DO PASSIVO AO RECURSO: OS DESAFIOS DA GESTÃO SUSTENTÁVEL DO LODO DE ESGOTO NO CONTEXTO URBANO

FROM ENVIRONMENTAL LIABILITY TO RESOURCE: CHALLENGES OF SUSTAINABLE SEWAGE SLUDGE MANAGEMENT IN URBAN CONTEXTS

GUILHERME PEREIRA VIEIRA DENEGGAI
UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA - UNIARA

GUILHERME ROSSI GORNI

Comunicação:
O XIV SINGEP foi realizado em conjunto com a 14th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com a SPARK (Society for Promoting Academic Research and Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

Agradecimento à orgão de fomento:
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)

DO PASSIVO AO RECURSO: OS DESAFIOS DA GESTÃO SUSTENTÁVEL DO LODO DE ESGOTO NO CONTEXTO URBANO

Objetivo do estudo
Analisar os desafios técnicos, ambientais, econômicos e institucionais relacionados à gestão sustentável do lodo de esgoto, examinando sua configuração como passivo ambiental urbano e as possibilidades de transformação em recurso mediante estratégias de valorização e reaproveitamento.

Relevância/originalidade
O estudo contribui para ampliar a compreensão do lodo de esgoto para além da perspectiva de resíduo, articulando passivo ambiental, tratamento adequado e economia circular Sua originalidade reside na análise integrada das condições que permitem transformar riscos ambientais em possibilidades de reaproveitamento.

Metodologia/abordagem
A pesquisa possui abordagem qualitativa, natureza exploratória e descritiva, fundamentada em pesquisa bibliográfica e documental. A análise foi organizada em quatro dimensões: formação do passivo, impactos ambientais, sanitários e territoriais, externalidades e possibilidades de valorização e reaproveitamento.

Principais resultados
Os resultados indicam que a caracterização do lodo como passivo decorre principalmente de deficiências de infraestrutura, planejamento, recursos e capacidade institucional. Identificaram-se possibilidades de valorização na agricultura, construção civil, recuperação de áreas degradadas e tecnologias de conversão, condicionadas à segurança ambiental.

Contribuições teóricas/metodológicas
O estudo articula as perspectivas de passivo ambiental, economia circular, externalidades e justiça socioambiental à gestão do lodo de esgoto. Metodologicamente, propõe uma análise integrada das dimensões ambientais, sanitárias, econômicas, territoriais e institucionais envolvidas na valorização do material.

Contribuições sociais/para a gestão
A pesquisa evidencia a necessidade de integrar a gestão do lodo ao planejamento do saneamento, evitando a transferência de riscos e custos à coletividade. Os resultados podem subsidiar decisões públicas sobre infraestrutura, regulação, monitoramento e seleção de alternativas sustentáveis de valorização.

Palavras-chave: Lodo de esgoto, Passivo ambiental, Gestão sustentável, Economia circular, Saneamento básico

FROM ENVIRONMENTAL LIABILITY TO RESOURCE: CHALLENGES OF SUSTAINABLE SEWAGE SLUDGE MANAGEMENT IN URBAN CONTEXTS

Study purpose
To analyze the technical, environmental, economic, and institutional challenges related to sustainable sewage sludge management, examining its characterization as an urban environmental liability and the possibilities of transforming it into a resource through valorization and reuse strategies.

Relevance / originality
The study contributes to broadening the understanding of sewage sludge beyond the waste perspective, articulating environmental liability, socio-environmental justice, and circular economy. Its originality lies in the integrated analysis of conditions that enable environmental risks to become opportunities for valorization.

Methodology / approach
The research adopts a qualitative, exploratory, and descriptive approach, based on bibliographic and documentary research. The analysis was organized into four dimensions: liability formation, environmental, health, and territorial impacts, externalities, and possibilities for sludge valorization and reuse.

Main results
The results indicate that sludge characterization as an environmental liability mainly results from deficiencies in infrastructure, planning, resources, and institutional capacity. Possibilities for valorization were identified in agriculture, construction, degraded-area restoration, and conversion technologies, subject to environmental safety requirements.

Theoretical / methodological contributions
The study integrates the perspectives of environmental liability, circular economy, externalities, and socio-environmental justice into sewage sludge management. Methodologically, it proposes an integrated analysis of the environmental, health, economic, territorial, and institutional dimensions involved in material valorization.

Social / management contributions
The research highlights the need to integrate sludge management into sanitation planning, preventing the transfer of risks and costs to society. The findings can support public decisions concerning infrastructure, regulation, monitoring, and the selection of sustainable sludge valorization alternatives.

Keywords: Sewage sludge, Environmental liability, Sustainable management, Circular economy, Basic sanitation

DO PASSIVO AO RECURSO: OS DESAFIOS DA GESTÃO SUSTENTÁVEL DO LODO DE ESGOTO NO CONTEXTO URBANO

1 Introdução

A expansão dos sistemas de saneamento básico e o aumento da capacidade de tratamento de esgotos representam avanços fundamentais para a proteção ambiental e para a promoção da saúde pública. Entretanto, o processo de tratamento dos efluentes não elimina integralmente os materiais potencialmente poluentes, transferindo parte significativa dos contaminantes e da matéria orgânica para o lodo de esgoto. Dessa forma, a ampliação da infraestrutura de saneamento, embora indispensável, também produz um desafio ambiental associado à necessidade de tratamento, manejo, armazenamento e destinação adequada desse material. O lodo de esgoto apresenta elevada umidade, matéria orgânica, nutrientes, microrganismos e, a depender de sua origem e do processo de tratamento empregado, contaminantes químicos potencialmente prejudiciais ao ambiente e à saúde humana (COELHO, 2023). Nesse sentido, a gestão do lodo constitui uma etapa inseparável da própria sustentabilidade dos sistemas de saneamento.

A problemática torna-se particularmente relevante no contexto urbano, no qual a geração contínua do lodo se confronta com limitações de infraestrutura, recursos financeiros, capacidade técnica e articulação institucional. A insuficiência de unidades destinadas à estabilização, desidratação e higienização do material, associada à ausência de planejamento integrado entre a expansão dos sistemas de coleta e tratamento e a gestão dos resíduos deles decorrentes, pode favorecer o acúmulo e a adoção de alternativas de destinação ambientalmente inadequadas (LOPES; MOTA FILHO, 2023). Nessas circunstâncias, um subproduto inevitável do tratamento de esgoto pode assumir características de passivo ambiental, produzindo riscos que ultrapassam os limites físicos das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e alcançam o solo, os recursos hídricos, os ecossistemas urbanos e a população.

A noção de passivo ambiental permite, nesse contexto, ampliar a compreensão do problema para além de sua dimensão estritamente operacional. Tradicionalmente associada às obrigações decorrentes de danos ambientais e aos custos necessários para sua reparação, mitigação ou compensação, essa categoria também apresenta relevância para a compreensão de processos urbanos nos quais a degradação ambiental resulta de déficits históricos ou atuais de infraestrutura e gestão (CASTRO et al., 2015). No caso do lodo de esgoto, contudo, é necessário evitar uma compreensão segundo a qual o material seria, por sua própria natureza, necessariamente um passivo ambiental. Sua geração é inerente ao funcionamento dos sistemas de tratamento; a condição de passivo está relacionada, sobretudo, à incapacidade de assegurar uma gestão adequada, segura e ambientalmente sustentável do material produzido. Assim, a problemática não reside apenas na existência do lodo, mas na distância entre sua geração contínua e a capacidade institucional, técnica e econômica de destiná-lo de maneira adequada.

Essa perspectiva conduz a uma questão igualmente relevante: se a inadequação da gestão pode transformar o lodo em passivo ambiental, a adoção de estratégias de tratamento e valorização pode permitir a transformação desse passivo potencial em recurso. A literatura tem apontado diferentes possibilidades de aproveitamento do lodo, incluindo sua utilização agrícola, aplicação na construção civil, recuperação de áreas degradadas e conversão por meio de tecnologias associadas à economia circular (SOUZA et al., 2020; COELHO, 2023; SILVA, 2025; SOUSA et al., 2025). Entretanto, tais alternativas não são isentas de riscos e não podem ser avaliadas exclusivamente segundo sua capacidade de absorver grandes volumes do material. A escolha da rota de aproveitamento deve considerar suas exigências técnicas, os riscos

ambientais e sanitários, a composição do lodo, os custos envolvidos, a segurança da população e a existência de instrumentos normativos e institucionais capazes de assegurar seu controle.

Além dos impactos ambientais diretos, a gestão inadequada do lodo apresenta uma dimensão social e territorial que não pode ser negligenciada. Os custos decorrentes da contaminação do solo e da água, da degradação ambiental, da exposição a agentes patogênicos e da recuperação de áreas afetadas podem ser transferidos para a coletividade quando não são adequadamente internalizados pelos agentes responsáveis. Nesse sentido, as externalidades ambientais associadas ao manejo inadequado do lodo podem produzir efeitos desiguais sobre o território, atingindo de maneira mais intensa áreas periféricas e populações em situação de vulnerabilidade e contribuindo para a reprodução de desigualdades socioambientais (MARTINS; ROSSIGNOLI, 2018; SILVA et al., 2025). A discussão sobre a gestão do lodo, portanto, envolve não apenas eficiência técnica, mas também justiça ambiental, governança urbana e distribuição dos custos e benefícios associados ao saneamento.

Diante desse cenário, o presente artigo parte do seguinte problema de pesquisa: quais são os principais desafios técnicos, ambientais, econômicos e institucionais para a transformação do lodo de esgoto, potencialmente caracterizado como passivo ambiental urbano, em recurso passível de valorização e reaproveitamento sustentável? Parte-se da hipótese de que a condição de passivo ambiental atribuída ao lodo não decorre exclusivamente de suas características intrínsecas, mas é intensificada por deficiências de planejamento, infraestrutura, capacidade institucional e gestão, de modo que estratégias de valorização podem contribuir para sua transformação em recurso, desde que submetidas a critérios de segurança ambiental e sanitária e a mecanismos adequados de regulação e controle.

O objetivo geral deste estudo é analisar os desafios relacionados à gestão sustentável do lodo de esgoto no contexto urbano, examinando as condições que contribuem para sua configuração como passivo ambiental e as possibilidades de sua transformação em recurso por meio de estratégias de reaproveitamento e valorização. Como objetivos específicos, busca-se: a) discutir o conceito de passivo ambiental aplicado ao lodo de esgoto; b) identificar os principais fatores técnicos, econômicos, institucionais e normativos que contribuem para a formação desse passivo; c) analisar os principais impactos ambientais, sociais e territoriais decorrentes de sua gestão inadequada; e d) examinar as principais alternativas de valorização e reaproveitamento do lodo, considerando seus potenciais benefícios, limitações e riscos.

A partir desses objetivos, o artigo procura demonstrar que a gestão do lodo de esgoto não deve ser reduzida à escolha de uma forma de disposição final, mas compreendida como parte integrante da política de saneamento e da gestão ambiental urbana. A superação da lógica centrada exclusivamente no descarte pressupõe a articulação entre proteção ambiental, segurança sanitária, viabilidade econômica, regulação e capacidade institucional, de modo a permitir que um material frequentemente tratado como problema residual do saneamento seja inserido, quando tecnicamente viável e ambientalmente seguro, em estratégias de valorização e economia circular.

2 Referencial Teórico

2.1 O passivo ambiental no contexto urbano

A compreensão do lodo de esgoto como potencial passivo ambiental exige, inicialmente, a delimitação do próprio conceito de passivo ambiental. Em sua concepção geral, o passivo ambiental está relacionado às obrigações decorrentes de impactos ou danos ambientais provocados por atividades humanas, cuja superação pode demandar medidas de reparação, mitigação, compensação ou recuperação ambiental (CASTRO et al., 2015). Trata-se, portanto,

de uma categoria que permite relacionar a ocorrência de alterações ambientais aos custos e às responsabilidades necessários para enfrentar suas consequências.

A origem do conceito também apresenta forte relação com a contabilidade ambiental. Nessa perspectiva, os passivos representam obrigações assumidas em decorrência de eventos passados, podendo envolver compromissos de curto ou longo prazo. Aplicado à questão ambiental, o conceito permite incorporar às decisões organizacionais os investimentos necessários para reduzir ou eliminar impactos ambientais decorrentes das atividades desenvolvidas (FIGUEIREDO JUNIOR; SANTOS, 2023). Essa abordagem possui relevância para a identificação e mensuração dos custos ambientais, mas sua aplicação ao espaço urbano exige uma ampliação conceitual.

Isso ocorre porque os problemas ambientais urbanos não estão necessariamente circunscritos à atividade de uma empresa ou a uma relação privada. A degradação pode decorrer da prestação de serviços públicos, da deficiência de infraestrutura, de processos históricos de ocupação territorial ou da ausência de políticas públicas adequadas, produzindo efeitos difusos que atingem a coletividade. Assim, o passivo ambiental urbano pode ser compreendido como uma situação de degradação, risco ou obrigação ambiental acumulada no território, cuja solução demanda a mobilização de recursos, responsabilidades e instrumentos de gestão pública.

Essa dimensão é particularmente relevante no saneamento. Os sistemas de tratamento de esgoto são estruturados com a finalidade de reduzir a carga poluidora lançada no ambiente e proteger os recursos naturais. Entretanto, o tratamento dos efluentes líquidos produz o lodo como um material residual que também precisa ser submetido a processos de tratamento, estabilização, armazenamento, transporte e destinação. Quando essa etapa não recebe planejamento e recursos compatíveis com a geração do material, pode ocorrer uma transferência do problema ambiental: reduz-se a carga poluidora do efluente, mas concentra-se parte dos contaminantes no lodo, criando uma nova necessidade de gestão.

Nesse sentido, o passivo ambiental não deve ser associado automaticamente à mera existência do lodo. A geração desse material constitui consequência inerente ao tratamento de esgoto e, portanto, não representa, por si só, uma situação de dano ambiental. O problema surge quando a capacidade de gestão não acompanha a geração do resíduo, produzindo acúmulo, disposição inadequada, riscos ambientais ou obrigações futuras de recuperação e controle. A caracterização do lodo como passivo decorre, portanto, da interação entre sua geração, suas características e as condições concretas de gestão.

Essa distinção permite superar uma interpretação puramente material do passivo ambiental. Mais do que identificar o lodo como um resíduo potencialmente poluente, é necessário compreender os processos institucionais, econômicos e técnicos que determinam se esse material será adequadamente manejado ou se passará a representar um problema ambiental persistente.

2.2 O lodo de esgoto entre resíduo e recurso

O lodo de esgoto apresenta características físico-químicas e microbiológicas que justificam a necessidade de tratamento e controle rigorosos. Sua composição pode incluir elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes, mas também microrganismos patogênicos, metais pesados e outros contaminantes cuja presença e concentração variam de acordo com a origem do esgoto e com as tecnologias empregadas no tratamento (COELHO, 2023).

Essa composição produz uma característica aparentemente paradoxal. De um lado, o lodo apresenta potencial poluidor e pode representar riscos ambientais e sanitários quando manejado inadequadamente. De outro, a presença de matéria orgânica e nutrientes confere ao material características que podem ser aproveitadas em diferentes processos produtivos. O

problema, portanto, não está apenas em determinar como eliminar o lodo, mas em identificar sob quais condições ele pode ser tratado, controlado e reinserido de maneira segura em outras atividades.

A abordagem tradicional baseada exclusivamente na disposição final tende a tratar o lodo como um resíduo cuja principal finalidade é ser retirado do sistema de saneamento. Entretanto, alternativas de reaproveitamento têm ampliado a compreensão do material, permitindo sua inserção em estratégias de valorização de resíduos. Souza et al. (2020), por exemplo, apontam possibilidades de utilização do lodo na produção de materiais destinados à construção civil, incluindo agregados leves, cimentos e concretos. A utilização nesses processos pode contribuir para a absorção de volumes significativos do material e, simultaneamente, reduzir a demanda por matérias-primas naturais.

O uso agrícola constitui outra possibilidade de valorização, especialmente em razão da presença de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. A utilização adequada pode contribuir para a melhoria das características físicas do solo e para a reciclagem de nutrientes, reduzindo potencialmente a dependência de insumos químicos. Entretanto, essa alternativa exige controle rigoroso, especialmente em relação à presença de metais pesados, agentes patogênicos e outros contaminantes, bem como ao tratamento prévio e ao cumprimento das normas ambientais aplicáveis (SILVA, 2025).

Também merece destaque a utilização do lodo na recuperação de áreas degradadas. Essa alternativa apresenta potencial para associar a destinação ambientalmente adequada do material à melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo, constituindo uma possibilidade de aproveitamento que deve ser avaliada segundo as características do local e do material empregado (COELHO, 2023).

A valorização do lodo, entretanto, não significa considerar todas as formas de reaproveitamento igualmente adequadas. Cada alternativa apresenta diferentes níveis de exigência técnica, riscos ambientais e sanitários e capacidade de absorção do material. A escolha da rota de aproveitamento deve, portanto, considerar a composição do lodo, o tratamento a que foi submetido, as características do ambiente receptor, os riscos envolvidos e os requisitos normativos aplicáveis.

Essa compreensão conduz a uma perspectiva segundo a qual o lodo pode ocupar posições distintas dentro da gestão ambiental: pode ser um resíduo que demanda destinação, pode constituir um passivo quando sua gestão é inadequada ou pode assumir a condição de recurso quando submetido a processos capazes de viabilizar sua valorização com segurança. A transição entre essas condições depende menos da simples natureza do material do que das estruturas técnicas, institucionais e regulatórias disponíveis para sua gestão.

2.3 Gestão sustentável, valorização e economia circular do lodo

A compreensão do lodo como potencial recurso aproxima sua gestão dos princípios da economia circular, cuja lógica procura superar o modelo linear baseado na extração de recursos, produção, consumo e descarte. Nesse contexto, materiais que anteriormente eram considerados resíduos podem retornar a processos produtivos, desde que existam condições técnicas e ambientais para sua reutilização.

No caso do lodo de esgoto, essa perspectiva é particularmente relevante porque a expansão dos sistemas de saneamento tende a aumentar a quantidade de material a ser gerenciado. A simples ampliação das soluções de disposição final pode representar uma estratégia insuficiente diante da necessidade de reduzir custos, riscos ambientais e consumo de recursos naturais. A valorização, por outro lado, permite considerar o lodo dentro de uma lógica de aproveitamento de seus componentes e de redução da quantidade destinada a alternativas de disposição.

Essa transformação, contudo, não pode ser orientada exclusivamente pela busca de valor econômico. O aproveitamento do lodo deve estar subordinado a critérios de segurança ambiental e sanitária. A presença de contaminantes químicos e biológicos pode limitar determinadas formas de utilização e exigir processos prévios de tratamento, higienização e monitoramento. Dessa forma, a economia circular aplicada ao saneamento não significa simplesmente reutilizar o máximo possível, mas identificar as formas de aproveitamento que apresentem equilíbrio entre benefícios e riscos.

A literatura também aponta possibilidades tecnológicas capazes de ampliar esse processo de valorização. Sousa et al. (2025) destacam, por exemplo, tecnologias como a pirólise, capazes de converter o lodo em produtos de maior valor agregado, incluindo biocarvão, biogás e bio-óleo. Essas alternativas indicam que o lodo pode ser inserido em cadeias tecnológicas distintas da simples disposição final, embora sua viabilidade dependa das características do material, dos custos de implantação e operação e das condições institucionais existentes.

A gestão sustentável do lodo, portanto, pressupõe uma abordagem integrada. A dimensão ambiental deve considerar a prevenção da contaminação e a proteção dos ecossistemas; a dimensão sanitária deve assegurar a redução dos riscos associados a patógenos e contaminantes; a dimensão econômica deve avaliar custos de tratamento, transporte, armazenamento e destinação; e a dimensão institucional deve considerar a capacidade dos responsáveis pelo saneamento de planejar, fiscalizar e monitorar as alternativas adotadas.

Essa integração é necessária porque soluções aparentemente mais econômicas no curto prazo podem produzir custos ambientais e sociais superiores no longo prazo. A ausência de internalização dos custos ambientais constitui uma forma de externalidade negativa, na medida em que os danos decorrentes de determinada atividade podem ser transferidos para terceiros ou para a coletividade (MARTINS; ROSSIGNOLI, 2018). No caso do lodo, a escolha de alternativas inadequadas pode reduzir despesas imediatas de gestão, mas gerar posteriormente custos relacionados à recuperação ambiental, à saúde pública e à perda da qualidade dos recursos naturais.

A sustentabilidade da gestão do lodo depende, portanto, da capacidade de superar essa lógica de transferência dos custos. Isso exige que os impactos ambientais sejam considerados no processo decisório e que as alternativas de valorização sejam avaliadas não apenas pelo potencial de geração de receita ou redução de despesas, mas também pela capacidade de reduzir riscos e produzir benefícios ambientais e sociais.

Nesse sentido, a passagem do passivo ao recurso não constitui uma transformação automática do material, mas um processo condicionado à existência de conhecimento técnico, infraestrutura, regulação, capacidade institucional e mecanismos de controle. A valorização sustentável do lodo representa, assim, uma possibilidade de reorientação da gestão do saneamento: em lugar de considerar o material exclusivamente como um problema residual a ser eliminado, passa-se a avaliá-lo como potencial recurso, sem desconsiderar os riscos que justificam seu controle.

Essa perspectiva constitui a base teórica para a análise desenvolvida nas seções seguintes, nas quais serão examinados os fatores que contribuem para a formação do passivo ambiental, seus impactos ambientais, sociais e territoriais e, posteriormente, as possibilidades e limitações das estratégias de valorização do lodo de esgoto no contexto urbano.

3 Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, desenvolvida por meio de pesquisa bibliográfica e documental, com abordagem interdisciplinar. A escolha desse percurso metodológico decorre da própria natureza do

problema investigado, que envolve aspectos ambientais, sanitários, econômicos, territoriais e institucionais relacionados à gestão do lodo de esgoto no contexto urbano.

A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir da análise de estudos científicos e produções acadêmicas relacionados ao tratamento e à gestão do lodo de esgoto, aos impactos ambientais decorrentes de sua destinação inadequada, às possibilidades de reaproveitamento e valorização do material e às perspectivas de economia circular. Foram consideradas, especialmente, as contribuições utilizadas na construção da dissertação que originou o presente artigo, incluindo estudos de COELHO (2023), SOUZA et al. (2020), LOPES e MOTA FILHO (2023), ARAUJO et al. (2022), SILVA (2025), SOUSA et al. (2025), entre outros autores mobilizados ao longo da análise.

A pesquisa documental, por sua vez, compreendeu a análise do conjunto normativo relacionado ao saneamento básico, à gestão de resíduos e à proteção ambiental, considerando sua pertinência para a definição das responsabilidades, dos critérios de manejo e das possibilidades de destinação do lodo de esgoto. A análise normativa foi utilizada de maneira complementar à revisão bibliográfica, permitindo relacionar os desafios técnicos e ambientais identificados na literatura aos instrumentos jurídicos e institucionais aplicáveis à gestão do material.

Quanto aos procedimentos de análise, o estudo foi organizado a partir de categorias temáticas previamente definidas em função do problema e dos objetivos da pesquisa. Foram consideradas quatro dimensões principais: a) formação do passivo ambiental; b) impactos ambientais, sanitários e territoriais decorrentes da gestão inadequada; c) externalidades e distribuição dos custos ambientais; e d) possibilidades de valorização e reaproveitamento do lodo.

A análise comparativa das alternativas de valorização considerou, ainda, três critérios principais: nível de exigência técnica, risco ambiental e sanitário e potencial de utilização. Esses critérios foram sistematizados a partir das informações encontradas na literatura analisada, permitindo estabelecer uma comparação qualitativa entre diferentes rotas de aproveitamento, especialmente o uso agrícola, a aplicação na construção civil e a recuperação de áreas degradadas.

A abordagem adotada não pretende estabelecer uma classificação universal das alternativas de aproveitamento do lodo, mas organizar os elementos encontrados na literatura para subsidiar a discussão sobre as condições necessárias à sua valorização. Desse modo, a análise considera que a viabilidade de determinada alternativa depende das características específicas do material, das condições ambientais do local de aplicação, da infraestrutura disponível, dos custos envolvidos e dos requisitos técnicos e normativos aplicáveis.

Por fim, a interpretação dos dados bibliográficos e documentais foi realizada de forma integrada, buscando identificar as relações existentes entre as limitações de gestão, a formação de passivos ambientais e as possibilidades de transformação do lodo em recurso. A opção por uma abordagem interdisciplinar permitiu, assim, ultrapassar uma análise exclusivamente técnica do saneamento e compreender o problema a partir da articulação entre proteção ambiental, segurança sanitária, eficiência econômica, gestão territorial e capacidade institucional.

4 Análise dos resultados e discussões

4.1 A formação do passivo ambiental do lodo de esgoto

A análise da literatura evidencia que a configuração do lodo de esgoto como passivo ambiental urbano não decorre simplesmente da quantidade de material produzida pelas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), mas da relação entre a geração contínua desse

subproduto e a capacidade disponível para seu tratamento, armazenamento, transporte e destinação ambientalmente adequada. Dessa perspectiva, o problema assume caráter estrutural: quanto maior a expansão dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto, maior tende a ser a necessidade de planejamento específico para o gerenciamento do lodo produzido.

Entre os fatores identificados na literatura, destaca-se inicialmente a insuficiência de infraestrutura destinada ao processamento do lodo. Embora determinadas ETEs apresentem capacidade adequada para o tratamento da fase líquida do esgoto, nem sempre dispõem de estruturas suficientes para estabilização, desidratação e higienização do material sólido. Essa assimetria pode produzir uma situação paradoxal: o aumento da eficiência do saneamento reduz a carga poluidora lançada nos corpos hídricos, mas simultaneamente amplia a quantidade de lodo que precisa ser administrada (LOPES; MOTA FILHO, 2023).

A formação do passivo também está relacionada à ausência de planejamento integrado. A expansão das redes de coleta e das unidades de tratamento precisa ser acompanhada por estratégias proporcionais para o manejo dos resíduos gerados. Quando isso não ocorre, a gestão do lodo passa a ser tratada como uma etapa secundária do saneamento, geralmente enfrentada apenas depois que surgem problemas de armazenamento ou destinação.

As limitações econômicas constituem outro elemento relevante. O gerenciamento adequado envolve custos relacionados à implantação e manutenção de estruturas específicas, ao consumo de energia, ao transporte, ao tratamento, ao monitoramento e à destinação. Em determinadas situações, a busca por redução dos custos imediatos pode favorecer soluções que aparentam ser economicamente vantajosas no curto prazo, mas transferem custos ambientais e sociais para períodos posteriores.

Esse aspecto é particularmente relevante porque o gerenciamento do lodo pode representar parcela expressiva dos custos operacionais de uma ETE. Estudos citados na pesquisa indicam que esses custos podem alcançar entre 20% e 60% dos custos operacionais totais, evidenciando que o lodo não constitui uma questão marginal dentro da estrutura econômica do saneamento (SILVA et al., 2022). Assim, estratégias de gestão inadequadas podem produzir simultaneamente ineficiência econômica e riscos ambientais.

A dimensão institucional também interfere diretamente na formação do passivo. A fragmentação de competências, a insuficiência de capacidade técnica, a ausência de monitoramento contínuo e a limitada articulação entre os atores responsáveis pelo saneamento dificultam a construção de soluções de longo prazo (LOPES; MOTA FILHO, 2023). O problema, portanto, não pode ser atribuído exclusivamente à inexistência de tecnologias disponíveis. Em muitos casos, o desafio consiste justamente em criar condições institucionais para que as tecnologias existentes possam ser implementadas e monitoradas.

A análise permite, portanto, sustentar que o lodo não deve ser considerado um passivo ambiental simplesmente por ser um produto resultante do tratamento de esgoto. Sua transformação em passivo está associada principalmente à existência de falhas na cadeia de gestão. Essa distinção é fundamental para a compreensão do problema, pois permite deslocar o debate de uma perspectiva centrada na eliminação do resíduo para uma perspectiva de gestão de riscos e valorização de recursos.

4.2 Impactos ambientais, sociais e territoriais da gestão inadequada

A inadequação da gestão do lodo pode produzir impactos que ultrapassam os limites físicos das ETEs. A literatura analisada demonstra que os principais efeitos ambientais concentram-se inicialmente no solo e nos recursos hídricos, mas também se projetam sobre os ecossistemas urbanos e sobre as condições de vida das populações próximas às áreas de armazenamento ou disposição.

No solo, a disposição inadequada pode favorecer a acumulação de metais pesados e compostos potencialmente tóxicos, além da introdução de microrganismos patogênicos. O aproveitamento em áreas agrícolas ou degradadas, por sua vez, não elimina esses riscos automaticamente. Conforme destacam Araujo et al. (2022, p. 825), "o aproveitamento em solos depende do beneficiamento do lodo de esgoto". A observação é relevante porque demonstra que a utilização do lodo como recurso está condicionada ao tratamento e ao controle de suas características.

Essa condição evidencia uma das principais tensões identificadas na pesquisa: o mesmo material que apresenta matéria orgânica e nutrientes potencialmente úteis pode também conter elementos capazes de produzir riscos ambientais e sanitários. A valorização, portanto, não pode ser confundida com utilização indiscriminada. O benefício ambiental somente ocorre quando os procedimentos de tratamento e controle conseguem reduzir os riscos a níveis compatíveis com a finalidade pretendida.

Os recursos hídricos também podem ser afetados quando o lodo é disposto ou armazenado de maneira inadequada. Processos de lixiviação podem transportar substâncias presentes no material para águas subterrâneas, enquanto o escoamento superficial pode levar partículas e nutrientes para rios, córregos e reservatórios. O excesso de nutrientes pode contribuir para processos de eutrofização, enquanto a presença de matéria orgânica e microrganismos patogênicos amplia os riscos à qualidade da água (BERTONCINI; MATTIAZZO, 1999; SANEPAR, 1999; SILVA; MONTEGGIA; CATANEO, 2017).

A dimensão sanitária reforça a gravidade desse problema. Mesmo após os processos de tratamento, o material e os efluentes relacionados ao saneamento podem apresentar microrganismos capazes de representar riscos à saúde. Silva, Monteggia e Cataneo (2017, p. 264) observam que "mesmo após ser submetido a tratamento, o efluente dificilmente estará isento de microrganismos patogênicos". No caso do lodo, essa característica reforça a necessidade de tratamento, higienização e monitoramento antes de qualquer forma de reaproveitamento.

Os impactos também assumem dimensão urbana. Áreas utilizadas para armazenamento ou disposição inadequada podem sofrer degradação ambiental, emissão de odores, proliferação de vetores e perda de qualidade paisagística. Quando localizadas próximas a áreas residenciais, essas consequências deixam de ser exclusivamente ambientais e passam a afetar diretamente o bem-estar da população.

Nesse ponto, a análise territorial revela que os impactos não são necessariamente distribuídos de maneira uniforme. A concentração de atividades ambientalmente indesejadas em áreas periféricas ou com menor valor econômico pode fazer com que determinados grupos sociais sejam expostos a riscos superiores. A gestão do lodo passa, portanto, a integrar uma problemática mais ampla de justiça ambiental.

A presença de passivos ambientais também pode produzir efeitos econômicos indiretos, como desvalorização imobiliária, restrição de usos do solo e necessidade futura de recuperação de áreas degradadas. Assim, os efeitos da gestão inadequada não se limitam ao momento da disposição do material: podem permanecer no território e gerar custos durante períodos prolongados.

4.3 Externalidades ambientais e desigualdades urbanas

A análise dos impactos permite identificar uma segunda característica estrutural da problemática: parte significativa dos custos decorrentes da gestão inadequada do lodo pode ser transferida para terceiros. Trata-se de uma situação que pode ser compreendida por meio do conceito de externalidade ambiental.

Martins e Rossignoli (2018, p. 142) definem que “as externalidades negativas em matéria ambiental são danos gerados a terceiros”, destacando sua relação com a necessidade de internalização dos custos ambientais. Aplicada ao lodo de esgoto, essa perspectiva demonstra que os custos associados à contaminação do solo, à degradação dos recursos hídricos, aos riscos sanitários e à recuperação de áreas afetadas não necessariamente permanecem restritos ao operador do sistema de saneamento.

Essa transferência pode ocorrer de diferentes formas. Uma solução de baixo custo imediato pode reduzir as despesas operacionais do responsável pela gestão do lodo, mas gerar posteriormente custos de recuperação ambiental, tratamento de água, controle de doenças ou perda de qualidade territorial. O aparente ganho econômico privado ou institucional no curto prazo pode, assim, produzir um custo social superior no longo prazo.

A externalização dos custos também possui dimensão territorial. Conforme observado na literatura, áreas periféricas e populações socialmente vulneráveis podem apresentar maior exposição a determinados riscos ambientais, especialmente quando atividades potencialmente impactantes são localizadas em territórios com menor capacidade de mobilização política e institucional (SILVA et al., 2025). A distribuição desigual dos riscos demonstra que a gestão do lodo constitui também uma questão de justiça socioambiental.

Nesse contexto, o princípio da internalização dos custos ambientais assume relevância para a gestão pública. A adoção de tecnologias de tratamento, mecanismos de fiscalização, monitoramento e alternativas de valorização pode representar custos imediatos, mas esses investimentos devem ser confrontados com os custos ambientais e sociais que podem ser evitados.

A perspectiva econômica, portanto, não deve ser reduzida à comparação entre o preço de diferentes formas de destinação. Uma avaliação efetivamente sustentável deve considerar também os custos ambientais evitados, os riscos sanitários reduzidos, a conservação dos recursos naturais e os benefícios decorrentes do reaproveitamento do material.

4.4 Do passivo ao recurso: possibilidades e limites da valorização

A identificação dos fatores que contribuem para a formação do passivo e dos impactos decorrentes de sua gestão inadequada conduz à necessidade de avaliar alternativas capazes de romper esse ciclo. Nesse ponto, a literatura analisada indica que o lodo de esgoto pode deixar de ser considerado exclusivamente um material destinado ao descarte e assumir a condição de recurso potencial, desde que submetido a tratamento e controle compatíveis com a finalidade de utilização.

Entre as principais alternativas identificadas destacam-se o uso agrícola, a aplicação na construção civil e a recuperação de áreas degradadas. Cada uma dessas rotas apresenta diferentes níveis de exigência técnica, riscos e potencial de aproveitamento. O uso agrícola apresenta potencial elevado em razão da presença de matéria orgânica e nutrientes, mas demanda controle sanitário rigoroso, sobretudo diante da possibilidade de presença de patógenos e contaminantes químicos (SILVA, 2025).

A construção civil apresenta outra possibilidade de valorização, especialmente em razão da capacidade do setor de absorver grandes quantidades de materiais. Estudos indicam possibilidades de utilização do lodo na produção de agregados, cimentos e concretos, contribuindo para a substituição parcial de matérias-primas convencionais (SOUZA et al., 2020). Entretanto, também nesse caso a viabilidade depende da composição do material, dos tratamentos prévios e da adequação técnica da aplicação pretendida.

A recuperação de áreas degradadas constitui uma terceira possibilidade relevante. A utilização controlada do lodo pode associar a destinação do material à recuperação das

propriedades do solo, desde que observados os requisitos técnicos e ambientais necessários (COELHO, 2023).

A literatura mais recente também aponta possibilidades tecnológicas associadas à conversão do lodo em produtos de maior valor agregado. Sousa et al. (2025) destacam o potencial de processos como a pirólise para a produção de biocarvão, biogás e bio-óleo. Essas tecnologias ampliam o horizonte de valorização do material e aproximam sua gestão dos princípios da economia circular.

Entretanto, a análise comparativa demonstra que não existe uma solução universalmente adequada. A rota de valorização deve ser escolhida de acordo com as características do lodo, a finalidade pretendida, os riscos ambientais e sanitários, a infraestrutura disponível e os requisitos normativos.

A agricultura, por exemplo, apresenta elevado potencial de aproveitamento, mas também elevado nível de exigência técnica e sanitária. A construção civil pode apresentar menor risco biológico em determinadas aplicações e capacidade de absorção de volumes significativos, mas depende de requisitos técnicos específicos. A recuperação de áreas degradadas pode apresentar potencial relevante de utilização, desde que as características do solo e do material sejam compatíveis com a intervenção.

Essa diversidade demonstra que a transformação do lodo de passivo em recurso não significa simplesmente substituir o descarte pelo reaproveitamento. Trata-se de uma decisão de gestão que deve considerar a relação entre risco e benefício em cada contexto.

A economia circular, nesse sentido, oferece uma perspectiva promissora, mas sua aplicação ao lodo deve ser acompanhada de critérios de segurança. O objetivo não deve ser apenas retirar o material da condição de passivo, mas encontrar formas de utilização capazes de produzir benefícios ambientais e econômicos sem transferir os riscos para outro compartimento ambiental ou para outro grupo social.

A análise desenvolvida permite concluir, portanto, que a gestão sustentável do lodo depende da superação de uma lógica predominantemente reativa, na qual o problema é enfrentado apenas depois da formação do estoque ou da ocorrência do impacto. A alternativa mais consistente consiste em integrar o planejamento da geração, o tratamento, a destinação e a valorização do lodo desde a concepção dos sistemas de saneamento.

Dessa perspectiva, a passagem “do passivo ao recurso” representa menos uma mudança na natureza física do material do que uma mudança na forma como ele é concebido e administrado. O lodo pode representar um passivo quando sua gestão produz riscos, custos e danos transferidos à coletividade; mas pode assumir a condição de recurso quando submetido a processos capazes de aproveitar suas características sem comprometer a proteção ambiental e sanitária. A efetivação dessa transição, entretanto, depende da articulação entre infraestrutura, tecnologia, planejamento, regulação, capacidade institucional e avaliação dos custos e benefícios ambientais.

5 Conclusões

A análise desenvolvida ao longo deste estudo permitiu compreender que a gestão do lodo de esgoto constitui um dos desafios contemporâneos associados à expansão dos sistemas de saneamento básico. Embora o tratamento de esgoto seja indispensável à proteção ambiental e à saúde pública, sua própria operação produz um subproduto que, quando não adequadamente tratado, armazenado e destinado, pode gerar novos riscos ambientais, sanitários, econômicos e territoriais.

Nesse sentido, verificou-se que a caracterização do lodo como passivo ambiental não decorre exclusivamente de sua composição ou de sua geração contínua. O passivo é produzido, sobretudo, pela combinação entre a geração do material e a insuficiência das estruturas, dos

recursos, do planejamento e dos mecanismos institucionais destinados ao seu gerenciamento. A insuficiência de infraestrutura, as limitações econômicas, a fragmentação institucional e a ausência de planejamento integrado contribuem para que um subproduto inevitável do saneamento seja convertido em fonte de riscos e custos para a coletividade.

Os resultados também demonstraram que os impactos decorrentes da gestão inadequada são multidimensionais. A contaminação do solo, a degradação dos recursos hídricos, a presença de agentes patogênicos, a emissão de odores, a proliferação de vetores e a degradação de áreas urbanas e periurbanas evidenciam que o problema não pode ser reduzido à escolha de um local para disposição final. Trata-se de uma questão que envolve a própria sustentabilidade dos sistemas urbanos e a capacidade de prevenção dos riscos ambientais e sanitários.

A análise das externalidades permitiu identificar, ainda, que os custos decorrentes de uma gestão inadequada podem ser transferidos para a sociedade, para determinados territórios e para as gerações futuras. Essa transferência é particularmente relevante quando os impactos recaem de forma desproporcional sobre populações socialmente vulneráveis. Dessa forma, a gestão do lodo também deve ser compreendida como uma questão de justiça ambiental e de distribuição dos custos e benefícios associados ao saneamento.

Por outro lado, a pesquisa demonstrou que o lodo não precisa permanecer restrito à condição de resíduo destinado ao descarte. A literatura analisada aponta diferentes possibilidades de valorização, incluindo o uso agrícola, a aplicação na construção civil, a recuperação de áreas degradadas e alternativas tecnológicas associadas à produção de materiais e energia. Essas possibilidades aproximam a gestão do lodo dos princípios da economia circular e permitem transformar um problema ambiental em oportunidade de geração de valor.

Entretanto, a transformação do passivo em recurso não deve ser compreendida como simples substituição da disposição final pelo reaproveitamento. Cada alternativa apresenta diferentes níveis de exigência técnica, riscos ambientais e sanitários e potencial de utilização. O uso agrícola, por exemplo, demanda elevado controle sanitário e ambiental; a aplicação na construção civil depende da adequação das características do material aos processos produtivos; e a recuperação de áreas degradadas exige compatibilidade entre o lodo, o solo e a finalidade da intervenção. Assim, a valorização somente pode ser considerada sustentável quando precedida de caracterização, tratamento, controle e monitoramento adequados.

Dessa forma, o problema central identificado não consiste simplesmente em “o que fazer com o lodo”, mas em como estruturar sistemas de gestão capazes de impedir que sua geração inevitável se transforme em passivo ambiental. Essa mudança de perspectiva é fundamental para o planejamento do saneamento, pois desloca a gestão do lodo de uma posição secundária para uma dimensão estratégica do próprio sistema de tratamento de esgoto.

Conclui-se, portanto, que a transição do passivo ao recurso depende de uma abordagem integrada, capaz de articular dimensões ambientais, sanitárias, econômicas, jurídicas, tecnológicas e territoriais. A adoção de soluções sustentáveis exige investimentos em infraestrutura, planejamento de longo prazo, capacidade técnica, fiscalização, monitoramento e desenvolvimento de tecnologias de valorização, além da definição de critérios que permitam selecionar a alternativa mais adequada para cada contexto.

A principal contribuição deste estudo consiste, assim, em evidenciar que a sustentabilidade da gestão do lodo não pode ser avaliada exclusivamente pela eficiência do tratamento do esgoto líquido. Um sistema de saneamento somente pode ser considerado ambientalmente adequado quando também possui capacidade de administrar de forma segura e eficiente os resíduos produzidos pelo próprio processo de tratamento. Sob essa perspectiva, enfrentar o passivo existente e evitar a formação de novos passivos constituem partes inseparáveis de uma política de saneamento ambientalmente sustentável.

Por fim, embora as alternativas de valorização apresentem perspectivas promissoras, sua implementação demanda estudos específicos sobre viabilidade técnica, econômica,

ambiental e institucional em diferentes realidades urbanas. Pesquisas futuras poderão aprofundar a análise comparativa dessas alternativas e avaliar sua aplicabilidade em municípios de diferentes portes, contribuindo para a construção de modelos de gestão capazes de conciliar redução de riscos, eficiência econômica, proteção ambiental e aproveitamento dos recursos presentes no lodo de esgoto.

6 Referências

ARAÚJO, Vanessa dos Santos et al. Lodo de esgoto e suas potencialidades agrícolas. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 3, e14711326200, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26200.

BERTONCINI, E. I.; MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 737–744, 1999.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

CASTRO, Alfred Luciano Fabio Gomes de; SILVA, Orlando Rodrigues da; SCALIZE, Paulo Sergio. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. *Multi-Science Journal*, v. 1, n. 2, p. 66–73, 2015.

COELHO, Lucas Augusto Pedroso. *O lodo de esgoto sanitário e a sua aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

CORINO, Cristiane Bortoluzzi; DILL, Paulo Roberto Jaques. O passivo ambiental e suas implicações jurídicas no mundo contemporâneo: a lacuna jurídico-normativa no direito brasileiro e proposições. *Revista de Direito Ambiental*, v. 110, p. 71–98, abr./jun. 2023.

FIGUEIREDO JUNIOR, Agnaldo Lima de; SANTOS, Gleidneide Evangelista dos. Passivos ambientais: conceitos e aplicações – uma revisão de literatura. In: *MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS: concepções, fundamentos, teorias e práticas mitigadoras*. v. 1. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2023. ISBN: 978-65-5360-384-4.

LOPES, Bruna Coelho; MOTA FILHO, César Rossas. Nota Técnica 9 – Considerações sobre a disposição de lodo de estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto. *Cadernos Técnicos de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 3, n. 4, p. 113–123, 2023.

MARTINS, Regina Célia Carvalho de; ROSSIGNOLI, Marisa. Desenvolvimento econômico sustentável e as externalidades ambientais. *Direito e Desenvolvimento*, João Pessoa, v. 9, n. 2, p. 137–154, ago./dez. 2018.

SILVA, Anderson Soares da; BALBINO, Carlos Marcelo; SILVA, Jannaina Sther Leite Godinho; SOUSA, Renato Philipe de. O processo de poluição dos rios por metais pesados e as intervenções antrópicas nos ecossistemas: uma reflexão teórica. *Revista Aracê*, São José dos Pinhais, v. 7, n. 11, p. 1–14, 2025. DOI: https://doi.org/10.56238/arev7n11-127.

SILVA, Dionatan Ruan da. *Lodo de esgoto como alternativa sustentável: traços da agricultura moderna*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde, 2025.

SILVA, Maria Cristina de Almeida; MONTEGGIA, Luiz Olinto; CATANEO, Indianara. Avaliação da qualidade microbiológica de efluentes sanitários tratados por sistemas de lodos ativados. *Caderno Pedagógico*, Lajeado, v. 14, n. 1, p. 257–266, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.22410/issn.1983-0882.v14i1a2017.1499.

SOUSA, Anderson Aldelyan Ramalho de; DANTAS, Joelda; PEREIRA, Lucas Vinicius Borges; SILVA, Kelly Cristiane Gomes da. Lodos de ETA: uma revisão bibliométrica e sistemática sobre conversão termoquímica para bioprodutos e sustentabilidade. *Revista Aracê*, São José dos Pinhais, v. 7, n. 3, p. 14654–14677, 2025. DOI: https://doi.org/10.56238/arev7n3-260.

SOUZA, Maelson Mendonça de et al. Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura. *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0922.

ZIMMER, Aloísio. *Direito administrativo do saneamento: um estudo a partir do Novo Marco Legal (Lei 14.026/2020): Novo Marco Legal do saneamento básico*. 1. ed. Porto Alegre: Aloisio Zimmer Junior; Ana Paula Mella Vicari, 2021.