamento. A recorrente identificação de minerais como caulinita, quartzo e óxidos de ferro em lodos de ETA sugere elevado potencial para aplicações em cerâmicas, concretos e materiais geotécnicos (Oliveira *et al*., 2023; Bashar *et al*., 2016), uma vez que esses constituintes apresentam comportamento semelhante ao de matérias-primas tradicionalmente utilizadas nesses setores. Paralelamente, a presença de hidróxidos amorfos de ferro e alumínio confere elevada área superficial específica ao material, favorecendo processos de adsorção de fósforo, metais e contaminantes emergentes. Esses resultados indicam que análises mineralógicas podem fornecer informações complementares relevantes à caracterização convencional, contribuindo para a seleção mais precisa das rotas de aproveitamento.

Os resultados também evidenciam que a definição da alternativa mais adequada não deve considerar apenas a viabilidade técnica da aplicação, mas também seu nível de maturidade tecnológica e operacional. Nesse contexto, o co-tratamento em ETEs destaca-se como uma das rotas mais consolidadas, por utilizar infraestrutura já existente e demandar adaptações relativamente simples. A incorporação do lodo na construção civil apresenta elevado potencial de absorção em larga escala, especialmente em regiões com forte atividade cerâmica e produção de materiais cimentícios. Em contrapartida, aplicações como a produção de adsorventes de alto desempenho, embora apresentem maior valor agregado e resultados promissores em estudos experimentais, ainda enfrentam desafios relacionados à escalabilidade, padronização do material e viabilidade econômica. O uso agrícola e silvicultural, por sua vez, depende fortemente do atendimento a critérios ambientais e sanitários, bem como do avanço de instrumentos regulatórios específicos.

Nesse cenário, a caracterização do lodo assume papel estratégico na construção de modelos de gestão baseados em economia circular. Em vez de tratar o resíduo como um material homogêneo destinado prioritariamente à disposição final, os resultados sugerem que diferentes perfis de lodo podem ser direcionados a rotas distintas de valorização, conforme suas propriedades predominantes. Essa abordagem possibilita maximizar benefícios ambientais e econômicos, reduzir a demanda por matérias-primas naturais e ampliar a recuperação de recursos no setor de saneamento, aproximando a gestão do lodo de ETA dos princípios atualmente adotados para outros resíduos industriais e urbanos.

Com base nas evidências levantadas, é possível propor uma hierarquização conceitual das rotas de aproveitamento do lodo de ETA considerando simultaneamente os critérios de maturidade tecnológica, potencial de absorção do resíduo, valor agregado e complexidade de implementação. Nesse contexto, o co-tratamento em ETEs e a incorporação na construção civil destacam-se como alternativas de maior maturidade e aplicabilidade imediata, devido à existência de infraestrutura consolidada e à elevada capacidade de absorção de grandes volumes de lodo. Em um nível intermediário situam-se as aplicações geotécnicas e a recuperação de áreas degradadas, que apresentam resultados promissores e viabilidade técnica já demonstrada, mas ainda dependem de maior disseminação prática e de regulamentações específicas. Por sua vez, o aproveitamento agrícola e silvicultural, embora apresente potencial ambiental relevante, demanda monitoramento contínuo e maior atenção aos aspectos agronômicos e sanitários. Finalmente, a utilização do lodo como adsorvente e precursor de materiais avançados representa a rota de maior valor agregado e potencial inovador, porém ainda associada a menores níveis de maturidade tecnológica e de aplicação em escala real. Essa hierarquização não deve ser interpretada como uma classificação fixa de desempenho, mas como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo direcionar diferentes perfis de lodo às alternativas mais compatíveis com suas características e com as condições técnicas, econômicas e regulatórias locais. Essa proposta de hierarquização é sintetizada na Figura 1, que apresenta de forma esquemática o posicionamento das principais rotas de aproveitamento do lodo de ETA em função de sua maturidade tecnológica e potencial de aplicação.

Figura 1 - Hierarquização conceitual das rotas de aproveitamento do lodo de ETA em função da maturidade tecnológica e do potencial de aplicação



Fonte: Elaboração própria.

5.3 LACUNAS NA LEGISLAÇÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

A ausência de regulamentação federal específica para a gestão do lodo de ETA no Brasil constitui uma das principais lacunas que dificulta a adoção sistêmica de rotas de aproveitamento. Enquanto o lodo de ETE dispõe da Resolução CONAMA n.º 498/2020 como marco normativo, o lodo de ETA é gerenciado com base em diretrizes gerais do CONAMA e normas da ABNT de aplicação transversal, o que gera insegurança jurídica e dificulta a aprovação de projetos de reaproveitamento pelos órgãos ambientais (Morselli *et al*., 2022).

Uma das perspectivas mais promissoras reside na integração do lodo de ETA aos princípios da economia circular, reconhecendo-o não como passivo ambiental, mas como insumo com valor agregado. Estudos recentes demonstram que a valorização do lodo pode gerar economias significativas: Cruz (2018) estimou redução de aproximadamente 21% nos custos operacionais ao destinar o lodo para recuperação de áreas degradadas em comparação ao envio para aterros sanitários, representando economia anual da ordem de R$ 3,5 milhões. Cruz (2018) quantificou benefícios de R$ 723.600,00·ano^{-1} ao substituir parcialmente o solo comercial em viveiros florestais.

No campo tecnológico, o desenvolvimento de materiais adsorventes modificados a partir do lodo de ETA; por ativação térmica, química ou produção de nanopartículas; representa um caminho promissor para ampliar significativamente a capacidade de remoção de contaminantes emergentes. Sharma e Ahammed (2023) registraram incrementos de até 30 vezes nas capacidades de adsorção de lodos modificados em comparação ao lodo bruto para alguns contaminantes. Essa vertente alinha-se à tendência global de valorização de resíduos de tratamento de água como precursores de materiais de alto desempenho.

6. CONCLUSÃO

A análise da literatura evidenciou que a caracterização do lodo de ETA constitui o principal elemento para a definição de estratégias de aproveitamento técnica e ambientalmente adequadas. A elevada variabilidade das características físicas, químicas, microbiológicas e mineralógicas desse resíduo impede a adoção de soluções generalistas, tornando indispensável a avaliação individualizada de cada material antes de sua destinação ou reaproveitamento.

Os estudos analisados demonstraram que diferentes propriedades do lodo condicionam sua aplicabilidade em distintas rotas de valorização, incluindo o co-tratamento em Estações de Tratamento de Esgotos, o uso agrícola e silvicultural, aplicações geotécnicas, processos adsorventes e a incorporação em materiais da construção civil. Dessa forma, a caracterização deixa de representar apenas uma etapa de diagnóstico e passa a atuar como ferramenta de suporte à tomada de decisão para a gestão sustentável desse resíduo.

Apesar do potencial identificado, a ampliação do aproveitamento do lodo de ETA ainda depende do avanço de instrumentos normativos específicos, da consolidação de critérios de qualidade e segurança ambiental e da geração de evidências em escala real que permitam avaliar o desempenho e os impactos de longo prazo das diferentes aplicações. Nesse contexto, a inserção do lodo de ETA em modelos de economia circular representa uma alternativa promissora para transformar um passivo ambiental em recurso, contribuindo para a sustentabilidade operacional dos sistemas de abastecimento de água e para a redução da disposição final de resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Regulatório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais – ARSAE-MG, à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACKAH, L. A.; GURU, R.; PEIRAVI, M.; MOHANTY, M.; MA, X.; KUMAR, S.; LIU, J. Characterization of Southern Illinois Water Treatment Residues for Sustainable Applications. *Sustainability*, v. 10, n. 5, p. 1374, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/su10051374.

2. BASHAR, N. A. M.; ZUBIR, Z. H.; AYOB, A.; ALIAS, S. Water treatment sludge as an alternative liner for landfill site: FTIR and XRD analysis. AIP Conference Proceedings, Melville, v. 1774, p. 030026-1–030026-8, 2016. DOI: 10.1063/1.4965082.

3. BURGOS, T. N. et al. Caracterização microbiológica e físico-química do lodo de decantadores das estações de tratamento de água após desaguamento em leito de drenagem com manta geotêxtil. *Revista Ciências da Saúde*, v. 17, n. 1, p. 17-24, jan./jun. 2015.

4. CHAO, I. R. S.. *Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água*. 2006. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

5. CONAMA. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Uso agrícola de lodos de esgoto e produtos derivados. DOU: Brasília, DF, 20 ago. 2020.

6. CRUZ, C. L. B. M. d.. *Estudo sobre a viabilidade de incorporação do lodo de estação de tratamento de água no substrato para produção de espécies nativas da Mata Atlântica* (Brasil). 2018. 138 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental: controle da poluição urbana e industrial) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

7. CUNHA, G. D.; STACHIW, R.; QUADROS, K. M. Lodo de estação de tratamento de água como componente para germinação de mudas florestais. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 1, p. 40–53, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0005.

8. HOPPEN, C. et al. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. *Cerâmica*, São Paulo, v. 51, n. 318, p. 85-95, jun. 2005. DOI: 10.1590/S0366-69132005000200003.

9. HSIEH, H. N.; RAGHU, D. Characterization of Water Treatment Residuals and Their Beneficial Uses. In: *GeoCongress* 2008: Geotechnics of Waste Management and Remediation. New Orleans: ASCE, 2008. p. 367–374.

10. KIZINIEVIC, O.; ZURAUSKIENE, R.; KIZINIEVIC, V.; ZURAUSKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. Construction and Building Materials, Oxford, v. 41, p. 464–473, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041.

11. LUCON, I. M.. *Uso agrícola do lodo gerado em estação de tratamento de água.* 2012. 138 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração em Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituto Agronômico, Campinas, 2012.

12. MARÇAL, D. R.; RODRIGUES, B. S. d. F.; FONSECA, B. V. d. S.; RESENDE, H. C. M. d.; BORGES, T. F. B.. Estudo de caso da utilização de lodo de ETA de ciclo completo como material de recobrimento em aterro sanitário em Aparecida de Goiânia (GO). Capítulo 19. [S.l.]: *Atena Editora*, 2023.

13. MARGUTI, A. L.. *Efeito do recebimento de lodos oriundos de estações de tratamento de água nos processos de tratamento de esgotos por lodos ativados convencional.* 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

14. MARTINS, D. S.. *Produção e caracterização de material adsorvente a partir de lodo de estação de tratamento de água para a remoção de disruptores endócrinos*. 2021. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2021.

15. MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G.. Investigação do comportamento geotécnico de misturas de areia argilosa laterítica com lodo da Estação de Tratamento de Água do Município de Cubatão para reaproveitamento em obras de terra. In: *CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE*, 30. (Encontro Técnico AESABESP), 2019, São Paulo. Anais... São Paulo: AESABESP, 2019.

16. MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. *Scientia Plena*, v. 18, n. 5, p. 1-10, 2022. DOI: 10.14808/sci.plena.2022.051701.

17. OLIVEIRA, S. F. M.; TENÓRIO, T. M.; MARQUES, S. K. J. Caracterização do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Palmeira dos Índios – Alagoas para potencial aplicação em massas cerâmicas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 4, e20230088, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0088.

18. REBOSURA JR., M.; SALEHIN, S.; PIKAAR, I.; KULANDAIVELU, J.; JIANG, G.; KELLER, J.; SHARMA, K.; YUAN, Z. Effects of in-sewer dosing of iron-rich drinking water sludge on wastewater collection and treatment systems. Water Research, Oxford, v. 171, p. 115396, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115396.

19. RICHTER, C. A. Tratamento de lodo de estação de tratamento de água. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

20. RITTER, M. T.. *Estudo do lodo de ETA contendo alumínio para a adsorção de fósforo de esgotos sanitários previamente tratados em wetlands construídos*. 2020. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

21. ROSSI, L. C.; PEREIRA, L. V.; SÁ, M. C. de; CORRÊA, C. P.; PEREIRA, R. de O. Caracterização do lodo de decantador de uma ETA localizada na Zona da Mata Mineira. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL* – ABES, 33., 2025, Brasília. Anais [...]. Brasília: ABES, 2025.

22. SENA, H. C. d.. *Recebimento de lodo de ETA em ETE por lodo ativado operando com mídia plástica no tanque de aeração (MBBR)*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

23. SHARMA, S.; AHAMMED, M. M. Application of modified water treatment residuals in water and wastewater treatment: A review. Heliyon, London, v. 9, e15796, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15796.

24. SILVA, I. C. d.. *Lodo de estação de tratamento de água como material suplementar para produção de materiais de construção civil*. 2025. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2025.

25. TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu-PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. *Caderno de Engenharia Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 17-28, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000300006.

26. TEIXEIRA, S. T.; MELO, W. J. d.; SILVA, É. T. d.. Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40, n. 1, p. 93–100, jan. 2005. DOI: 10.1590/S0100-204X2005000100013.

27. TRUONG, T. V.; KIM, D.-J. Phosphate removal using thermally regenerated Al adsorbent from drinking water treatment sludge. Environmental Research, v. 196, p. 110877, 2021. DOI: 10.1016/j.envres.2021.110877.

28. TSUGAWA, J. K.; ROMANO, R. C. d. O.; PILEGGI, R. G.; BOSCOV, M. E. G.. Caracterização das propriedades mecânicas do lodo de estação de tratamento de água visando seu reuso em obras de engenharia: abordagens geotécnica e reológica integradas. In: *CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE*, 30. (Encontro Técnico AESABESP), 2019, São Paulo. Anais... São Paulo: AESABESP, 2019.

29. TURNER, T.; TONGE, D.; GLANVILLE, H. C.; WHEELER, R.; OLIVER, I. W. Microbial genome (Illumina MiSeq) sequencing of drinking water treatment residuals to evaluate compatibility with environmental applications. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, 1027, 2023. DOI: 10.1007/s10661-023-11511-3.

30. XU, D.; LEE, L. Y.; LIM, F. Y.; LYU, Z.; ZHU, H.; ONG, S. L.; HU, J. Water treatment residual: a critical review of its applications on pollutant removal from stormwater runoff and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 2020, 109649. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109649.