

## Aproveitamento agrícola do lodo de esgoto e seus impactos socioambientais e econômicos no Noroeste do Paraná

### *Agricultural utilization of sewage sludge and its socioenvironmental and economic impacts in Northwestern Paraná*

**Marco Aurelio Knopik<sup>1</sup>, Francielli Gasparotto<sup>2</sup>, Márcia Aparecida Andreazzi<sup>3</sup>, Isabele Picada Emanuelli<sup>4</sup>, Fábio Luiz Bim Cavalieri<sup>5</sup>**

**RESUMO:** O estudo avaliou os aspectos agrônômicos, econômicos e socioambientais da destinação agrícola de lodo de esgoto gerado nas estações de tratamento de esgoto da região noroeste do Paraná, entre 2016 e 2019. Foram analisados 73 lotes distribuídos em 236 projetos agrícolas, considerando parâmetros de qualidade do lodo, composição química, aplicação em solo, valoração econômica e indicador socioambiental. O lodo foi higienizado por estabilização alcalina prolongada com adição de cal, e sua aplicação foi monitorada quanto ao aporte de macronutrientes, secundários e micronutrientes, eficiência de reciclagem e atendimento aos agricultores. Os resultados evidenciaram elevada concentração nos lotes de carbono orgânico, cálcio e magnésio, com aporte significativo de nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre, promovendo melhoria da fertilidade do solo e aporte de carbono. O uso agrícola proporcionou economia média de R\$ 702 a R\$ 1088 por hectare, aumento de produtividade em culturas como soja e citros e alto percentual de reciclagem agrícola, com baixo encaminhamento a aterros. Concluiu-se que a prática representa estratégia sustentável, integrando gestão de resíduos, fertilidade do solo e benefícios econômicos e sociais, promovendo eficiência ambiental, mitigação de emissões e fortalecimento da economia circular na agricultura.

**Palavras-chave:** Economia circular; Gestão de resíduos; Práticas sustentáveis.

**ABSTRACT:** The study evaluated the agronomic, economic, and socio-environmental aspects of the agricultural application of sewage sludge generated at wastewater treatment plants in the northwestern region of Paraná between 2016 and 2019. A total of 73 batches distributed across 236 agricultural projects were analyzed, considering sludge quality parameters, chemical composition, soil application, economic valuation, and socio-environmental indicators. The sludge was sanitized through prolonged alkaline stabilization with lime addition, and its agricultural use was monitored in terms of macronutrient, secondary nutrient, and micronutrient supply, recycling efficiency, and farmer support. The results showed high concentrations of organic carbon, calcium, and magnesium in the batches, along with significant inputs of nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur, contributing to improved soil fertility and carbon enrichment. The agricultural use of sludge resulted in average savings of R\$ 702 to R\$ 1,088 per hectare, increased productivity in crops such as soybeans and citrus, and high agricultural recycling rates, with minimal disposal in landfills. The study concludes that this practice represents a

<sup>1</sup> Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Engenheiro Agrônomo da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), Maringá (PR), Brasil.

<sup>2</sup> Doutora em Agronomia pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

<sup>3</sup> Doutora em Zootecnia pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

<sup>4</sup> Doutora em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

<sup>5</sup> Doutor em Zootecnia pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisador do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

sustainable strategy that integrates waste management, soil fertility, and economic and social benefits, promoting environmental efficiency, emission mitigation, and strengthening the circular economy in agriculture.

**Keywords:** Circular economy; Waste management; Sustainable practices.

---

**Autor correspondente:** Francielli Gasparotto  
E-mail: francielli.gasparotto@unicesumar.edu.br

Recebido em: 2025-10-31  
Aceito em: 2025-11-26

---

## 1 INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto, principal resíduo das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), representa um desafio ambiental global devido ao seu grande volume e composição rica em matéria orgânica e nutrientes. A produção mundial ultrapassa 100 milhões de toneladas anuais de lodo seco, com previsão de atingir 150 milhões até o fim de 2025, destacando-se a China, os Estados Unidos e a União Europeia como principais geradores (Kowalski *et al.*, 2024; Vaithyanathan; Cabana, 2021). No Brasil, segundo dados do Diagnóstico Temático – Serviços de Água e Esgoto do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA) referente ao ano de 2022, foram coletados 6.106,4 milhões de m<sup>3</sup> de esgoto (Brasil, 2023). Além disso, a produção anual de lodo de esgoto nacional foi estimada em cerca de 0,372 milhões de toneladas. Apesar de seu reconhecido potencial para uso agrícola, grande parte do resíduo ainda é destinada a aterros sanitários, reforçando a necessidade de estratégias de valorização e reaproveitamento alinhadas à economia circular (Paraná, 2018; Silva; Korf, 2023).

Nos últimos anos, a valorização agrônômica do lodo de esgoto tem se intensificado, sobretudo devido ao seu potencial como matéria-prima agrícola (Marchuk *et al.*, 2023), fonte de nutrientes (Alonso *et al.*, 2024) e aporte de matéria orgânica ao solo (Knopik *et al.*, 2018). Além dos benefícios agrônômicos, seu uso contribui para reduzir impactos ambientais associados à disposição em aterros e para fortalecer práticas de economia circular. Nesse âmbito, a NBR 17100-1:2023 estabelece os critérios que permitem classificar o lodo tratado como subproduto, desde que seu aproveitamento agrícola ocorra de forma segura e controlada (ABNT, 2023). Apesar desse potencial e do respaldo normativo, sua adoção em escala operacional ainda é limitada, predominando em pesquisas e projetos piloto.

No Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) constitui um caso de referência, com programas de destinação agrícola de lodo higienizado implementados desde a década de 1980. Entre 2007 e 2015, mais de 300 agricultores foram atendidos, recebendo o resíduo de forma gratuita e se beneficiando com a redução dos custos de produção (Bittencourt; Aisse; Serrat, 2017; Knopik *et al.*, 2018). Estudos de valoração econômica realizados no estado demonstraram aportes médios que variaram de R\$ 22,00 a R\$ 206,48 por tonelada, dependendo do tratamento empregado (Corrêa; Corrêa, 2001; Marcon *et al.*, 2015).

Apesar de tais benefícios, a destinação agrícola apresenta custos operacionais superiores aos da disposição em aterros, representando, em 2017, um gasto médio de R\$ 191,00 por tonelada, contra R\$ 157,00 para aterros sanitários (Paraná, 2018). No entanto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) prevê a disposição final

ambientalmente adequada apenas para rejeitos, ou seja, aqueles resíduos que não são mais passíveis de recuperação (Brasil, 2010). Ademais, a tendência global de restrição ao uso de aterros, aliada ao aumento das exigências ambientais e ao provável encarecimento da disposição final (Abreu *et al.*, 2019), reforça a urgência de tornar a gestão do lodo mais eficiente e valorizá-lo agronomicamente.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os aspectos agrônômicos, econômicos e socioambientais da destinação agrícola do lodo de esgoto gerado pelas ETEs da SANEPAR na região noroeste do Paraná, no período de 2016 a 2019, considerando a reciclagem de nutrientes, o potencial de aporte de carbono, o retorno econômico para os agricultores e a eficiência do programa quanto à sustentabilidade e atendimento social.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi conduzido no estado do Paraná, região Sul do Brasil, que possui 399 municípios e uma população estimada de 11.444.380 habitantes (IBGE, 2023). As operações de saneamento da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) são organizadas em cinco Gerências Gerais (GGs) e 20 Gerências Regionais (GRs). A pesquisa concentrou-se na Gerência Geral Noroeste (GGNO), composta pelas regionais de Maringá (GRMA), Umuarama (GRUM), Campo Mourão (GRCM) e Paranavaí (GRPV), abrangendo 40 municípios com tratamento integral do esgoto doméstico, totalizando aproximadamente 38,4 milhões de m<sup>3</sup> de efluente líquido por ano.

Foram consideradas 40 ETEs que operam predominantemente com reatores anaeróbios do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), associados a unidades de pós-tratamento variadas, incluindo filtros biológicos, lagoas aeradas e anaeróbias, responsáveis pela geração de lodo de esgoto. As demais ETEs baseadas em lagoas anaeróbias ou facultativas foram excluídas por não apresentarem descarte significativo de lodo. Todo o lodo gerado foi destinado para uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) licenciada pelo órgão ambiental estadual e autorizada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

### 2.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

O levantamento de dados compreendeu o período de 2016 a 2019 e incluiu laudos técnicos de qualidade do lodo; projetos agrônômicos de destinação agrícola; dados operacionais das ETEs (vazão, volume de lodo e sólidos totais); relatórios das UGLs pós-processo de estabilização alcalina prolongada (EAP), que envolve adição de cal virgem dolomítica variando de 30 a 50% em relação aos sólidos totais.

Os dados operacionais foram obtidos por meio do Sistema de Controle e Vigilância da Qualidade de Água e Esgoto (SQA) da SANEPAR, incluindo medições de

vazão ( $\text{L s}^{-1}$ ) e volume de lodo bruto descartado ( $\text{m}^3$ ). O teor de sólidos totais (ST) foi determinado seguindo a metodologia estabelecida no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Para períodos sem análises, aplicou-se a média anual ou, na ausência de dados suficientes, um valor fixo de 4,5%, representativo da média histórica.

A estimativa da geração de lodo foi realizada utilizando dois métodos: balanço de massa baseado na demanda química de oxigênio (DQO) metabolizada com taxa de anabolismo de 15% e metodologia de Bielschowsky (2014), atualizada com dados do SINISA (Brasil, 2023).

## 2.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E VALORAÇÃO DO LODO

O lodo destinado à agricultura foi avaliado quanto a parâmetros agronômicos (carbono orgânico; nitrogênio (Kjeldahl, amoniacal, nitrito/nitrato); fósforo; potássio; cálcio; magnésio; enxofre e sódio), conforme a Instrução Normativa nº 38/2025 (Paraná, 2025). Foram analisados 73 lotes distribuídos a partir de 236 projetos agronômicos executados entre 2016 e 2019.

A valoração do lodo contemplou três dimensões, a ambiental e agronômica, baseada no aporte de macronutrientes (N, P, K), secundários (Ca, Mg, S) e micronutrientes (Zn, Cu, Ni, Mo) ao solo, calculado a partir da concentração dos nutrientes e da taxa de aplicação (Equação 1).

$$A = (Ta \times C) \quad (1)$$

Em que: A é o aporte médio de nutrientes no solo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); Ta é a taxa média de aplicação de MS do lodo no solo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e C é a concentração do nutriente em percentual de cada elemento (%).

A dimensão econômica foi estabelecida com base nos custos evitados por meio do aporte de nutrientes presentes no lodo em relação aos fertilizantes e corretivos agrícolas, utilizando preços médios de mercado (DERAL/SEAB) e métodos de bens substitutos (Equação 2).

$$CE = \frac{QE \times 100}{AC} \times PR \quad (2)$$

Em que: CE é o custo de nutrientes evitado pelo agricultor devido ao aporte de nutrientes ( $\text{R\$ ha}^{-1}$ ); QE é a quantidade de nutriente equivalente no lodo aplicado na área ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), AC é o percentual de nutriente equivalente no produto comercial (%) e PR é o preço do adubo comercial ( $\text{R\$ kg}^{-1}$ ).

E na dimensão socioambiental desenvolveu-se um indicador baseado na destinação final do lodo (agricultura, aterro ou outros usos), com pontuação ponderada e classificação em seis níveis (insatisfatório a excelente). Este indicador considerou três parâmetros: percentual de lodo destinado à agricultura, percentual destinado a aterros sanitários e número de atendimentos aos agricultores. Cada critério recebeu peso igual

(0,3333) e a nota final foi calculada pela média ponderada, refletindo o grau de sustentabilidade da destinação agrícola.

Para as rotas de destinação e cálculo da sustentabilidade foram consideradas três rotas possíveis de destinação do lodo: (i) geração de energia ou combustível; (ii) aplicação em solos como fertilizante; (iii) uso como insumo em processos industriais. A análise concentrou-se na rota agrícola (ii), priorizando o uso do lodo higienizado para aplicação em solo, considerando ajustes por adição de cal, eficiência de reciclagem (66,66% dos sólidos totais - ST) e ponderação temporal entre geração e destinação. O percentual de lodo reciclado foi calculado pela relação entre lodo higienizado destinado e lodo bruto gerado no ano anterior, e a destinação para aterros foi obtida como complemento.

Para o parâmetro social, considerou-se a dose ideal a destinação entre 110 a 130 ton (ST) de lodo para cada agricultor atendido recebendo nota máxima (0,3333).

A recuperação de carbono orgânico foi estimada a partir da massa seca aplicada e a concentração de carbono nos lotes. Já a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) foi estimada por meio da ferramenta disponibilizada pelo programa *GHG Protocol* Brasil para destinação de resíduos em aterros classificados como classe A (FGV, 2025).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização química dos lotes de lodo de esgoto destinados à agricultura, provenientes das gerências da região noroeste, evidenciou o carbono orgânico como o elemento de maior concentração, apresentando média de 11,09% (Tabela 1).

Esse resultado corrobora outros estudos realizados no Paraná (Bittencourt *et al.*, 2022; Knopik *et al.*, 2018) e em outras regiões do país, embora algumas pesquisas reportem teores mais elevados, próximos de 30%, especialmente em lodos submetidos a outros processos de higienização não alcalinos como compostagem, solarização e secagem térmica (Carvalho *et al.*, 2015; Abreu *et al.*, 2017). A expressiva presença de carbono, mesmo no processo de higienização por estabilização alcalina prolongada (EAP), reforça a importância da reciclagem agrícola do lodo, considerando que o carbono é o principal componente da matéria orgânica e exerce papel essencial na estruturação, fertilidade e manutenção da qualidade dos solos agrícolas.

Além do carbono, foram identificadas concentrações relevantes de cálcio (9,21%), magnésio (4,45%), nitrogênio total (1,07%), enxofre (0,78%), fósforo (0,35%), potássio (0,06%) e sódio (0,05%), elementos que contribuem diretamente para a nutrição vegetal e para a melhoria das propriedades físico-químicas do solo (Tabela 1). A análise temporal dos lotes revelou diferença significativa apenas no ano de 2016, especialmente para os parâmetros ST, SVT, C, S, Ntotal, P, K, Na, Ca e Ca+Mg, o que pode ser atribuído à maior padronização dos lotes higienizados, evidenciada pela redução do coeficiente de variação.

A aplicação agrícola de lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto tem se consolidado como uma estratégia eficiente para promover a sustentabilidade ambiental, a reciclagem de nutrientes e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2019; D'Imporzano; Adani, 2023; Paganini *et al.*, 2024). Além de representar uma alternativa à disposição em aterros, essa prática está alinhada aos princípios da economia circular, ao transformar um resíduo urbano em insumo agrícola de valor agronômico comprovado.

**Tabela 1.** Média e Coeficiente de Variação dos parâmetros agrônômicos dos lotes de lodo de esgoto das diferentes regionais da gerência geral do Noroeste do Paraná higienizados por estabilização alcalina prolongada (EAP), aplicados em áreas agrícolas, entre 2016 e 2019

Parâmetros	Unidade	Lotes da Gerência de Maringá (n = 17)		Lotes da Gerência de Umuarama (n = 23)		Lotes da Gerência de Campo Mourão (n = 22)		Lotes da Gerência de Paranavai (n = 11)		Total de lotes (n = 73)	
		Média	CV%	Média	CV%	Média	CV%	Média	CV%	Média	CV%
pH		10,20a	11,7	11,05 <sup>a</sup>	12,5	11,45a	7,7	11,28a	11,0	11,01	11,4
ST		48,41a	26,6	63,62b	11,9	60,70b	13,0	71,46b	15,8	60,38	20,0
SVT		34,95a	35,8	20,11 <sup>a</sup>	32,8	26,17a	39,1	21,90a	15,5	25,66	41,4
C org		18,82a	52,4	8,32 <sup>a</sup>	61,7	9,10a	54,3	8,90a	56,0	11,09	69,1
N total		1,36a	46,3	0,85 <sup>a</sup>	37,2	1,04a	32,4	1,13a	41,7	1,07	43,8
N Kjeldahl		1,13a	40,4	0,74 <sup>a</sup>	34,3	0,87a	25,7	1,02a	47,3	0,91	40,6
N - NH <sub>4</sub>		0,20a	181,4	0,08 <sup>a</sup>	202,7	0,12a	179,3	0,07a	192,4	0,12	199,0
N - (NO <sub>2</sub> + NO <sub>3</sub> )	% de ST	0,031a	83,0	0,031 <sup>a</sup>	200,0	0,059a	308,1	0,032a	74,7	0,04	267,0
P total		0,50a	29,4	0,29 <sup>a</sup>	49,8	0,30a	61,1	0,36a	51,5	0,35	51,8
K total		0,064a	25,6	0,049a <sub>b</sub>	26,9	0,057a <sub>b</sub>	30,0	0,066b	33,3	0,06	30,8
Ca total		9,25a	14,1	9,41 <sup>a</sup>	18,2	9,17a	24,8	8,84a	21,9	9,21	19,8
Mg total		4,16a	26,3	4,61 <sup>a</sup>	38,7	4,81a	31,1	3,86a	39,7	4,45	34,3
S total		0,93a	55,7	0,57 <sup>a</sup>	39,4	0,89a	53,5	0,75a	39,7	0,78	54,1
Na total		0,07a	70,9	0,03b	75,4	0,04b	99,1	0,040b	78,5	0,05	88,1

Nota: As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação; ST: sólidos totais, SVT: sólidos voláteis totais, C org: carbono orgânico, N: nitrogênio total Kjeldahl, N - NH<sub>4</sub>: nitrogênio amoniacal, N - (NO<sub>2</sub> + NO<sub>3</sub>): nitrito/nitrato, P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, Na: sódio.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados do aporte médio dos nutrientes nos solos das áreas agrícolas onde os lotes da GGNO foram aplicados, no período de 2016 a 2019.

**Tabela 2.** Aporte de nutrientes nos solos tratados com lodo de esgoto (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), higienizados por EAP, na Gerência Geral Noroeste, de 2016 e 2019

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo
Carbono orgânico total	722	4.035	79
Cálcio total	531	1.901	55
Magnésio total	264	1.063	26
Nitrogênio total e disponível	67 (15)*	400 (101)*	14 (3)*
Enxofre total	50	184	6
Fósforo total	22	132	3
Potássio total	3,3	14	0,6
Sódio total	2,8	20	0,3
Zinco total	2,7	11,3	0,003
Cobre total	1,3	6,7	0,1
Níquel	0,2	1,9	0,01
Molibdênio	0,03	0,12	0,01

Nota: EAP: Estabilização Alcalina Prolongada; ST: Sólidos Totais. (\*) N disponível, conforme Instrução Normativa nº 38/2025 (Paraná, 2025).

A destinação de 35.590 t (20.966 t de ST) promoveu uma reciclagem total de 2.257 t ST de carbono orgânico. Com relação aos macronutrientes primários, a ciclagem foi de 219 t ST de nitrogênio total, 73 t ST de fósforo e 12 t ST de potássio. Esses valores

evidenciam não apenas a capacidade do lodo de melhorar a fertilidade do solo e o balanço de nutrientes, mas também seu papel na redução da dependência de fertilizantes sintéticos e no potencial de sequestro e mitigação de carbono, reforçando sua relevância ambiental e econômica.

Em relação aos macronutrientes secundários, a concentração de cálcio e magnésio em amostras de lodo bruto do interior do Paraná, sem adição de cal, permitiu estimar a ciclagem de 236 t de Ca e 48 t de Mg. O enxofre apresentou ciclagem de 163 t, resultando em um total de 447 t de macronutrientes secundários.

Os micronutrientes, embora parte classificados como substâncias inorgânicas pela legislação (Brasil, 2020; Paraná, 2025), desempenham papel essencial na nutrição vegetal e tiveram ciclagem total de 23 t. Assim, o uso agrícola de lodo promoveu a reciclagem total de 774 t de nutrientes, somada às 2.257 t de carbono orgânico, totalizando 3.031 t entre carbono e nutrientes. Assim, após o carbono orgânico, os aportes de nutrientes provenientes dos lotes de lodo apresentaram a seguinte ordem decrescente: Ca>Mg>S>N>P>K>Na>Zn>Cu.

Em relação ao nitrogênio total, é necessário considerar que apenas uma parte se apresenta prontamente disponível. Conforme fórmula na resolução Instrução Normativa nº 38/2025 (Paraná, 2025), a média total disponível por hectare correspondeu a 15,35 kg N ha<sup>-1</sup>, o máximo de 101 e o mínimo de 3 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 2). Estudos de Carvalho *et al.* (2015) indicam que aproximadamente 70% do carbono e 80% do nitrogênio presentes no lodo encontram-se na fração orgânica. Essa predominância do N orgânico favorece a liberação gradual e contínua de nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação e volatilização e apresentando vantagens frente aos fertilizantes minerais convencionais (Andrade; Boeira; Pires, 2010; Guedes *et al.*, 2025).

O aproveitamento de nutrientes provenientes do lodo de esgoto tem ganhado destaque no cenário internacional como uma estratégia eficiente para promover a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos. Em diversos países, o reaproveitamento desse subproduto vem sendo incorporado a políticas públicas de economia circular, com resultados positivos sobre a fertilidade do solo, o sequestro de carbono e a mitigação de emissões associadas ao uso de fertilizantes minerais (Manea *et al.*, 2024). Ainda segundo os autores, a compostagem e outras formas de estabilização controlada do lodo têm se mostrado alternativas viáveis para o manejo sustentável de resíduos de estações de tratamento, permitindo o retorno seguro de nutrientes ao solo e a minimização de impactos ambientais.

No contexto brasileiro, essa abordagem assume importância estratégica, uma vez que o país figura entre os maiores produtores mundiais de soja, milho, cana-de-açúcar e citros, culturas que demandam grandes volumes de nutrientes e cuja produtividade depende fortemente da reposição adequada dos elementos exportados nas colheitas (CONAB, 2025). Tal cenário é agravado pela alta dependência nacional de fertilizantes importados, especialmente de nitrogênio, fósforo e potássio, o que reforça a necessidade de buscar alternativas locais mais sustentáveis e economicamente viáveis.

A utilização agrícola do lodo de esgoto, quando realizada dentro dos parâmetros técnicos e sanitários adequados, representa uma oportunidade concreta de integração entre a gestão de resíduos e o manejo do solo, gerando benefícios ambientais, econômicos e sociais. No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº

498/2020 estabelece critérios e limites para o uso de bioossólidos na agricultura, garantindo a segurança ambiental e a proteção da saúde pública (Brasil, 2020). Pesquisas recentes reforçam que o uso controlado de lodo tratado pode melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade agrícola e contribuir para o equilíbrio de nutrientes nos sistemas produtivos (Lins; Lima, 2022; Marchuk *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2025).

Além da ciclagem de nutrientes presentes no lodo e da redução da dependência de fertilizantes sintéticos, do ponto de vista ambiental, a destinação agrícola das 35.590 toneladas de lodo higienizadas com cal, equivalentes a 27.927 toneladas de lodo bruto (50% de umidade) que deixaram de ser encaminhadas a aterros sanitários na área de abrangência da SANEPAR. Essa substituição contribui para a mitigação de impactos ambientais associados à disposição final, reduzindo a geração potencial de gases de efeito estufa (GEE).

A estimativa das emissões evitadas, calculada por meio da ferramenta do Programa *GHG Protocol* Brasil para disposição em aterros classe A, desconsiderando-se a adição de cal, evitou a liberação de 14.893,78 t de CO<sub>2eq</sub> (FGV, 2025), o que representa a mitigação de 533 kg de CO<sub>2eq</sub> para cada 1 tonelada de lodo destinada para uso agrícola. Esses resultados demonstram que o aproveitamento agrícola do lodo contribui não apenas para a recuperação de nutrientes e o incremento de carbono no solo, mas também para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para o avanço de estratégias associadas à economia circular.

Sob a perspectiva social, os resultados também se mostram expressivos. Entre os anos de 2016 e 2019, a Gerência Geral Noroeste (GGNO) da SANEPAR atendeu 187 agricultores, o que representa 56,3% de todos os atendimentos realizados no estado do Paraná durante o período avaliado (Tabela 3). Observa-se, ainda, uma tendência clara de expansão do programa: o número de agricultores beneficiados passou de 25 para 76 na GGNO e de 52 para 116 na SANEPAR entre 2016 e 2019. Esse crescimento demonstra não apenas a ampla aceitação e confiança dos produtores rurais no uso agrícola do lodo tratado, mas também reflete a consolidação dessa prática como alternativa sustentável de manejo de resíduos, promovendo benefícios ambientais, sociais e econômicos em escala regional e estadual.

**Tabela 3.** Número de atendimentos de agricultores beneficiados pelo uso agrícola no Paraná

Gerência	2016	2017	2018	2019	Total	%
GGML	9	9	28	20	66	19,9
GGND	2	2	3	1	8	2,4
GGSD	10	10	18	14	52	15,7
GGNO	25	46	40	76	187	56,3
GGSO	6	6	2	5	19	5,7
SANEPAR	52	73	91	116	332	100,0

Nota: GGML: Gerência Geral Curitiba e Região Metropolitana; GGND: Gerência Geral Nordeste; GGSD: Gerência Geral Sudeste; GGNO: Gerência Geral Noroeste; e GGSO: Gerência Geral Sudoeste; SANEPAR: Companhia de Saneamento do Paraná.

Do ponto de vista econômico, a análise dos 236 projetos agrônômicos executados na região permitiu estimar o valor financeiro associado ao reaproveitamento de nutrientes provenientes dos lodos de esgoto. A quantificação baseou-se nas



concentrações médias dos elementos, sua disponibilidade e as doses efetivamente aplicadas aos solos agrícolas. Utilizando-se a metodologia de valoração de bens substitutos, os nutrientes contidos nos lodos foram convertidos em equivalentes de insumos comerciais, como fertilizantes minerais e corretivos de solo (Tabela 4).

A valoração média dos 73 lotes de lodo analisados indicou valores de R\$ 81,48 por tonelada de matéria seca (MS), na condição de disponibilidade parcial dos nutrientes (N disponível, 50% de P e S, e 100% de K e corretivos), com variação entre R\$ 52,00 e R\$ 125,00 por tonelada. Quando admitida a disponibilidade integral de N, P, K, S e corretivos, a média estimada foi de R\$ 107,79 por tonelada de MS, variando entre R\$ 67,00 e R\$ 159,00 por tonelada. Essas diferenças refletem a heterogeneidade dos lotes quanto às taxas de aplicação, teores de nutrientes e eficiência agrônômica dos elementos.

Os valores obtidos neste estudo foram ligeiramente inferiores aos reportados por Abreu *et al.* (2017), que observaram média de R\$ 125,56 por tonelada de MS, mesmo desconsiderando o carbono orgânico. Essa discrepância pode ser explicada por variações regionais nos custos de insumos agrícolas, diferenças na composição química dos lodos e metodologias de higienização empregadas. Ainda assim, os resultados reforçam o potencial econômico competitivo da destinação agrícola, sobretudo quando comparada aos custos de disposição em aterros e às demandas crescentes por práticas produtivas sustentáveis.

Enquanto esses autores apontam que a matéria orgânica é o componente de maior contribuição para a valoração, com valor agregado de 41% em relação aos demais nutrientes, nos lotes da GGNO a maior parcela do valor foi atribuída aos nutrientes corretivos, especialmente Ca e Mg, com médias de 69% e 53% para nutrientes disponíveis e totais, respectivamente. Tal predominância deve-se ao processo de estabilização alcalina prolongada (EAP), que confere ao lodo propriedades corretivas mais relevantes do que os compostos orgânicos.

A concentração elevada de Ca e Mg nos lotes aplicados entre 2017 e 2019 permitiu reduzir as doses aplicadas, resultando em aportes médios de R\$ 660 ha<sup>-1</sup>, em comparação com R\$ 903 ha<sup>-1</sup> em anos anteriores, mantendo valores relativamente estáveis ao longo do período. O uso do lodo como insumo agrícola tem se mostrado eficiente, seguro e economicamente vantajoso, promovendo ganhos sociais ao reduzir custos de produção e elevar a produtividade. Além disso, contribui para a recuperação de nutrientes previamente descartados em aterros sanitários, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e corretivos, configurando um modelo de economia circular ao conectar a gestão de resíduos urbanos à produção agrícola (Abreu *et al.*, 2017; D'imporzano; Adani, 2023).

Dados preliminares obtidos pela empresa indicam um aumento da produtividade, especialmente nas culturas de soja e citros, principais beneficiárias do Programa de reaproveitamento agrícola do lodo (Knopik, 2020). A soja, amplamente cultivada no Paraná e com período de transporte favorável entre junho e outubro, foi a cultura mais contemplada com a aplicação do material. Já o citros, por sua natureza perene e alta exigência de cálcio e matéria orgânica, tem ganhado destaque, sobretudo na região Noroeste do estado, onde predominam solos arenosos, com baixa fertilidade natural e reduzido teor de matéria orgânica.

**Tabela 4.** Valoração média do benefício proporcionado ao agricultor, em relação ao aporte de nutrientes no solo e valoração da t ST dos lotes, em relação aos lotes destinados, ano, gerência e disponibilidade dos nutrientes

Ano	Gerência	Agricultor disponível R\$ ha <sup>-1</sup>	Agricultor total R\$ ha <sup>-1</sup>	Lote disponível R\$ t <sup>-1</sup> ST	Lote total R\$ t <sup>-1</sup> ST
2016	GRMA	1.021,8	1.748,9	79,8	111,2
	GRUM	739,3	1.212,9	66,1	91,9
	GRCM	783,1	1.264,2	81,3	109,6
	GRPV	488,4	799,6	76,6	106,9
	GGNO	903,3	1.522,0	76,8	106,0
2017	GRMA	626,3	1.040,2	79,8	107,3
	GRUM	577,0	826,9	76,7	95,8
	GRCM	1.170,2	1.673,9	72,6	92,7
	GRPV	498,6	809,8	66,8	92,2
	GGNO	662,9	1.049,2	74,5	97,8
2018	GRMA	794,5	1.309,5	93,9	134,5
	GRUM	629,9	942,7	77,3	101,1
	GRCM	656,6	927,8	91,2	111,6
	GRPV	466,9	746,4	86,6	115,4
	GGNO	695,1	1.100,7	86,6	113,7
2019	GRMA	591,8	930,9	93,9	129,5
	GRUM	743,5	977,4	82,6	99,8
	GRCM	534,8	811,8	86,8	117,6
	GRPV	716,5	1.115,6	79,0	105,6
	GGNO	659,8	956,4	85,6	111,1
2016 a	GRMA	718,5	1.183,2	85,8	119,0
	GRUM	700,2	968,7	77,6	98,3
2019	GRCM	747,0	1.111,8	83,5	108,5
	GRPV	576,1	913,6	77,3	104,8
Media		702,04	1.088,11	81,48	107,79

Nota: GRMA: Gerência Regional de Maringá; GRUM: Gerência Regional de Umuarama; GRCM: Gerência Regional de Campo Mourão; GRPV: Gerência Regional de Paranavaí e GGNO: Gerência Geral Noroeste.

De acordo com os dados, foram observados incrementos médios de produtividade variando de 4,1 a 12,4 sacas por hectare na soja e de 200 a 400 caixas por hectare no citros, resultando em aumentos de renda estimados entre R\$ 492,00 e R\$ 1.480,00 ha<sup>-1</sup> para soja e R\$ 4.890,00 a R\$ 9.780,00 ha<sup>-1</sup> para citros (Knopik, 2020). Tais resultados reforçam a eficiência agrônômica e o retorno econômico positivo do uso agrícola do lodo de esgoto, especialmente quando comparado ao custo de aquisição de fertilizantes minerais (Abreu *et al.*, 2017; D'Imporzano; Adani, 2023).

A partir dos resultados positivos observados em termos produtivos e econômicos, torna-se fundamental avaliar a eficiência global do programa, considerando seus impactos na gestão ambiental e no atendimento social. Nesse contexto, a análise do indicador socioambiental da Gerência Geral Noroeste (GGNO) integrou dados referentes à geração de lodo (2015–2018), à destinação agrícola (2016–2019) e ao atendimento aos agricultores, permitindo calcular tanto o percentual de reciclagem agrícola quanto a eficiência da destinação final. Para fins de padronização, valores que excederam 100% foram ajustados, estabelecendo-se o limite máximo anual como referência (100%), equivalente a 0,33 na nota final de cada regional (Tabela 5).

Em algumas gerências e anos, observou-se que os percentuais de reciclagem ultrapassaram 100%, fenômeno possivelmente relacionado à utilização de lodos previamente armazenados por mais de um ciclo anual, à adição de cal ou areia em excesso, a variações nos teores de sólidos totais entre os lotes, ou ainda a inconsistências operacionais no transporte e pesagem (Tabela 5). Esses achados destacam a complexidade logística e técnica envolvida na gestão do lodo e reforçam a necessidade de padronização de procedimentos e controles, garantindo rastreabilidade confiável e maior consistência nos dados de destinação agrícola.

**Tabela 5.** Geração de lodo de 2015 a 2018 (toneladas de sólidos totais), destinação de lodo de 2016 a 2019 (toneladas de sólidos totais), reciclagem agrícola (%) para o parâmetro reciclagem agrícola do lodo na GGNO

Gerência	Geração				
	2015	2016	2017	2018	2015 a 2018
GRMA	941	1.281	1.381	1.135	4.737
GRUM	382	375	325	310	1.392
GRCM	317	347	370	349	1.384
GRPV	219	247	214	371	1.050
GGNO	1.860	2.249	2.290	2.164	8.563
Gerência	Destinação				
	2016	2017	2018	2019	2016 a 2019
GRMA	1.915	2.501	1.676	1.872	7.964,12
GRUM	885	719	1.215	5.592	8.410,58
GRCM	766	980	715	689	3.150,39
GRPV	209	510	229	493	1.441,26
GGNO	3.775	4.710	3.835	8.646	20.966
Gerência	Reciclagem agrícola (%)				
	2016	2017	2018	2019	2016 a 2019
GRMA	136	130	81	110	112
GRUM	154	128	249	1203	402
GRCM	161	188	129	131	152
GRPV	63	138	71	89	91
GGNO	99,0	98,8	97,4	97,9	98,3
Gerência	Nota final				
	2016	2017	2018	2019	2016 a 2019
GRMA	0,33	0,33	0,27	0,33	0,33
GRUM	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
GRCM	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
GRPV	0,21	0,33	0,24	0,29	0,30
GGNO	0,3297	0,3291	0,3244	0,3262	0,3273

Nota: GRMA: Gerência Regional de Maringá; GRUM: Gerência Regional de Umuarama; GRCM: Gerência Regional de Campo Mourão; GRPV: Gerência Regional de Paranavaí; e GGNO: Gerência Geral Noroeste.

Na GGNO, o percentual de reciclagem agrícola manteve-se elevado, variando entre 97,43% e 99,02% ao longo do período analisado, refletindo a eficiência operacional e o controle da destinação agrícola do lodo. A análise da destinação para aterros sanitários evidenciou baixíssimos percentuais, em média 1,73%, confirmando que a grande maioria do lodo gerado foi direcionada de forma sustentável para áreas agrícolas, evitando impactos ambientais associados à disposição em aterros (IPCC, 2019).

O parâmetro social, avaliado com base na dose ideal de aplicação por agricultor (110 a 130 t ST por ano), indicou que a GGNO manteve uma alta conformidade, com nota máxima (100), destacando a efetividade do programa em atender corretamente os produtores. Entre 2016 e 2019, o número de agricultores atendidos aumentou de 25 para 76, evidenciando a expansão do programa e o fortalecimento da relação entre a companhia de saneamento e os agricultores.

A integração dos três parâmetros, uso agrícola, social e destinação para aterro, permitiu estabelecer o percentual de cada gerência e nota final da GGNO e calcular a nota final do indicador socioambiental (Tabela 6). A GGNO obteve conceito “Excelente”, com nota final de 0,9818, resultado que reflete a alta eficiência na reciclagem agrícola do lodo, baixo impacto ambiental e adequado atendimento social. Regionalmente, Maringá, Umuarama e Campo Mourão receberam o conceito “Excelente”, enquanto Paranavaí alcançou o conceito “Ótimo”.

**Tabela 6.** Percentual da nota final e nota final e conceito final do indicador socioambiental para a Gerência Geral Noroeste (GGNO) no período de 2016 a 2019

Gerência	Percentual da Nota Final (%)				Conceito
	Uso agrícola	Social	Aterro	Média Total	
GRMA	112	85	0	95	Excelente
GRUM	402	80	0	93	Excelente
GRCM	152	75	0	92	Excelente
GRPV	91	75	9	86	Ótimo
GGNO	98,27	100,00	1,73	98,85	Excelente

  

Gerência	Nota Final				Conceito
	Uso agrícola	Social	Aterro	Total	
GRMA	0,3333	0,2831	0,3333	0,9497	Excelente
GRUM	0,3333	0,2664	0,3333	0,9330	Excelente
GRCM	0,3333	0,2498	0,3333	0,9164	Excelente
GRPV	0,3043	0,2498	0,3043	0,8584	Ótimo
GGNO	0,3273	0,3273	0,3273	0,9819	Excelente

Nota: GRMA: Gerência Regional de Maringá; GRUM: Gerência Regional de Umuarama; GRCM: Gerência Regional de Campo Mourão; GRPV: Gerência Regional de Paranavaí; e GGNO: Gerência Geral Noroeste.

A mesma metodologia de avaliação socioambiental foi aplicada às demais Gerências Gerais (GGs) da SANEPAR, cujos resultados consolidados estão apresentados na Tabela 7, contemplando o percentual de desempenho de cada indicador e a respectiva nota final. A análise comparativa entre as regiões evidenciou variações significativas no desempenho operacional e na eficiência da destinação agrícola do lodo. A Gerência Geral Sudeste (GGSD) abrangendo os municípios de Ponta Grossa, Guarapuava e Telêmaco Borba, obteve conceito “Ótimo”, demonstrando um elevado nível de eficiência técnica. Em contraste, as gerências Metropolitana e Litoral (GGML) e Sudoeste e Oeste (GGSO), que incluem Foz do Iguaçu, Francisco Beltrão, Pato Branco e Toledo, foram classificadas como “Ruim”, enquanto a Gerência Norte (GGND), responsável por Apucarana e Arapongas, apresentou desempenho “Insatisfatório”.

**Tabela 7.** Percentual da nota final e nota final e conceito final do Indicador Socioambiental para as Gerências Gerais e SANEPAR no período de 2016 a 2019

Gerência	Percentual da nota final (%)				Conceito
	Uso agrícola	Social	Aterro	Total	
GGML	25,94	50,00	74,06	33,96	Ruim
GGND	1,00	60,00	99,00	20,67	Insatisfatório
GGSD	89,15	50,00	10,85	76,10	Ótimo
GGNO	98,27	100,00	1,73	98,85	Excelente
GGSO	18,24	95,00	81,76	43,83	Ruim
<b>SANEPAR</b>	<b>40,59</b>	<b>80,00</b>	<b>59,41</b>	<b>53,73</b>	<b>Satisfatório</b>

  

Gerência	Nota final				Conceito
	Uso agrícola	Social	Aterro	Total	
GGML	0,0864	0,0432	0,0864	0,2160	Ruim
GGND	0,0033	0,0020	0,0033	0,0087	Insatisfatório
GGSD	0,2969	0,1484	0,2969	0,7421	Ótimo
GGNO	0,3273	0,3273	0,3273	0,9818	Excelente
GGSO	0,0607	0,0577	0,0607	0,1792	Ruim
<b>SANEPAR</b>	<b>0,1352</b>	<b>0,1081</b>	<b>0,1352</b>	<b>0,3785</b>	<b>Satisfatório</b>

Nota: GGML: Gerência Geral Curitiba e Região Metropolitana; GGND: Gerência Geral Nordeste; GGSD: Gerência Geral Sudeste; GGNO: Gerência Geral Noroeste; GGSO: Gerência Geral Sudoeste; SANEPAR: Companhia de Saneamento do Paraná.

De forma agregada, o desempenho institucional da SANEPAR foi classificado como “Satisfatório”, refletindo uma média ponderada entre diferentes realidades regionais. As disparidades observadas estão associadas principalmente à disponibilidade e qualidade da infraestrutura operacional, ao dimensionamento e capacitação das equipes técnicas, especialmente de engenheiros agrônomos, e ao nível de experiência acumulado na execução e monitoramento das destinações agrícolas. Esses fatores evidenciam a importância de políticas de padronização de práticas e fortalecimento técnico para ampliar a eficiência e a sustentabilidade do programa em escala estadual.

Observou-se que, das 20 gerências regionais, 14 realizaram destinação agrícola no período analisado, destacando-se a GGNO e GGSD como pioneiras no interior do estado. A participação de agrônomos, técnicos e agentes operacionais, a infraestrutura de pátios de cura e a higienização correta dos lotes foram fatores determinantes para o sucesso da destinação agrícola (Abreu *et al.*, 2017; D’Imporzano; Adani, 2023). A GGML, por utilizar parte do lodo para geração de energia, apresentou menor aproveitamento agrícola, evidenciando que o indicador avalia especificamente o uso agrícola do lodo.

De forma geral, o indicador socioambiental demonstrou-se uma ferramenta robusta para monitorar a sustentabilidade do uso agrícola do lodo, permitindo identificar gerências com necessidade de melhorias e consolidar boas práticas de manejo, reciclagem de nutrientes e redução de resíduos destinados a aterros. O elevado percentual de reciclagem agrícola no Paraná (40,59%) e o aumento progressivo no atendimento aos agricultores, de 57 para 116, reforçam o papel do lodo de esgoto como recurso valioso para a agricultura sustentável, com benefícios ambientais, sociais e econômicos significativos.

## 4 CONCLUSÃO

A destinação agrícola do lodo de esgoto gerado pelas ETEs da SANEPAR na região noroeste do Paraná (2016 - 2019) demonstrou benefícios agrônômicos, econômicos e socioambientais significativos. A destinação de 35.590 toneladas de lodo higienizado proveniente de 73 lotes apresentou elevada concentração de carbono orgânico, cálcio e magnésio, além de outros nutrientes essenciais, promovendo a reciclagem de 2.257 t de carbono orgânico e 774 t de nutrientes, melhorando a fertilidade do solo e contribuindo para o aporte de carbono no solo.

O uso agrícola do lodo resultou em economia média de R\$ 702,04 ha<sup>-1</sup>, podendo atingir R\$ 1.088,11 ha<sup>-1</sup> considerando a disponibilidade integral de nutrientes, com maior valor agregado proveniente dos corretivos (Ca e Mg), sendo o carbono o elemento de maior concentração seguido em ordem decrescente de Ca>Mg>S>N>P>K>Na>Zn>Cu.

A análise do indicador socioambiental revelou conceito “Excelente” para a GGNO (nota final 0,9818), evidenciando alta eficiência na reciclagem agrícola, baixo impacto ambiental e atendimento satisfatório aos agricultores. Diferenças observadas entre gerências destacam a importância da infraestrutura adequada, capacitação técnica e padronização operacional para ampliar a eficiência do programa.

Em síntese, os resultados confirmam que a destinação agrícola de lodo de esgoto constitui uma estratégia sustentável, integrando gestão de resíduos, economia circular e agricultura, com impactos positivos sobre fertilidade do solo, mitigação de emissões de GEE e ganhos socioeconômicos, reforçando seu papel como alternativa viável e segura à disposição em aterros.

## 5 AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação (ICETI), pela concessão da bolsa de estudos e pelo apoio aos pesquisadores. A SANEPAR pela cooperação e fornecimento dos dados.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17100-1:2023**: gerenciamento de resíduos: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABREU, A. H. M. de; LELES, P. S. S.; ALONSO, J. M.; ABEL, E. L. S.; OLIVEIRA, R. R. Characterization of sewage sludge generated in Rio de Janeiro, Brazil, and perspectives for agricultural recycling. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, Supl. 1, p. 2433-2448, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4Supl1p2433>.

ABREU, A. H. M.; MELO, L. A.; ALONSO, J. M.; LELES, P. S. S.; SANTOS, G. R. Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus*

*terebinthifolia* Raddi. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 591-599, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019108265>.

ALONSO, J. M.; ABREU, A. H. M.; ANDREOLI, C. V.; TEIXEIRA, P. C.; POLIDORO, J. C.; LELES, P. S. S. Chemical characteristics and valuation of sewage sludge from four different wastewater treatment plants. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 34, p. 1573-2959 1573-2959, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12211-8>.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012. Disponível em: <https://www.standardmethods.org>. Acesso em: 26 nov. 2025.

ANDRADE, C. A.; BOEIRA, R. C.; PIRES, A. M. M. Nitrogênio presente em lodo de esgoto e a resolução nº 375 do CONAMA. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. (org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 157-170.

BIELSCHOWSKY, M. C. **Modelo de gerenciamento de lodo de estação de tratamento de esgotos: aplicação do caso da bacia da Baía de Guanabara**. 2014, 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 6, p. 1129-1139, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017156260>.

BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T. de; SILVA, B. S. da; OLIVEIRA, F. C.; CHAMHUM-SILVA, L. de A.; MIKI, M. K.; BICO, A. K. Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil – Technical Note 6: Agricultural use of biosolids. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 75-87, 2022. Disponível em: [https://abes-dn.org.br/pdf/cadernos/RESA\\_NT\\_v2n1\\_compressed.pdf](https://abes-dn.org.br/pdf/cadernos/RESA_NT_v2n1_compressed.pdf). Acesso em: 26 nov. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 31 jul. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Estabelece critérios e procedimentos para a produção e o uso de biossólidos em solos, visando à proteção ambiental e à saúde pública. Brasília, DF: CONAMA, [2020]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273371288>. Acesso em: 26 nov. 2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral** – ano de referência 2022. Brasília: Ministério das Cidades, SNSA, SINISA, 2023. Disponível em: <https://capacidades.gov.br/capaciteca/diagnostico-tematico-servicos-de-agua-e-esgoto-visao-geral-ano-referencia-2022>. Acesso em: 25 nov. 2025.

CORRÊA, R. S.; CORRÊA, A. S. Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos. **SANARE, Revista Técnica da SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná**, v. 16, n. 2, p. 49-56, 2001. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/260637969\\_Valoracao\\_de\\_biossolidos\\_como\\_fertilizantes\\_e\\_condicionadores\\_de\\_solos](https://www.researchgate.net/publication/260637969_Valoracao_de_biossolidos_como_fertilizantes_e_condicionadores_de_solos). Acesso em: 26 nov. 2025.

CARVALHO, C. S.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A.; GRUTZMACHER, P.; PIRES, A. M. M. Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 3, p. 413-419, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i3a5174>.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos** – Safra 2024/25: Décimo levantamento, setembro 2025. Brasília, DF: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/10o-levantamento-safra-2024-25/10o-levantamento-safra-2024-25>. Acesso em: 26 nov. 2025.

D'IMPORZANO, G.; ADANI, F. Measuring the environmental impacts of sewage sludge use in agriculture in comparison with the incineration alternative. **Science of The Total Environment**, v. 905, e167025, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167025>.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Programa Brasileiro GHG Protocol: Ferramentas para Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa – Resíduos Sólidos**. São Paulo: FGV-EAESP, 2025. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 17 nov. 2025.

GUEDES, M.; RIBEIRO, T.; CRUZ, D.; EVANGELISTA, I.; CABRAL NETO, O. Fertilizantes orgânicos: uma alternativa sustentável. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 8, p. 1-9, 2025. DOI: <https://doi.org/10.61164/rnm.v8i1.3837>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022: População por Unidade da Federação - Paraná**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/biblioteca/visualizacao/periodicos/3102/cd\\_2022\\_populacao\\_idade\\_sexo\\_pr.pdf](https://www.ibge.gov.br/biblioteca/visualizacao/periodicos/3102/cd_2022_populacao_idade_sexo_pr.pdf). Acesso em: 26 nov. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2019. **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 26 nov. 2025.



KNOPIK, M. A.; RUFINE, R.; BITTENCOURT, S.; GASPAROTTO, F. Aporte de nutrientes em solos tratados com lodo de esgoto: estudo de caso da região de Campo Mourão, Noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 7, n. 3, p. 379-389, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3895/rbpd.v7n3.8597>.

KNOPIK, M. A. **Valoração do lodo de esgoto como insumo agrícola**: estudo de caso na região Noroeste do Estado do Paraná – BR. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Limpas) – Universidade Cesumar, Unicesumar, Maringá, 2020.

KOWALSKI, Z.; MAKARA, A.; KULCZYCKA, J.; GENEROWICZ, A.; KWAŚNICKI, P.; CIUŁA, J.; GRONBA-CHYŁA, A. Conversion of Sewage Sludge into Biofuels via Different Pathways and Their Use in Agriculture: A Comprehensive Review. **Energies**, v. 17, n. 6, e1383, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17061383>.

LINS, T. C.; LIMA, A. S. T. Lodo de Esgoto como alternativa de fertilização agrícola para o município de Igaci – AL. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e13511830461, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30461>.

MANEA, E. E.; BUMBAC, C.; DINU, L. R.; BUMBAC, M.; NICOLESCU, C. M. Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: current practices and potential improvements. **Sustainability**, v. 16, n. 15, p. 6329, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16156329>.

MARCON, M. K. F.; FRIGO, E. P.; NOGUEIRA, C. E.; ALVES, H. J.; ALBRECHT, L. P.; FRIGO, J. P. Economic viability of the agricultural recycling of sewage sludge in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 20, p. 2159-2164, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9450>.

MARCHUK, S.; TAIT, S.; SINHA, P.; HARRIS, P.; ANTILLE, D. L.; MCCABE, B. K. Biosolids-derived fertilisers: A review of challenges and opportunities. **Science of the Total Environment**, v. 875, e162555, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162555>

PAGANINI, E. A. L.; SILVA, R. B.; RIBEIRO, L.; GUERRINI, I. A.; OLIVEIRA, G. F.; GRILLI, E. A Systematic Review and Meta-Analysis of the Sustainable Impact of Sewage Sludge Application on Soil Organic Matter and Nutrient Content. **Sustainability**, v. 16, n. 22, p. 9865, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16229865>.

PARANÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná – PERS/PR**. Curitiba: SEMA, [2018]. Disponível em: [https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/documento/2022-05/rp1\\_rev03\\_criterios\\_final.pdf](https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2022-05/rp1_rev03_criterios_final.pdf) Acesso em: 26 nov. 2025.

PARANÁ. Instituto Água e Terra. **Instrução Normativa nº 38, de 28 de abril de 2025**. Estabelece definições, critérios, diretrizes e procedimentos para o licenciamento ambiental de

Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) e para o uso agrícola de lodo de esgoto higienizado e produtos derivados processados no Estado do Paraná. Curitiba: IAT, [2025]. Disponível em: [https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2025-06/instrucao\\_normativa\\_38-2025-unidades\\_de\\_gerenciamento\\_de\\_lodo\\_de\\_esgoto-23766340-3-republicado.pdf](https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2025-06/instrucao_normativa_38-2025-unidades_de_gerenciamento_de_lodo_de_esgoto-23766340-3-republicado.pdf). Acesso em: 26 nov. 2025.

RIBEIRO, M. E.; SANTOS, A. E. C. S.; SILVA, L. A. C.; ALMEIDA, G. H. S.; MARQUES, G. M.; COUTO, E. A. de. Aplicação de bio sólido de ETE na produção de girassol como recuperação sustentável de recursos. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. Especial, e12922, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n.Especial.e12922>.

SILVA, V. B. da; KORF, E. P. Caracterização e valoração de lodo de tratamento de esgoto para aplicação agrícola e na recuperação de áreas degradadas. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 10, n. 24, p. 325-336, 2023. DOI: [10.21438/rbgas\(2023\)102421](https://doi.org/10.21438/rbgas(2023)102421). DOI: [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2023\)102421](https://doi.org/10.21438/rbgas(2023)102421).

VAITHYANATHAN, V. K.; CABANA, H. Integrated biotechnology management of biosolids: sustainable ways to produce value: Added products. **Frontiers in Water**, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.729679>.