

## ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE LODO DE ESGOTO COMPOSTADO PARA FINS AGRÍCOLAS NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE BOTUCATU-SP.

SARA FERNANDES MARTINS<sup>1</sup>, MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI<sup>2</sup>, NURIA ROSA GAGLIARDI QUINTANA<sup>3</sup> FRANKLIN DE SOUZA BARBOSA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Controladoria e Planejamento Integrado do Médio Tietê, SABESP, Rua Costa Leite, nº 2000, Vila Nogueira, 18606-820, Botucatu, São Paulo, Brasil, e-mail: [sfmartins@sabesp.com.br](mailto:sfmartins@sabesp.com.br)

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Rural e Sócio Economia, Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Av. Universitária, nº 3780, Altos do Paraíso, Botucatu - SP, 18610-034, Botucatu, São Paulo Brasil, e-mail: [maura.seiko@unesp.br](mailto:maura.seiko@unesp.br)

<sup>3</sup> Faculdade de Botucatu – UNIBR. Avenida Paula Vieira, 624, Vila Jahu. Botucatu-SP, 18611-020, Botucatu, São Paulo Brasil, e-mail: [nuria.quintana@unibrbotucatu.com.br](mailto:nuria.quintana@unibrbotucatu.com.br)

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Rural e Sócio Economia, Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Av. Universitária, nº 3780, Altos do Paraíso, Botucatu - SP, 18610-034, Botucatu, São Paulo Brasil, e-mail: [franklin.barbosa@unesp.br](mailto:franklin.barbosa@unesp.br)

**RESUMO:** Este estudo teve como objetivo avaliar o custo de compostagem do lodo *in natura* produzido na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), da SABESP de Botucatu, São Paulo e determinar o valor dos nutrientes presentes no lodo compostado com e sem adição de material estruturante (ME). O estudo baseou-se na produção de 16 toneladas diárias de lodo, o que gera um custo anual aproximado de R\$ 1.466.438,40 em transporte e disposição em aterro localizado no município de Paulínia, São Paulo. Foi estimado o custo anual de produção do lodo de esgoto compostado com e sem ME. Foram realizadas análises de amostras dos produtos finais para estimar o valor dos nutrientes presentes nos dois tipos de lodo compostado. As amostras também indicam que o produto final atende aos parâmetros da Resolução CONAMA 375/06 e às exigências do Ministério da Agricultura (MAPA). Estimou-se o valor do produto final com base nos valores médios pagos pela agricultura, verificando-se que o composto com ME geraria uma receita anual de R\$ 349.653,9 e o produto sem ME de R\$ 51.269,9. O resultado econômico é positivo, pois o custo da compostagem, descontado o valor dos nutrientes, é menor que o custo de disposição em aterros sanitários.

**Palavras-chave:** lodo compostado, compostagem, tratamento de resíduos, reúso agrícola.

## ECONOMIC ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF COMPOSTING SEWAGE SLUDGE FOR AGRICULTURAL PURPOSES IN THE SEWAGE TREATMENT FACILITY OF BOTUCATU-SP

**ABSTRACT:** This study aimed to evaluate the composting cost of *in natura* sludge produced at the SABESP's Sewage Treatment Plant in Botucatu, São Paulo, and to determine the value of nutrients present in the composting sludge with and without the addition of structuring material (ME). The study was based on the diary production of 16 tons of sludge, which generates an approximate annual cost of R\$ 1,466,438.40 in transport and disposal in a landfill located in the municipality of Paulínia, São Paulo. The annual production cost of composting sewage sludge with and without ME was estimated. Analyzes of samples of the final products were carried out to estimate the value of nutrients present in the two types of composting sludge. The samples also indicate that the final product meets the parameters of CONAMA Resolution 375/06 and the requirements of the Ministry of Agriculture (MAPA). The value of the final product was estimated based on the average amounts paid by agriculture, verifying that the compost with ME would generate an annual income of R\$ 349,653.9 and the product without ME of R\$ 51,269.9. The economic result is positive; that is, the cost of composting, discounted the value of the nutrients, is less than the cost of landfill disposal.

**Keywords:** sludge composting, composting, waste treatment, agricultural reuse.

## 1 INTRODUÇÃO

Lodo é o resíduo sólido, semi-sólido ou líquido gerado durante o tratamento de esgoto doméstico (ARVIND, 2004). Já o termo biossólidos foi introduzido pela indústria de tratamento de águas residuárias no início dos anos 1990 e agora também é usado pela EPA (Agência de Proteção Ambiental). O lodo de esgoto origina-se do processo de tratamento de água residuária dos esgotos. Devido aos processos físico-químicos envolvidos no tratamento, o lodo tende a concentrar metais pesados, compostos orgânicos pouco degradáveis, assim como agentes potencialmente patogênicos, como vírus, bactérias, protozoários, entre outros (ROMAN, 2018).

A destinação deste resíduo é causa de preocupação nas empresas de tratamento de esgotos, órgãos ambientais e agências de pesquisa. Estudos apontam um aumento acentuado na produção de lodo para os próximos anos, devido ao aumento da capacidade de tratamento de esgotos dos países em desenvolvimento (SAITO, 2007). No Brasil, do total de esgotos gerados, segundo o Sistema de Informações sobre Saneamento (SNIS), em 2019, apenas 49,1% são tratados. Nas macrorregiões, os índices variam de 22,0% na Região Norte a 56,8% na Região Centro-Oeste. Dos esgotos coletados, 78,5% são tratados, segundo informações dos prestadores de serviços que participam do SNIS. Nas macrorregiões, o menor percentual de esgoto tratado é o da macrorregião Sudeste, com 73,4% e o maior é o da Sul, com 94,6%, lembrando, contudo, que a Região Sudeste é a maior produtora em volume. No Brasil, estima-se um total anual de 5,8 bilhões de m<sup>3</sup> de esgoto coletado e 4,5 bilhões de m<sup>3</sup> ao ano de esgoto tratado (BRASIL, 2019). Com o estabelecimento do Marco Legal do Saneamento Básico prevê-se que perto de 90% da população deva ter acesso à coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020a), o que deve aumentar sobremaneira a geração de esgotos, daí a preocupação com o tratamento e destinação final deste resíduo.

Para Kacprzak et al. (2017), o lodo de esgoto deve ser considerado como um

reservatório de energia e compostos valiosos tais como matéria orgânica, carbono, fósforo, nitrogênio, ácidos voláteis e proteínas que devem ser reciclados, bem como pode ser importante fonte de energia.

O lodo de esgoto é um resíduo de difícil destinação pelos possíveis efeitos ambientais adversos ao solo e às águas subterrâneas. Em casos de incineração, o lodo pode acarretar problemas de poluição atmosférica. Mesmo em países desenvolvidos, onde é comum seu uso como condicionante de solo pelos benefícios de adição de matéria orgânica, nutrientes e aumento da capacidade de retenção hídrica, o setor vem sofrendo grande pressão por normas regulatórias por parte do público.

Em função do potencial esgotamento da capacidade de recebimento dos aterros atuais e dos problemas econômicos e ambientais relacionados à abertura de novas áreas para a disposição destes resíduos, é importante analisar alternativas que sejam técnica e economicamente viáveis. A partir de diferentes tratamentos como secagem, biodigestão, solidificação, compostagem, entre outros, Kim, You e Park (2017) elencam diversos usos possíveis para o lodo, tais como matéria prima para a produção de cimento, condicionante de solo, combustível para usinas térmicas e fertilizante agrícola.

Dentre as características do lodo de esgoto, destaca-se o teor de matéria orgânica e nutrientes importantes para uso agrícola como nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes. A Resolução 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) autoriza a comercialização de biossólidos derivados do lodo de esgoto para aplicação no solo para cultivo agrícola, desde que atendam as disposições quanto aos organismos com potencial patogênico como protozoários, ovos de helmintos, vírus e bactérias, além da observação quanto a concentração de metais pesados (BRASIL, 2020b).

Uma das alternativas para possibilitar o uso do lodo para finalidades agrícolas é a compostagem, cujo produto final pode ser utilizado como fertilizante e condicionante de solo e pode ser uma alternativa tecnologicamente muito simples.

A tecnologia de compostagem visa decompor a matéria orgânica usando os microrganismos do solo para utilizar o componente fertilizante contido no lodo de esgoto. Lodo compostado tem um alto valor agrícola, não é infeccioso e é um produto estabilizado (KIM; YOU; PARK, 2017).

A compostagem do lodo de esgoto traz outras vantagens, entre elas o aumento da vida útil de aterros sanitários, o reaproveitamento de matéria orgânica na agricultura e a reciclagem de nutrientes para o solo (GUPTA et al., 2020). Para além dos aspectos técnicos, a compostagem será um processo economicamente viável se os custos de compostagem forem inferiores aos custos da alternativa em uso. A compostagem do lodo de esgoto incorre em custos de infraestrutura, custos operacionais, custos de logística e de insumos, e de análise laboratorial.

Este custo pode ser coberto em parte pelo valor do lodo compostado, que sendo rico em nutrientes, pode ser usado, como substrato, auxiliar na recuperação de áreas degradadas, condicionante de solo e para uso agrícola ou florestal (AFÁZ et al., 2017; SILVA et al., 2018; MELO et al., 2018; REHMAN; QAYYUM, 2020; EID et al., 2019; MAIA et al., 2018).

Além disso, benefícios sócio ambientais podem ser alcançados pela compostagem do lodo de esgoto, ao aumentar a vida útil dos aterros sanitários. Uma das principais preocupações do tratamento de esgoto é o destino adequado do lodo gerado no processo. Em geral, ele é levado para aterros sanitários. Porém, essa alternativa apresenta alto custo com transporte e disposição, já que os aterros disponíveis, muitas vezes, encontram-se distantes das estações de tratamento de esgotos. No caso da estação de Botucatu, o material é transportado em caminhão até Paulínia, localizada a 150 km de distância (SABESP, 2018).

A busca por soluções economicamente viáveis e ambientalmente vantajosas para o tratamento e disposição final de lodos de Estações de tratamento continua sendo um desafio em vários países, principalmente no Brasil, onde o assunto é mais recente. Em face da complexidade urbana, não pode ser

identificada uma solução única para o tratamento e disposição final dos lodos de suas ETEs, devendo cada uma das opções ser ponderada para cada ETE individualmente, em função de seus aspectos técnicos, econômicos, ambientais, sociais e políticos.

Devido ao crescimento urbano acelerado, a produção de lodo gerado nas ETEs também aumenta, principalmente, no estado de São Paulo, onde se encontra a maior parte da população urbana do país. Embora esse resíduo represente em média 1% a 2% do volume total do esgoto tratado, seu gerenciamento é bastante complexo e demanda custos elevados.

O processamento e a disposição final do lodo podem representar até 60% do custo operacional de uma ETE. Geralmente, para a destinação final do lodo, são utilizados os aterros sanitários, no entanto, alguns estudos vislumbram sua aplicação como insumo agrícola, fertilizante ou mesmo na construção civil.

Diante da necessidade de preservação ambiental ao se destinar corretamente os resíduos sólidos resultantes do tratamento de esgoto, surge o desafio de encontrar formas economicamente viáveis e ecologicamente seguras para reutilizar o lodo, reintegrando um produto de descarte ao ciclo produtivo (IWAKI, 2018).

Tendo em vista os custos crescentes de transporte e disposição do lodo de esgoto produzido na Estação de Tratamento de Esgotos de Botucatu, este estudo foi desenhado para analisar a economicidade de compostar o lodo e estimar o valor do produto final para fins agrícolas, fornecendo subsídios ao gestor público para tomada de decisão.

O objetivo deste estudo foi avaliar economicamente a produção de lodo de esgoto compostado, com e sem material estruturante, produzido pela Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) de Botucatu para reúso como biofertilizante agrícola e como uma alternativa à disposição final do lodo em aterros sanitários.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na ETE localizada na Fazenda Experimental Lageado, operada pela SABESP no município de Botucatu, com área do terreno de 133.000 m<sup>2</sup>, 3.757 m<sup>2</sup> de área construída e 54.073 m<sup>2</sup> de área livre.

Após o tratamento, o lodo de esgoto resultante passa pela centrífuga de secagem para que o teor de umidade seja reduzido e, em seguida, é acondicionado em caçambas. Atingido o limite de três caçambas, o lodo fresco é transportado até a estufa de compostagem.

Os dados para a avaliação econômica do processo foram coletados de dois ensaios de produção de lodo compostado realizados em 2016: um lote com a compostagem de 16 t de lodo fresco sem material estruturante, denominado lote sem material estruturante (LSME) e outro lote com a compostagem de 16 t de lodo fresco e 16 toneladas de material estruturante, em que foi utilizada a casca de eucalipto como fonte de carbono para o processo. O material foi disponibilizado pela DURATEX S.A. – empresa florestal da região, e a mistura foi denominada lote com material estruturante (LCME).

A Tabela 1 mostra os dados obtidos dos ensaios na ETE de Botucatu.

**Tabela 1.** Parâmetros da produção de lodo de esgoto compostado em dois ensaios conduzidos na ETE Botucatu em 2016.

	LCME <sup>1</sup>	LSME <sup>2</sup>
Lodo fresco (t)	16	16
Material Estruturante (t)	16	-
Tempo de processamento (dias)	30	60
Redução do volume inicial de lodo fresco ao fim do processo (%)	-	80
Volume final do lote (t)	16	3,2
Volume de lodo <i>in natura</i> (t)	5.760	5.760
Lotes de composto (t)	11	10
Produção Estimada (t ano <sup>-1</sup> )	5.280	960

1 Lote com material estruturante

2 Lote sem material estruturante

Fonte: Martins (2016)

A partir dos dados dos ensaios, foi estimada a produção anual de lodo compostado com e sem material estruturante. A ETE produz anualmente 5.760 t de lodo de esgoto. Para o lote com material estruturante (LCME), o tempo médio de processamento foi de aproximadamente 30 dias, mas é possível realizar apenas 11 ciclos de compostagem ao ano em função dos períodos de composição das leiras e movimentação interna de materiais. Considerando que são produzidas 16 t diárias, distribuídas em 11 ciclos de compostagem, ao final de um ano, são obtidas 5.280 toneladas de composto final. Em virtude da mistura na proporção de 1:1 do tratamento LCME, após ação dos microrganismos na compostagem, não

houve redução significativa em relação ao volume de lodo *in natura*. Para o lote LSME, durante os testes realizados, observou-se a redução de 80% do volume inicial do lote processado, com um ciclo de processamento de 60 dias. Utilizando o mesmo procedimento anterior, estimou-se que seriam produzidas anualmente 960 toneladas de lodo compostado, sem a utilização de material estruturante.

A compostagem foi realizada em uma estufa de alvenaria equipada com o Secador de Dejetos Orgânicos e Lodo de ETE K2026 da empresa Brako Ambiental, que utiliza energia elétrica para o funcionamento. A estufa e o secador constituem os investimentos necessários à compostagem do lodo de esgoto,

incluídos os custos de instalação. Os dados relativos aos investimentos na instalação da estrutura necessária para a prática da compostagem foram fornecidos pela SABESP – Unidade de Botucatu.

O processo de compostagem é realizado por meio do revolvimento mecânico das leiras, realizada pelo secador, que é operado por um funcionário da ETE. Trata-se de um processo relativamente simples, em que o lodo é depositado e revolvido diariamente nas leiras. A medição da temperatura nas leiras é realizada diariamente por um funcionário da ETE.

A metodologia para estimativa do custo de operação de produção do lodo compostado baseou-se no padrão proposto pela American Society of Agricultural and Biological Engineers (2011) que estabelece o custo total de uma operação a partir dos custos fixos e custos variáveis. Pela limitação de dados disponíveis pela SABESP, considerou-se os custos de conservação e manutenção dos investimentos como custos fixos.

A partir dos investimentos na estufa e no secador, foram estimados os custos fixos relativos do sistema, tais como depreciação, juros, conservação e manutenção do sistema. O custo de conservação e manutenção de equipamentos foi estimado em 3% ao ano referente ao valor inicial dos equipamentos e instalações, conforme recomendado por Hoffman (1987) para equipamentos de baixa complexidade.

Utilizou-se o método de depreciação linear, que considera o valor de aquisição, o valor residual e a vida útil do bem. Os juros sobre os investimentos foram estimados com base na taxa Selic média de 2020, como indicativo da taxa de juros média de mercado e aplicada sobre o valor médio do capital investido em edificações e equipamentos, conforme recomendado na metodologia definida pela ASABE (2011).

A metodologia da ASABE é utilizada para estimar custos de operações como mostram os trabalhos de Galvão et al. (2018); Visentin et al. (2020); Tieppo et al. (2019); Sopegno et al. (2016) que fizeram uso da metodologia em diferentes tipos de análise econômica de biosistemas.

Os custos variáveis referem-se ao custo de uso dos equipamentos, e dependem do volume de produção de lodo compostado. Nos ensaios conduzidos, os custos variáveis considerados foram custos de energia elétrica, custos de mão de obra do operador, custos de movimentação interna do lodo, custo do material estruturante e o custo de análise laboratorial. Esses dados foram fornecidos pela ETE.

Os valores dos equipamentos, coletados em 2016 junto à ETE, foram atualizados para 2020, utilizando-se o IGP-M.

O lodo *in natura* possui custo de oportunidade negativo para o gestor deste resíduo, no caso a ETE, pois além de não ter um valor de mercado em si, é necessário arcar com custos de transporte e disposição em aterro sanitário. Assim, a análise econômica do processo de produção de lodo compostado foi feita de forma a comparar os custos de compostagem dos lotes LCME e LSME com os custos de transporte e disposição do lodo *in natura* no aterro de Paulínia.

O lodo compostado é rico em nutrientes e pode ser usado com finalidade de fertilização e condicionante de solo. Procurou-se avaliar o valor potencial do lodo, que ao ser colocado no mercado, pode mitigar o custo de compostagem. O valor potencial do lodo compostado foi estimado a partir de seu conteúdo em macronutrientes necessários para a produção agrícola. Para tanto, amostras dos dois lotes de lodo foram encaminhadas ao Instituto Agrônomo de Campinas para análise e determinação dos teores de nitrogênio, fósforo e potássio.

Estes macronutrientes foram precificados com base nas cotações médias vigentes no ano de 2020 para ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, disponibilizadas pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020). As análises foram feitas de acordo com os parâmetros da Resolução 375 do CONAMA (BRASIL, 2006) e das exigências do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), e atenderam a ambas. Com base no volume final do composto

produzido, do conteúdo em macronutrientes e seus respectivos preços, foi possível estimar o valor potencial do lodo compostado que ao ser colocado no mercado, pode mitigar o custo de produção.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o processamento do lodo, foram necessários dois investimentos principais: a estufa no valor de R\$760.000 e a aquisição e instalação do equipamento de revolvimento e secagem do lodo de esgoto por R\$1.010.000,00, atualizados para 2020 a partir da data de aquisição dos equipamentos. Os custos fixos decorrentes deste investimento encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2.** Custos fixos da estufa de compostagem e secador em R\$ ano<sup>-1</sup>

<b>Itens de custo fixo</b>	<b>Valor</b>
Juros	84.567,2
Depreciação	122.553,0
Conservação e manutenção	55.852,5
Total	262.972,7

Fonte: Martins (2016)

Os custos variáveis são os custos de movimentação interna do lodo, energia elétrica e mão-de-obra utilizadas diretamente no processo, o custo de aquisição do material estruturante e a análise laboratorial do resíduo.

A movimentação interna do lodo da centrífuga até a estufa é feita por meio de empresas terceirizadas, de segunda a sexta. São utilizadas três caçambas a um custo unitário de R\$88,40 por unidade totalizando um custo anual de R\$96.647,00.

O custo de mão-de-obra foi estimado com base no salário do operador do equipamento, que foi de R\$ 18,70 por hora e o tempo de operação do equipamento de secagem e revolvimento que é de 5 horas diárias, 30 dias por mês, totalizando R\$33.595,00 anuais.

Como não há medição independente de energia elétrica na estufa, este custo foi estimado utilizando a tarifa de energia em R\$ KWh<sup>-1</sup> a cada mês e multiplicado pelo consumo

de energia do equipamento que é de 45 kWh segundo o manual do fabricante. O custo de energia elétrica foi estimado em R\$51.410,00 ao ano, considerando que o equipamento opera 5 horas por dia durante 30 dias ao mês.

O material estruturante, que é casca de eucalipto picada, apresenta um preço de aquisição de R\$ 13,6 t<sup>-1</sup> mais o custo de transporte até a ETE Lageado de R\$ 503,00, totalizando R\$ 259.488,00 anuais.

Para o lote LSME, não foi considerado este custo. O lodo de esgoto, por tratar-se de um resíduo, foi considerado como custo zero. O custo da análise laboratorial foi de R\$ 1.305,00 por amostra, sendo necessária a realização de uma amostragem por mês para cada lote produzido. Portanto, para o lote com adição de material estruturante, o custo de análise anual corresponde a R\$ 14.361,00. Enquanto, para o lote sem material estruturante, o custo anual corresponde a R\$ 13.056,00 (Tabela 3).

**Tabela 3.** Custos variáveis da produção dos lotes de lodo compostado (R\$ ano<sup>-1</sup>)

<b>Itens de custo variável</b>	<b>LCME<sup>1</sup></b>	<b>LSME<sup>2</sup></b>
Mão de obra	33.595,00	33.595,00
Movimentação interna	99.647,00	99.647,00
Energia Elétrica	51.410,00	51.410,00
Material Estruturante	259.488,00	0
Lodo	0	0
Análise laboratorial	14.361,00	13.056,00
<b>Total</b>	<b>458.501,00</b>	<b>197.708,00</b>

1 Lote com material estruturante

2 Lote sem material estruturante

Fonte: Martins (2016)

Para estimar o valor do biossólido produzido, foram realizadas análises laboratoriais para mensurar o conteúdo de macronutrientes, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Conteúdo de macronutrientes nas amostras analisadas em mg do nutriente por kg de lodo compostado.

<b>Nutriente (em mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>LCME<sup>1</sup></b>	<b>LSME<sup>2</sup></b>
Nitrogênio Amoniacal	7.457	8.169
Potássio	4.720	1.824
Fósforo	31.000	24.800

1 Lote com material estruturante

2 Lote sem material estruturante

Fonte: Laudos IAC 0663/15, 0664/15, IAC 1810/15 e 1811/15

A partir dos volumes produzidos de composto, do conteúdo de nutrientes e dos preços de mercado dos nutrientes, foi obtido o valor do lodo compostado (Tabela 5).

**Tabela 5.** Volume e valor estimado dos lotes de lodo compostado produzidos na ETE-Botucatu.

	<b>LCME<sup>1</sup> (t ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>LSME<sup>2</sup> (t ano<sup>-1</sup>)</b>
Ureia	39,37	7,84
Superfosfato	164,20	23,81
Cloreto de Potássio	24,92	1,75
<b>Total</b>	<b>228,49</b>	<b>33,4</b>
	<b>LCME<sup>1</sup></b>	<b>LSME<sup>2</sup></b>
	<b>(R\$ ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>(R\$ ano<sup>-1</sup>)</b>
Ureia	79.192,8	15.770,2
Superfosfato	220.958,5	32.040,3
Cloreto de Potássio	49.262,7	3.459,5
<b>Total</b>	<b>349.413,9</b>	<b>51.269,9</b>

1 Lote com material estruturante

2 Lote sem material estruturante

Fonte: Martins (2016)

A Tabela 6 mostra o custo final do lodo de esgoto compostado, descontando-se seu valor em nutrientes.

**Tabela 6.** Custo final da compostagem, descontando-se o valor dos nutrientes presentes no lodo compostado (R\$ ano<sup>-1</sup>).

	LCME <sup>1</sup>	LSME <sup>2</sup>
Custo fixo (R\$ ano <sup>-1</sup> )	262.972,7	262.972,7
Custo variável (R\$ ano <sup>-1</sup> )	458.501,0	197.708,0
Custo total da compostagem	721.473,7	460.680,7
(-) Valor nutrientes	349.413,9	51.269,9
Custo final do composto	372.059,7	409.410,7

1 Lote com material estruturante

2 Lote sem material estruturante

Fonte: Martins (2016)

A alternativa em uso é o transporte do lodo para disposição em aterro sanitário. Este serviço é realizado quase que diariamente pela empresa RochaForte Saneamento. Por não haver alterações significativas no volume produzido diariamente pela ETE, considerou-se o valor médio de R\$64,50 pago por caçamba, sendo necessárias três caçambas por dia para a movimentação do material.

Nos finais de semana, período em que não há transporte, o volume acumulado no período é transportado no próximo dia útil. A disposição final é realizada no aterro Estre

Ambiental SA, no município de Paulínia-SP, a um custo de R\$ 130,00 t<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Portanto, o custo total para transporte e disposição do lodo *in natura* foi de R\$ 254,59 t<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, totalizando R\$ 1.466.438,40 ano<sup>-1</sup> para 5.760 toneladas de lodo *in natura* produzidas anualmente na ETE.

A Tabela 7 mostra os custos anuais de processamento por tonelada de lodo *in natura* com e sem material estruturante, descontados os respectivos valores do biossólido, comparativamente ao custo de transporte e disposição do lodo *in natura* em aterro sanitário.

**Tabela 7.** Custo de produção do lodo compostado e custo de transporte e disposição em aterro sanitário do lodo *in natura*.

Custo	R\$ t <sup>-1</sup>
LCME <sup>1</sup>	125,3
LSME <sup>2</sup>	80,0
Transporte e disposição no aterro sanitário	254,6

1 Lote com material estruturante

2 Lote sem material estruturante

Fonte: Martins (2016)

Verifica-se que qualquer das duas alternativas de compostar o lodo é uma opção mais econômica que sua disposição em aterros sanitários, pois o custo por tonelada processada é menor que o custo de envio ao aterro sanitário. A opção de produzir o lodo sem material estruturante é a de menor custo, já que não há pagamento para compra e transporte de material estruturante. Apesar de permanecer o dobro do tempo na estufa, comparado ao tempo do composto com ME, o lodo seco representa cerca de 31% do custo de disposição em aterro. Por outro lado, em virtude do reduzido volume

final produzido, a quantidade de nutrientes é menor e a receita de uma eventual comercialização não teria impacto significativo no custo de produção do lodo compostado. Além disso, tecnicamente recomenda-se fortemente a adição de uma fonte rica em carbono para ajustar a relação C/N e melhorar a permeabilidade dos gases e reduzir a volatilização da amônia (AWASTHI et al., 2016).

A compostagem com adição de ME apresentou um custo 49% inferior ao custo de disposição em aterro e apresenta período de

processamento menor, gerando um composto com maior conteúdo de nutrientes. Esta alternativa será mais atrativa à medida que se consolide um mercado para este tipo de fertilizante, pois o volume produzido e o conteúdo em macronutrientes é superior ao lodo compostado sem o uso de material estruturante.

Outros estudos também mostram a viabilidade econômica da compostagem do lodo. Tarpani e Azapagic (2018) também verificaram por meio da análise do ciclo de vida que a opção mais econômica para o manejo do lodo é a compostagem, comparativamente a outros métodos de processamento, como a incineração. Bekchanov e Mirzabaev (2018) mostraram que a compostagem dos resíduos no Sri Lanka diminuiria os custos totais de gerenciamento de resíduos e uso de fertilizantes químicos em US\$ 191 milhões. Além disso, a facilitação do comércio do composto expandiria ainda mais o potencial de compostagem no país, reduzindo os custos com

a gestão de resíduos e os custos de uso de fertilizantes químicos em U\$ 357 milhões. Em outro estudo, D'ávila et al. (2019) mostram a atratividade dos investimentos em compostagem do lodo com obtenção de rentabilidade de 61%.

O estudo de uma logística verde seria um ponto importante para a redução do custo do material estruturante, caso o composto produzido pudesse ser revertido para a própria empresa florestal para adubação das plantações de eucalipto. Cabe avaliar também a possibilidade de se obter outra fonte de carbono em parceria pública, utilizando, por exemplo, resíduo de podas urbanas e um mercado de jardinagem e paisagismo.

Atualmente, já é possível a venda do composto oriundo da compostagem do lodo desde que obedecidas as regras estabelecidas pela Resolução nº 481 do CONAMA (BRASIL, 2017). A Tabela 8 mostra indicadores de mercado para a produção de lodo compostado.

**Tabela 8.** Custo final da compostagem, descontando-se o valor dos nutrientes presentes no lodo compostado (R\$ ano<sup>-1</sup>).

	LCME <sup>1</sup>	LSME <sup>2</sup>
Custo compostagem (R\$ ano <sup>-1</sup> )	721.473,7	460.680,7
Produção anual (t ano <sup>-1</sup> )	5.280	960
Custo unitário (R\$ t <sup>-1</sup> )	136,6	479,9
Preço de mercado <sup>3</sup> (R\$ t <sup>-1</sup> )		85

1 Lote com material estruturante

2 Lote sem material estruturante

3 ETE de Jundiaí-SP

Fonte: Martins (2016)

O custo final do lodo compostado com material estruturante é de R\$136,6 t<sup>-1</sup>. O valor é superior ao preço de mercado, tomando como referência o preço de venda do lodo produzido na ETE de Jundiaí. No caso do lodo sem a utilização de material estruturante, o material produzido é mais concentrado em nutriente e poderia ser vendido em nichos específicos de mercado.

Destaca-se que quanto mais distantes os aterros, os custos de transporte se elevam, tornando a compostagem mais atrativa que a disposição em aterros. Além disso, a redução da

vida útil dos aterros deverá implicar em custos crescentes de disposição destes resíduos.

Outro ponto é que podem ser analisadas alternativas de redução de custos do processo. Os custos de movimentação interna do lodo dentro da estação são significativos, devendo-se analisar a possibilidade de implantação de tubulações de bombeamento de lodo da centrífuga até a estufa, evitando, por exemplo, que o processo de alimentação das leiras seja interrompido caso haja suspensão do contrato de transporte. Além do investimento em bombas e tubulação deve-se levar em conta que o custo de energia elétrica para acionamento

das bombas deve ser inferior ao valor mensal pago para o transporte interno.

A análise mostra que a compostagem gera um produto com valor econômico, e mesmo que a empresa doe o produto *in situ*, o processo gera uma economia significativa apenas com a economia de custo de transporte e disposição do lodo *in natura* em aterros sanitários.

#### 4 CONCLUSÕES

A compostagem do lodo de esgoto na estação de tratamento de esgoto (ETE) de Botucatu mostrou-se economicamente viável face ao custo de transporte e disposição do lodo

com e sem o uso de material estruturante, mesmo descartando a receita gerada pela comercialização do produto final. A estimativa do valor dos nutrientes no resíduo mostra que é possível gerar receita com a venda do composto, independentemente do método de produção. O desafio de encontrar formas economicamente viáveis e ecologicamente seguras para reintegrar um produto de descarte ao ciclo produtivo demanda estudos de economicidade de processos existentes ou que venha a ser desenvolvidos para que os gestores possam tomar as decisões mais racionais, em acordo com as características das regiões de cada ETE.

#### 5 REFERÊNCIAS

- AFÁZ, D. C. S.; BERTOLAZI, K. B.; VIANI, R. A. G.; SOUZA, C. F. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 12, n. 1, p. 112-123, jan./fev. 2017.
- ARVIND, K. **Environmental pollution**. A text book of environmental science. New Delhi: APH Publishing Corporation, 2004.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Agricultural machinery management data**. St. Joseph: ASABE, 2011.
- AWASTHI, M. K.; QUAN, W.; HUI, H.; RONGHUA, L.; FENG, S.; LAHORI, A. H.; PING, W.; DI, G.; ZHANYU, G.; SHUNCHENG, J.; QIANG, Z. Z. Effect of biochar amendment on greenhouse gas emission and bio-availability of heavy metals during sewage sludge co-composting. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 135, p. 829-835, 2016.
- BEKCHANOV, M.; MIRZABAEV, A. Circular economy of composting in Sri Lanka: opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 202, n. 20, p. 1107-1119, nov. 2018.
- BRASIL. **Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Presidência da República, 2020a. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm). Acesso em: 07 mar. 2021.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Serviço Nacional de Informações de Saneamento. **Informações para o planejar o Esgotamento Sanitário**. Diagnostico SNIS-AE 2019. Brasília, DF: SNIS, 2019. Disponível em: [http://www.snis.gov.br/downloads/cadernos/2019/DO\\_SNIS\\_AO\\_SINISA\\_ESGOTO\\_SNIS\\_2019.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/cadernos/2019/DO_SNIS_AO_SINISA_ESGOTO_SNIS_2019.pdf). Acesso em: 12 mar. 2021.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente Resolução CONAMA nº. 375, de 30 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial**

**da União:** Seção 1, Brasília, DF, p. 141-146, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº. 481, de 03 de outubro de 2017. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, p. 51, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Nº 498, de 19 de Agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. . **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, edição 161, p. 265, 2020b.

D'AVILA, J. V.; CHAVES, M. C. C.; SANTOS, F. S.; PERES, A. A. C. Análise da viabilidade econômico-financeira de sistemas de disposição final de lodo de esgoto. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 12, n. 2. p. 541-555, 2019.

EID, E. M.; ALRUMMAN, S. A.; EL-BEBANY, A. F.; FAWY, K. F.; TAHER, M. A.; HESHAM, A. E.; EL-SHABOURY, G. A.; AHMED, M. T. Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 26, n. 1, p. 392-401, 2019.

GALVÃO, C. B.; GARCIA, A. P.; ALBIERO, D.; RIBEIRO, A.; BANCHI, A. D. Operational management of the cane infield wagon: Analysis of the cost of repair and maintenance. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 3, p. 218-222, mar. 2018.

GUPTA, A. K.; MINJ, A.; YADAV, D.; POUDEL, A. Utilization of solid or liquid wastes in agriculture. **Journal of Wastes and Biomass Management**, Cyberjaya, v. 3, n. 1, p. 01-04, 2021.

HOFFMANN, R.; ENGLER, J. J. C.; SERRANO, O.; THAME, A. C. M.; NEVES, E. M. **Administração da empresa agrícola**. São Paulo: Pioneira, 1987.

IWAKI, G. **Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs**. São Paulo: Portal Tratamento das Águas, 2018. Disponível em <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-et-as-e-et-es/>. Acesso em: 14 jun. 2021.

KACPRZAK, M.; NECZAJ, E.; FIJAŁKOWSKI, K; GROBELAK, A.; GROSSER, A.; WORWAG, M.; RORAT, A.; BRATTEBO, H.; ALMÅ, Å.; SINGH, B. R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental research**, San Diego, v. 156, n. 7, p. 39-46, 2017.

KIM, H. J.; YOU, J. E.; PARK, C. J. Review of sewage and sewage sludge treatment in Korea. **International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering**, Singapore, v. 101, n. 10, p. 68-74, 2017.

MAIA, F. C. V.; LIMA, S. O.; BENÍCIO, L. P. F.; FREITAS, G. A.; FURLAN, J. C. Qualidade física do solo após aplicação de lodo de esgoto. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 4, p. 345-351, 2018.

MARTINS, S. F. **Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

MELO, W.; DELARICA, D.; GUEDES, A.; LAVEZZO, L.; DONHA, R.; ARAÚJO, A.; MELO, G.; MACEDO, F. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 643, p. 1493-1501, 2018.

REHMAN, R. A.; QAYYUM, M. F. Co-composts of sewage sludge, farm manure and rock phosphate can substitute phosphorus fertilizers in rice-wheat cropping system. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 259, p. 109700, abr. 2020.

ROMAN, N. Microbial environmental risks associated sewage sludge disposal. **Journal of Microbiological Biotechnology**, Troy, v. 3, n. 2, p. 000131, 2018.

SABESP. **Sabesp transforma lodo gerado no tratamento de esgoto em adubo**. Botucatu: Sabesp, 2018. Disponível em <http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaoId=65&id=7905>. Acesso em: 9 mar. 2021.

SAITO, M. L. **O uso do lodo de esgoto na agricultura**: precauções com os contaminantes orgânicos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007. (Documentos, 64). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/15896/1/documentos64.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.

SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Preços Médios Mensais Pagos pelo Agricultura** São Paulo: IEA, 2020. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/Bancodedados.php>. Acesso em: 9 mar. 2021.

SILVA, F. A. M.; NUNES, G. M.; ZANON, J. A.; GUERRINI, I. A.; SILVA, R. B. Resíduo agroindustrial e lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de *Eucalyptus urograndis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 827-828, abr./jun. 2018.

SOPEGNO, A.; CALVO, A.; BERRUTO, R.; BUSATO, P.; BOCTHIS, D. A web mobile application for agricultural machinery cost analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, Nova York, v. 130, p. 158-168, nov. 2016.

TARPANI, R. R. Z.; AZAPAGIC, A. Life cycle costs of advanced treatment techniques for wastewater reuse and resource recovery from sewage sludge. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 204, p. 832-847, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618326611>. Acesso em: 8 jul. 2019.

TIEPPO, R. C.; ROMANELLI, T. H.; MILLAN, M.; SØRENSEN, C. A. G.; BOCHTIS, D. Modeling cost and energy demand in agricultural machinery fleets for soybean and maize cultivated using a no-tillage system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Nova York, v. 156, p. 282-292, jan. 2019.

VISENTIN, R.; MATEUS, C.; ESPERANCINI, M.; VILLAS BOAS, R. Viabilidade econômica da compostagem do lodo de esgoto para uso agrícola. **Holos Environment**, Rio Claro, v. 20, n. 2, p. 152-158, 2020.