

# Análise e comparação técnica e econômica de alternativas de processamento de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários para uso em solos

## *Technical and economic analysis of sewage sludge treatment solutions for land application*

• **Data de entrada:**  
10/02/2022

• **Data de aprovação:**  
21/02/2022

Débora Carvalho Boratto<sup>1\*</sup> | Marcos von Sperling<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.018>

### ORCID ID

Boratto DC  <https://orcid.org/0000-0001-9572-6696>

Sperling M  <https://orcid.org/0000-0001-8467-9492>

### Resumo

Um dos desafios para a ampliação do uso de lodo de esgoto em solos no Brasil é a ausência de informações técnicas e econômicas genéricas acerca das diversas alternativas tecnológicas de processamento. Frente a essa lacuna, o presente trabalho objetiva avaliar e comparar, por meio de índices unitários, aspectos técnicos (requisitos de área, energia e matéria prima) e econômicos (CAPEX e OPEX) de arranjos de processamento de lodo para uso em solos como opções alternativas à destinação em aterro sanitário. Os resultados apontam que, para ETEs de diferentes portes, existem um ou mais arranjos de tratamento de lodo para posterior destinação produtiva em solos que apresentam custos totais (CAPEX + VPL do OPEX em 20 anos) mais baixos do que aqueles obtidos para os arranjos com disposição em aterro sanitário. Os índices demonstram ser uma importante ferramenta de subsídio para estudos de concepção e viabilidade, bem como para o fomento às práticas de economia circular no setor de saneamento.

**Palavras-chave:** Lodo de esgoto. Biossólidos. Índice de custo. Aterro sanitário. Uso em solos. Estações de tratamento de esgoto.

### Abstract

*One of the challenges to increase beneficial land application of sewage sludge in Brazil is the lack of generic technical and economic information about different sludge treatment solutions. Given this gap, this paper aims to evaluate and compare, through unit value indices, technical (area requirements, energy and materials) and economic (CAPEX and OPEX) aspects of sludge treatment solutions for land application as alternative options to landfill disposal. The results suggest that, for different sizes of WWTP, there are one or more sludge treatment solutions for subsequent beneficial land application that present lower total costs (CAPEX + NPV of OPEX in 20 years) than those obtained for solutions followed by landfill disposal. Moreover, unit value indices prove to be an important tool to support the development of conceptual design and feasibility studies, as well as for promoting circular economy practices in the sanitation sector.*

**Keywords:** Sewage sludge. Biosolids. Cost index. Landfill. Land application. Wastewater treatment plant.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil.

\* **Autora correspondente:** debora-boratto@hotmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de tratamento e as atividades ligadas à logística, ao gerenciamento e à destinação final do lodo de esgoto são determinantes para a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE). No Brasil, as práticas mais comuns ainda estão associadas à utilização de tecnologias de processamento seguidas de disposição em aterro sanitário. Entretanto, em resposta às crescentes exigências ambientais e ao aumento dos custos associados à logística de destinação de lodo em aterro, o uso do lodo em solos, então denominado biossólido (BRASIL, 2020), tem sido considerado a alternativa de destinação com maior perspectiva de crescimento no Brasil e no mundo (FERNANDES et al., 2014).

Com base nas características e no tipo do lodo e nos objetivos de destinação final, o processamento do lodo pode envolver as etapas de adensamento ou espessamento (remoção de umidade), estabilização ou digestão (remoção de matéria orgânica), condicionamento (etapa prévia necessária a algumas tecnologias de desidratação), desidratação ou desaguamento (remoção de umidade) e higienização (remoção de organismos patogênicos).

A etapa de desaguamento é usualmente necessária, independentemente do tipo de tratamento da fase líquida do esgoto, e é aplicável, tanto para a destinação final em aterros sanitários como para o uso em solos. Tradicionalmente no Brasil, os leitos de secagem constituem o principal método de desaguamento em ETEs de menor porte, e os sistemas mecanizados de desaguamento, como centrífugas e filtros prensa, são métodos muito utilizados em ETEs de maior porte (GONÇALVES et al., 2014). Recentemente, outros processos naturais de desaguamento têm ganhado espaço no país, com destaque para os sistemas wetlands construídos para lodos (WCL), também chamados de canteiros de mineraliza-

ção de lodos, e os geotêxteis em diferentes conformações (bolsas drenantes, “bags” ou tubos de geotêxtil). Os WCL, além do desaguamento, também são considerados métodos de higienização e de estocagem.

Comparada à destinação em aterro sanitário, que normalmente exige apenas a redução do teor de água do lodo, a disposição de lodos em solos requer etapa complementar de higienização. Dentre os diversos métodos aplicados para essa função, Andreoli et al. (2014) apontam que a caleação ou estabilização alcalina prolongada (EAP), a compostagem e a secagem térmica são os mais usualmente adotados no Brasil. Mais recentemente, o método de secagem solar em estufas também tem sido estudado como alternativa promissora no país (VALENTE, 2015).

Quando o destino final é o uso em solos, após o processamento, os biossólidos precisam ser enviados para instalações de estocagem, uma vez que essas estruturas são necessárias para regularização das quantidades produzidas em relação às demandas de aplicação (COMPARINI, 2002) e para possibilitar o tempo de espera dos resultados das análises de controle e monitoramento do lote formado e da realização do projeto agrônomico. Em alguns casos, como na EAP, também são necessárias para garantir a eficácia do tratamento sanitário (tempo de cura) (MANZOCHI, 2008; BITTENCOURT, 2017).

O uso em solos também requer atividades de controle e monitoramento mais complexas e que devem ser realizadas à luz dos requisitos normativos vigentes. No Brasil, o principal instrumento normativo é a Resolução n. 498 de 19 de agosto de 2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução Conama 498/2020), que estabelece, dentre outros, a necessidade de desenvolvimento de projeto agrônomico e monitoramento dos lotes de lodo e das áreas de aplicação. A frequência de monitoramento depende da quantidade

de biossólido a ser destinado, quando destinado de forma contínua, ou da frequência de formação dos lotes de lodo, sendo esta definida no Plano de Gerenciamento da Unidade de Gerenciamento de Lodos (UGL) (BRASIL, 2020).

Com tantos arranjos de tratamento possíveis e disponíveis no mercado, o conhecimento dos requisitos necessários à aplicação dessas tecnologias e a avaliação econômica das mesmas tornam-se imprescindíveis durante estudos de concepção de sistemas de tratamento e gestão do lodo de ETE. Para isso, as funções custo e/ou os custos/requisitos unitários, por permitirem a estimativa dos parâmetros em função de determinadas variáveis, constituem uma importante base de dados para métodos de tomada de decisão e avaliações mais amplas, nas quais estas informações são avaliadas em conjunto com outras características importantes, como fatores ambientais e sociais (CERQUEIRA, 2019).

Para comparação econômica entre alternativas, os custos de implantação e de operação e manutenção também devem ser avaliados em conjunto, considerando o fluxo de caixa e a vida útil do projeto. Dentre os indicadores econômicos que podem ser utilizados, o Valor Presente Líquido (VPL), que permite verificar a alternativa de menor custo total considerando a vida útil de projeto (em geral de 15 ou 20 anos), é um dos mais utilizados na literatura e em estudos específicos da área de saneamento (VON SPERLING, 2018; CERQUEIRA, 2019).

Apesar de os custos serem frequentemente apontados como um obstáculo ao uso do lodo em solos, poucos são os estudos que de fato comparam economicamente essa alternativa com a tradicional prática de destinação em aterros sanitários. A ausência dessas informações, apresentadas de forma genérica, dificulta a comparação expedita/preliminar entre os possíveis arranjos de gerenciamento de lodo, o que

acaba favorecendo a manutenção das práticas tradicionalmente utilizadas e que, nem sempre, serão as mais adequadas.

## 2 OBJETIVOS

O presente estudo objetiva sistematizar e comparar índices unitários associados aos requisitos de área e aos custos de implantação e de operação dos diversos arranjos de processamento de lodo, incluindo as etapas de desaguamento, higienização, estocagem, transporte e manuseio, controle e monitoramento e destinação final (uso em solos e aterro sanitário). De forma mais ampla, pretende-se fornecer subsídios para discussões e análises acerca da viabilidade do uso do lodo de esgoto em solos e, com isso, contribuir para o fomento dessa prática no Brasil.

## 3 METODOLOGIA

O procedimento metodológico adotado para elaboração do presente estudo foi composto das seguintes etapas:

### 1 - Revisão de literatura e contato com empresas especializadas:

Levantamento dos principais estudos que trazem informações relevantes para obtenção de índices de requisitos e custos unitários associados ao tratamento e gerenciamento de lodo. Ao longo do processo de revisão de literatura, empresas e/ou profissionais especializados foram contatados para obtenção de informações faltantes ou pouco abordadas na literatura. Também foram utilizadas referências da literatura, a exemplo de Von Sperling e Gonçalves (2014), para estimar a produção unitária per capita de lodo (kg ST/hab/dia) para distintos processos de tratamento de esgotos, bem como para obtenção das características típicas do lodo em função das tecnologias de processamento adotadas.

## 2 - Delimitação das condições gerais do estudo:

O estudo considerou o tratamento de lodos secundários de ETEs centralizadas e com remoção contínua/periódica de lodo. Não foi considerado transporte entre ETE-UGL, assumindo que a UGL estaria situada nas adjacências das ETEs. Não foram avaliadas as unidades de adensamento e estabilização. Não foi considerada a influência da captura de sólidos nas etapas de tratamento. Nos custos de implantação, não foram considerados a compra ou desapropriação de terreno e os custos relacionados às etapas de projeto e licenciamento. Nos custos de operação e manutenção, não foram considerados custos de renovação e/ou substituição completa de equipamentos e estruturas caso a vida útil destes for inferior ao horizonte de projeto (o que pode ocorrer especialmente no caso de alternativas mecanizadas), sendo considerado apenas o custo de manutenção anual. Para WCL, o custo de

remoção dos biossólidos ao final do ciclo operacional foi provisionado nos custos de manutenção anual. Não foram considerados custos com realização de análises de monitoramento dos lotes de lodo e das áreas de aplicação no caso do uso em solos, sendo considerados apenas os custos com assistência agrônômica. Para uso em solos, considera-se obtenção de biossólido Classe A (Resolução Conama 498/2020) e destinação de lodo em lotes, sendo, portanto, necessária unidade de estocagem.

A determinação de índices unitários foi realizada com base na massa seca de lodo (kg ST). Os arranjos tecnológicos de processamento considerados e respectivas faixas de aplicação assumidas estão apresentadas na Tabela 1. Para secagem solar, foram consideradas alternativas de sistemas com e sem o aproveitamento energético do biogás.

**Tabela 1-** Arranjos de tratamento de lodo e respectivas faixas de aplicação consideradas.

Geração de lodo (kg ST/dia)	< 100	100-1.000	1.000-4.000	4.000-8.000	8.000-20.000
<b>Destinação: Aterro sanitário</b>					
LS + A.S.					
WCL + A.S.					
GT + A.S.					
DM + A.S.					
<b>Destinação: Uso em solos</b>					
LS + EAP (MN) + ES + U.S.					
LS + COM. + ES + U.S.					
WCL + U.S.					
GT + EAP (MN) + ES + U.S.					
DM + EAP (MC) + ES + U.S.					
DM + COM. + ES + U.S.					
DM + S.S. + ES + U.S.					
DM + S.T. + ES + U.S.					

LS = Leitões de secagem; A.S. = Aterro sanitário; WCL = *Wetlands* construídos para lodos; GT = Geotêxteis; DM = Desaguamento mecanizado (centrífuga, rosca desaguadora); EAP = Estabilização Alcalina Prolongada; MN = Manual; MC = Mecanizada; ES = Unidade de estocagem; U.S. = Uso em solos; COM = Compostagem; S.S. = Secagem solar; S.T. = Secagem térmica.

**FONTE:** a autora (2021).

## 3 - Organização e manipulação das informações:

As informações levantadas para cada tecnologia e unidade de tratamento foram organizadas

e manipuladas de forma a obter índices homogêneos que permitem a comparação entre as diversas tecnologias analisadas (ex.: m<sup>2</sup>/(kg ST/dia), R\$/(kg ST/dia), R\$/kg ST).

**a) Requisitos de área:** foram calculados para “valores máximos” e “valores mínimos”, com o objetivo de apresentar os resultados como faixas de valores típicos. Para área foi utilizada a unidade de “m<sup>2</sup>/(kg ST/dia)”, exceto para sistemas compactos mecanizados, para os quais foram apresentados valores fixos de área (m<sup>2</sup>). As premissas adotadas para cálculo dos requisitos de área das unidades de desaguamento e higienização estão apresentadas na Tabela 2.

Para cálculo da área da unidade de estocagem, foi utilizada metodologia proposta por Cerqueira (2019), considerando tempo de armazenamento dos biossólidos de 6 meses (valor de área mínimo) e 12 meses (valor máximo). Como o cálculo

é influenciado pelas características do lodo final produzido, foram calculados valores para distintas unidades de estocagem: pós EAP (considerando teor de ST final de 50%, massa específica final de 850 kg/m<sup>3</sup> e proporção de material externo incorporado de 0,5 kg cal/kg ST) (BITTENCOURT, 2014; 2017); pós compostagem (teor de ST de 50%, massa específica final de 600 kg/m<sup>3</sup> e proporção de material externo incorporado de 1,0 kg ST/kg ST) (BIOCOMP, 2021; PROSAB, 1999); e pós métodos de secagem térmica e solar (teor de ST de 80%, massa específica final de 1040 kg/m<sup>3</sup>) (CERQUEIRA, 2019; HUBER, 2021; PINTO, 2014). Para EAP manual, o requisito de área foi desprezado, uma vez que os pátios de cura foram considerados unidades de estocagem.

**Tabela 2-** Premissas adotadas para obtenção dos requisitos de área.

Unidade	Parâmetro	Valores adotados	
		MÍN	MÁX
<b>Desaguamento</b>			
Leito de secagem	Taxa de aplicação (kg ST/m <sup>2</sup> )	15 <sup>a</sup>	
	Tempo de ciclo (dias)	18 <sup>b</sup>	20 <sup>c</sup>
WCL	Taxa de aplicação (kg ST/ano)/m <sup>2</sup> )	100 <sup>d</sup>	60 <sup>e</sup>
Geotêxtil	Taxa de aplicação (kg ST/ano)/m <sup>2</sup> )	274 <sup>f</sup>	205 <sup>g</sup>
Desag. mecanizado	Requisito de área (m <sup>2</sup> )	250 <sup>b</sup>	400 <sup>b</sup>
<b>Higienização</b>			
EAP mecanizada	Requisito de área (m <sup>2</sup> )	140 <sup>b</sup>	160 <sup>b</sup>
Compostagem	Capacidade (m <sup>2</sup> /t resíduo.mês)	10 <sup>h,c</sup>	
	Teor de sólidos inicial (%)	20%	
	Proporção <sup>Material Estruturante/Lodo</sup> (kg/kg)	1:1 <sup>h</sup>	2,5:1 <sup>c</sup>
Secagem Solar	Requisito de área (m <sup>2</sup> /(kg ST/dia))	0,4 <sup>i</sup>	0,7 <sup>j</sup>
Secagem Térmica	Requisito de área (m <sup>2</sup> )	150 <sup>b,k</sup>	300 <sup>b,l</sup>

**FORTE:** a autora (2021)

**NOTAS:** a) Valor máximo da Norma NBR 12.209/11; b) Adotado com base em Cerqueira (2019); c) Adotado com base em Pinto (2014); d) Valor conservador para clima tropical; e) Valor máximo utilizado em clima temperado; f) Igual a menor T.A.S. obtida para leitos de secagem; g) Igual a 75% da T.A.S. mínima adotada; h) Adotado com base em Biocomp (2021); i) Adotado com base em Kurt et al. (2015); j) Adotado com base em Huber (2021); k) Sistema sem aproveitamento de biogás; l) Sistema com aproveitamento de biogás.

**b) Custos de implantação:** os índices de custos de implantação foram calculados para cada tecnologia/unidade considerando valores únicos (R\$/m<sup>2</sup> para sistemas extensivos e R\$/(kg ST/dia) para sistemas mecanizados) e redução percentual devido aos ganhos de escala a cada incremento de valor de geração de lodo considerado (em kg ST/dia: 50; 100; 250; 500; 1.000; 2.000;

4.000; 6.000; 8.000; 10.000; 20.000). Esses valores foram atualizados para maio de 2021, considerando a variação acumulada do INCC (Índice Nacional de Custos da Construção) no período. Os valores de R\$/m<sup>2</sup> foram convertidos a R\$/(kg ST/dia) assumindo valores médios de requisitos de área obtidos para cada sistema. As premissas adotadas estão apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** - Premissas adotadas para obtenção dos custos unitários de implantação.

Unidade	Requisito médio de área (m <sup>2</sup> /(kg ST/dia))	Custo unitário (data base: 05/2021) <sup>a</sup>		Redução percentual por ganho de escala (%)
		R\$/m <sup>2</sup>	R\$/kg ST/dia	
Leito de secagem	1,3	946 <sup>b</sup>	1.199	2 <sup>i</sup>
WCL	4,9	600 <sup>c</sup>	2.920	2 <sup>i</sup>
Geotêxtil	1,6	200 <sup>d</sup>	311	2 <sup>i</sup>
Estocagem – pós EAP	0,8	925 <sup>b</sup>	715	2 <sup>i</sup>
Estocagem – pós COM	1,5	925 <sup>b</sup>	1.350	2 <sup>i</sup>
Estocagem – pós S.S. e S.T.	0,3	925 <sup>b</sup>	243	2 <sup>i</sup>
Secagem Solar	0,6	3.500 <sup>e</sup>	1.925	2 <sup>i</sup>
Compostagem	4,1	473 <sup>f</sup>	1.952	10 <sup>j</sup>
Centrífuga	-	-	1.330 <sup>b</sup>	20 <sup>k</sup>
Rosca desaguadora	-	-	2.238 <sup>g</sup>	20 <sup>k</sup>
EAP mecanizada	-	-	733 <sup>b</sup>	20 <sup>k</sup>
Secagem Térmica (S/A)	-	-	2.387 <sup>b</sup>	20 <sup>k</sup>
Secagem Térmica (C/A)	-	-	3.341 <sup>b,h</sup>	20 <sup>k</sup>

**FONTE:** a autora (2021)

**NOTAS:** a) Custo unitário adotado para o menor valor de geração de lodo considerado para o respectivo sistema; b) Adotado com base em Cerqueira (2019), com correção de valor devido à variação acumulada do INCC no período (21,7%); c) Valor médio da faixa típica de valores, com BDI, reportado por Wetlands Construídos (2021); d) Na ausência de informações obtidas na literatura, foi adotado 1/3 do custo unitário para sistemas WCL; e) Adotado com base em orçamentos preliminares realizados em maio de 2021 pela Huber (2021); f) Adotado com base em Visentin (2019) com correção de valor devido à variação acumulada do INCC no período (26,5%); g) Considera-se custo unitário 75% superior do valor adotado para centrífugas, com base em Lindner (2021) e Cerqueira (2019); h) Foi considerado custo unitário 40% superior ao sistema sem aproveitamento de biogás, com base nos valores apresentados por Cerqueira (2019); i) Equivalente ao valor percentual adotado por Cerqueira (2019) para sistemas extensivos; j) Adotado com base na diferença de valores apresentados por Visentin (2019) (492 R\$/m<sup>2</sup>) e por Biocomp (2021) (119 R\$/m<sup>2</sup>), para unidades, respectivamente, de pequeno e de grande porte; k) Adotado com base nos custos unitários de implantação apresentados por Cerqueira (2019) para sistemas mecanizados.

**c) Custos de operação e manutenção:** os índices associados aos custos de operação e manutenção de cada unidade de processamento foram calculados considerando as parcelas de mão de obra, energia, manutenção e matéria-prima. Custos associados a estocagem, transporte e controle e monitoramento foram calculados para os arranjos completos de tratamento.

Para mão de obra, energia e matérias primas, os índices unitários foram calculados pela multiplicação dos custos unitários pelo respectivo valor de demanda/consumo, obtendo o resultado na unidade R\$/kg ST. Os índices unitários de manutenção foram adotados com base nas informações levantadas para cada tecnologia de tratamento, com exceção da EAP manual e geotêxteis, em que os custos com manutenção foram desprezados. As premissas estão detalhadas na Tabela 4 e Tabela 5.

As premissas adotadas para cálculo dos custos com transporte, manuseio, monitoramento e destinação estão apresentadas na Tabela 6. Para

uso em solos, considerando a ampliação das oportunidades de uso em solos pela Resolução Conama 498/2020 e a tendência de aumento das distâncias entre novas ETEs e aterros sanitários, considerou-se para o transporte metade da distância adotada para aterro. Para WCL, como a retirada dos biossólidos ocorre em intervalos maiores de tempo, os custos com a logística de transporte e destinação são aplicados apenas a cada 10 anos de operação. Ressalta-se que não foram considerados custos com caracterização de lodo e das áreas de aplicação, uma vez que estes são dependentes da frequência de formação de lotes de lodo ou da frequência de monitoramento exigida.

Como alguns componentes desses custos são calculados com base no peso úmido e/ou volume final do produto, foram adotadas as seguintes premissas: para leito de secagem, desaguamento mecanizado e geotêxtil, valor de massa específica final típica de 1060 kg/m<sup>3</sup> e teores de sólidos final, respectivamente, de 30%, 20% e 15%

(VON SPERLING E GONÇALVES, 2014; GONÇALVES et al., 2014; ALLONDA, 2021). Para WCL, teor de 40% e massa específica de 600 kg/m<sup>3</sup> (NIELSEN E LARSEN, 2016; WETLANDS CONSTRUIDOS, 2021). Para secagem solar e térmica, 80% ST e 1040 kg/m<sup>3</sup> (HUBER, 2021; PINTO, 2014; CERQUEIRA, 2019). Alternativas que utilizam EAP ou compostagem, teor de sólidos final de 50% e massa específica final, respectivamente, de 850

kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup>. Para esses arranjos, também foi considerado incremento da massa final a ser destinada devido à incorporação de material externo (proporção de material externo na EAP de 0,5 kg ST<sub>CAL</sub>/kg ST<sub>LODO</sub> lodo e na compostagem de 1,0 kg ST<sub>ME</sub>/kg ST<sub>LODO</sub>) (BITTENCOURT, 2014; 2017; CERQUEIRA, 2019; PROSAB (1999; BIOCOMP, 2021).

**Tabela 4-** Premissas adotadas para obtenção dos custos unitários de operação e manutenção.

Premissas	Custo unitário		Demanda / consumo	
	Unidade	Valor	Unidade	Valor
<b>Mão de obra (c/ encargos)</b>				
Agente de Operação	R\$/h	60,00 <sup>a</sup>	(h/dia)/(kg ST/dia)	(h)
Técnico Industrial	R\$/h	80,00 <sup>a</sup>	(h/dia)/(kg ST/dia)	(h)
<b>Energia</b>				
Custo Energia	R\$/kWh	0,50 <sup>a</sup>	kWh/kg ST	(i)
<b>Matéria Prima</b>				
Polímero	R\$/kg	16,00 <sup>a</sup>	g polímero/kg ST	6,0 <sup>j</sup>
Cal	R\$/kg	0,55 <sup>a</sup>	kg cal/kg ST	0,4 <sup>k</sup>
Geotêxtil	R\$/m <sup>3</sup>	180,00 <sup>b</sup>	m <sup>3</sup> geotêxtil/kg ST	0,008 <sup>l</sup>
GLP	R\$/kg	6,60 <sup>c</sup>	kg GLP/kg ST	0,34 / 0,07 <sup>m</sup>
Combustível diesel	R\$/L	4,50 <sup>c</sup>	L diesel/kg ST	0,007 <sup>n</sup>
Material estruturante	R\$/kg	0,068 <sup>d</sup>	kg / kg ST lodo	8,8 <sup>o</sup>
<b>Manutenção</b>				
Leito de secagem	R\$/kg ST	0,13 <sup>e</sup>	-	-
WCL	R\$/kg ST	0,062 <sup>f</sup>	-	-
Compostagem	R\$/kg ST	0,012	-	-
Secagem solar	R\$/kg ST	0,04	-	-
Centrifuga	R\$/kg ST	0,020 <sup>e</sup>	-	-
Rosca desaguadora	R\$/kg ST	0,005 <sup>f</sup>	-	-
EAP mecanizada	R\$/kg ST	0,007 <sup>e</sup>	-	-
Secagem térmica	R\$/kg ST	0,16 <sup>e</sup>	-	-

**FONTE:** a autora (2021)

**NOTAS:** a) Adotado com base em Cerqueira (2019) com correção próxima da inflação acumulada entre janeiro de 2018 e maio de 2021 de 16,74% (IPCA, 2021); b) Valor intermediário entre os modelos de menor e maior custo unitário de Geotube®, conforme cotação realizada em maio de 2021 com a Allonda (2021); c) Preço médio praticado no Brasil em maio de 2021 (ANP, 2021); d) Média entre os valores reportados por Diogo (2019) e por Visentin (2019), corrigida conforme inflação acumulada entre janeiro de 2019 e maio de 2021 de 12,53% (IPCA, 2021); e) Valores médios encontrados por Cerqueira (2019); f) Adaptado de Cerqueira (2019). Inclui custo associado à roçada de entorno e provisionamento dos custos associados à remoção dos biossólidos a cada 10 anos; g) 25% do valor para manutenção de centrifugas, com base em Lindner (2019); h) Ver Tabela 5; i) Centrifuga = 0,14 (média entre valores reportados por Cerqueira (2019), de 0,23, e Lindner (2021), de 0,23); Rosca desaguadora = 0,04 (30% do valor obtido para centrifuga, com base nas estimativas realizadas por Lindner (2021); Secagem solar = 0,10 (obtido com base no valor de 30 kWh/ton água evaporada, segundo Kurt et al. (2015) e valores praticados pela Huber (2021), considerando teor de sólidos de entrada de 20% e de saída de 80%); Secagem térmica = 0,21 (média entre valores reportados por Cerqueira (2019)); j) Valor médio entre dosagem para lodos mistos anaeróbios e lodos aeróbios/ativados (GONÇALVES et al., 2014); k) Valor médio usualmente adotado, conforme Bittencourt (2014); l) Calculado considerando valor médio do teor de sólidos finais esperado de 13% e assumindo massa específica igual a 1.000 kg/m<sup>3</sup>; m) 0,34 = sistema sem aproveitamento de biogás; 0,07 = sistema com aproveitamento térmico do biogás (redução de 79% do consumo de gás GLP). Valores adotados com base em Cerqueira (2019), que considera secador rotativo Bruthus (Empresa Albrecht) com requisitos da ordem de 1.000 kcal para cada kg de água evaporado, considerando teor de sólido de entrada de 20% e de saída de 80%; n) Média entre os valores reportados por Biocomp (2021) e Visentin (2019); o) Calculado considerando proporção de 1,75 kg de material estruturante por kg de lodo (média entre valores da Biocomp (2021), de 1:1, e de Pinto (2014), de 2,5:1) e teor de sólidos no lodo da entrada de 20%.

**Tabela 5-** Premissas adotadas para estimativa da demanda de mão de obra (h/dia).

Geração de lodo (kg ST/dia)	50	100	250	500	1.000	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	20.000
<b>Desaguamento – Demanda de mão de obra (h/dia)</b>											
LS (AO) <sup>a</sup>	0,18	0,36	0,89	1,79	3,57						
WCL (AO) <sup>b</sup>	0,20	0,21	0,22	0,24	0,30	0,40	0,50				
GT (AO) <sup>c</sup>		2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0				
DM (AO) <sup>d</sup>					8,0	8,0	8,0	8,0	12,0	12,0	12,0
DM (TI) <sup>d,e</sup>					1,6	1,6	1,6	1,6	2,4	2,4	2,4
<b>Higienização – Demanda de mão de obra (h/dia)</b>											
EAP MN(AO) <sup>b</sup>	0,45	0,45	0,45	0,91	1,82						
EAP MC (AO) <sup>f</sup>						0,8	0,8	0,8	1,2		
COM (AO) <sup>g</sup>	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0	7,0	9,0	11,0	13,0		
S.S. (TI) <sup>h</sup>					1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	3,0
S.T. (AO) <sup>i</sup>					8,0	8,0	8,0	8,0	12,0	12,0	12,0
S.T. (TI) <sup>i,e</sup>					1,6	1,6	1,6	1,6	2,4	2,4	2,4

AO = Agente de Operação; TI = Técnico Industrial; LS = Leitões de secagem; WCL = *Wetlands* construídos para lodos; GT = Geotêxteis; DM = Desaguamento mecanizado (centrífuga, rosca desaguadora); EAP = Estabilização Alcalina Prolongada; MN = Manual; MC = Mecanizada; COM = Compostagem; S.S. = Secagem solar; S.T. = Secagem térmica.

**FONTE:** a autora (2021).

**NOTAS:** a) Valores calculados com base no valor de produtividade de 280 kg ST/h, conforme valores praticados na COPASA (COPASA, 2021); b) Valores obtidos do estudo de Cerqueira (2019); c) Valores estimados com base na demanda de 6 h/dia para UGL de 2.000 kg ST/dia, conforme reportado por Allonda (2021); d) Foi considerada demanda mínima de um profissional com dedicação exclusiva (8 h/dia) até 6.000 kg ST/dia e de 12 h/dia para portes maiores; e) Para técnico industrial, considera 1/5 da demanda horária do agente de operação, conforme premissas de Cerqueira (2019); f) Valor de 10% da demanda para centrífuga, conforme premissas adotadas por Cerqueira (2019); g) Valores estimados com base na demanda de 13 h/dia para UGL de 8.000 kg ST/dia, conforme valor relatado por Biocomp; h) Valor adotado com base em informações fornecidas pela Huber. Devido ao alto grau de mecanização desses sistemas, foi considerada operação exclusivamente por técnico industrial; i) Valor igual à demanda para centrífuga, conforme premissas adotadas por Cerqueira (2019).

**Tabela 6-** Premissas adotadas para obtenção dos custos de transporte, manuseio, monitoramento e destinação.

Composição	Parâmetro	Unidade	Aterro Sanitário	Uso em solos
Transporte	Distância para destinação	km	100 <sup>a</sup>	50 <sup>b</sup>
	Custo Transporte	R\$/t/km	0,67 <sup>c</sup>	0,67 <sup>c</sup>
Manuseio	Custo Estocagem	R\$/m <sup>3</sup>	-	1,68 <sup>d</sup>
	Custo Carregamento	R\$/m <sup>3</sup>	1,75 <sup>e</sup>	1,75 <sup>e</sup>
Monitoramento e destinação	Assistência agrônômica	R\$/tonelada	-	4,70 <sup>f</sup>
	Destinação final	R\$/tonelada	180 <sup>g</sup>	-

**FONTE:** a autora (2021)

**NOTAS:** a) Média entre os valores reportados por Amaral (2018) e Visentin (2019); b) Segundo Bittencourt (2014), a distância das UGL para as áreas de aplicação (agricultura) varia de 2 km a 140 km; c) Valores médios praticados pela Saneago (2021). Considera combustível, manutenção e pessoal envolvido no transporte; d) Valor adotado com base em Cerqueira (2019) e corrigido conforme inflação no período. Considera mistura/movimentação e empilhamento de lodo no pátio de estocagem com retroescavadeira; e) Valor adotado com base em Cerqueira (2019) e corrigido conforme inflação no período. Considera carregamento de caminhão basculante com pá carregadeira; f) Adotado com base em Amaral (2018) com correção próxima da inflação acumulada entre janeiro de 2018 e maio de 2021 de 16,74% (IPCA, 2021); g) Adotado com base no valor de R\$ 160,00 reportado por Vicentin (2019) com correção próxima da inflação acumulada entre janeiro de 2019 e maio de 2021 de 12,53% (IPCA, 2021). Esse valor está dentro dos valores dos contratos atualmente praticados na SANEPAR, de R\$ 120,00 a 350,00 (SANEPAR, 2021).

#### 4 - Obtenção de índices unitários:

Primeiro, foram obtidos índices unitários de requisitos e custos para cada tecnologia de processamento (desaguamento e higienização) e unidade de estocagem. Em seguida, as tecnologias

e unidades de processamento foram agrupadas para obtenção dos arranjos completos (processamento até disposição final). A partir dos valores individuais para cada tecnologia/unidade, foram obtidos os índices unitários para cada arranjo considerado.



## 5 - Aplicação dos valores obtidos para análise de cenários:

A partir dos índices unitários obtidos para cada arranjo, foi realizada avaliação comparativa entre as potenciais alternativas de tratamento e gerenciamento de lodo, incluindo destinação em aterro sanitário e aplicação em solos, para cinco cenários que consideram ETEs de diferentes portes populacionais (Tabela 7). Para cada cenário, os arranjos avaliados foram aqueles identificados como mais aplicáveis em função do porte, conforme Tabela 1.

O VPL foi utilizado como indicador econômico e o cálculo foi realizado utilizando os índices unitários de CAPEX e OPEX obtidos para cada arranjo de tratamento. Para valores anuais de OPEX, foram somados os custos relativos ao processamento (unidades de desaguamento, higienização e estocagem), transporte, manuseio e destinação. Em seguida, para obtenção do custo total, o OPEX foi trazido a valor presente, considerando horizonte de projeto de 20 anos e taxa de juros de 6,5% ao ano (BCB, 2021), e somado ao CAPEX.

**Tabela 7-** Cenários considerados para avaliação econômica comparativa.

Cenário	Tipo de ETE	Equivalente Habitacional (hab)	Geração de lodo (kg ST/dia) <sup>a</sup>
01 – Pequeno Porte A	UASB + Pós-tratamento aeróbio <sup>b</sup>	2.000	46
02 – Pequeno Porte B	UASB + Pós-tratamento aeróbio <sup>b</sup>	20.000	460
03 – Médio Porte B	UASB + Pós-tratamento aeróbio <sup>b</sup>	50.000	1.150
04 – Médio Porte B	Lodos ativados <sup>c</sup>	100.000	4.500
05 – Grande Porte	Lodos ativados <sup>c</sup>	500.000	22.500

**FONTE:** a autora (2021).

**NOTAS:** a) Considera 23g ST/hab.dia para UASB + pós-tratamento e 45 g ST/hab.dia para lodos ativados (valores típicos reportados por Von Sperling e Gonçalves (2014)); b) Pós-tratamento aeróbio: lodos ativados, biofiltro aerado submerso, filtro biológico; c) Lodos ativados aeração prolongada ou lodos ativados convencional pós etapas de estabilização e adensamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1- Matriz de avaliação global – Índices unitários de área, CAPEX e OPEX

Na Tabela 8 estão apresentadas as faixas de valores (valores máximos e mínimos) para os índices unitários - (a) requisitos de área; (b) CAPEX; (c) OPEX - obtidos para cada arranjo considerado, bem como sua respectiva faixa de aplicação considerada.

Com relação aos requisitos de área, observa-se que os arranjos que utilizam a compostagem como método de higienização foram os que apresentaram os maiores índices unitários, bem como a maior amplitude entre os valores máximos e mínimos. A necessidade de maiores áreas para estocagem dos biossólidos gerados (que possuem material externo incorporado) é um dos fatores que contribuem para o aumento das

áreas requeridas. Já a ampla variação entre os valores máximos e mínimos reflete a discrepância entre os valores adotados como premissas da proporção entre lodo e material estruturante (que variaram de 1,0 a 2,5 kg material estruturante/kg lodo), indicando que este é um parâmetro sensível e que exerce grande influência no resultado final obtido.

Como esperado, arranjos de tratamento que possuem métodos mecanizados de desaguamento/higienização foram os que apresentaram os menores requisitos unitários de área. Fica evidenciado que a disponibilidade de área é fator primordial para a viabilidade técnica de arranjos de tratamento que utilizam métodos extensivos.

Com relação aos índices unitários de CAPEX, observa-se que os arranjos que utilizam métodos de tratamento mecanizados foram os que

apresentaram maior variação entre os valores mínimos e máximos, uma vez que para esses sistemas foi considerada maior redução percentual dos índices unitários em função do ganho de escala (20% contra 2% ou 10% para métodos extensivos). Os arranjos que utilizam sistemas de secagem térmica e compostagem foram os que apresentaram maiores índices unitários de implantação, enquanto sistemas com uso de geotêxteis foram os que apresentaram os menores índices.

Quando comparadas alternativas que utilizam o mesmo método de desaguamento, porém, considerando disposição em solo versus aterro sanitário, tem-se que o CAPEX é sempre mais elevado na primeira situação. Isso porque, além do desaguamento, a disposição final em solos requer instalações adicionais (higienização e estocagem), que encarecem os custos unitários de implantação. Exceção ocorre para os sistemas WCL, que, por cumprirem a função de higienização e de estocagem, não necessitam de estruturas adicionais para uso em solos, ou seja, o CAPEX é o mesmo independentemente da forma de destinação final. A eliminação da unidade complementar de estocagem configura uma vantagem dos sistemas WCL em comparação com os demais arranjos de beneficiamento do lodo para aplicação em solos, uma vez que a preocupação com a geração de maus odores nos galpões de estocagem é, por vezes, um dos fatores dificultadores da implementação de programas de uso do lodo em solos.

Com relação ao OPEX, observa-se que os arranjos que utilizam sistema de secagem térmica sem aproveitamento de biogás, geotêxtil e o arranjo leito de secagem seguido de compostagem foram os que apresentaram os maiores índices unitários. O aproveitamento de biogás na secagem térmica (e conseqüente redução do consumo

de GLP) reduziu, em média, em R\$ 1,76 o custo unitário total de operação. De forma análoga, a incorporação da unidade de EAP a jusante do desaguamento com geotêxteis e posterior destinação em solos, apesar dos custos adicionais com consumo de cal e mão de obra, reduziu, em média, em R\$ 1,13 o índice unitário, especialmente em função da redução dos custos com transporte e disposição final.

Para métodos mecanizados de desaguamento, a incorporação de unidade complementar de higienização que permite uso do lodo em solos proporcionou, considerando valores médios, redução do OPEX global para a maioria das alternativas (sendo a maior redução observada quando considerado o método de secagem solar), exceto para os arranjos que utilizam secagem térmica sem aproveitamento de biogás, em que os custos operacionais se mostraram mais elevados do que aqueles obtidos considerando disposição em aterro. De forma similar, o arranjo “leito de secagem + EAP + uso em solos” apresentou índices de OPEX próximos ou inferiores àqueles obtidos para o arranjo “leito de secagem + aterro sanitário”.

Tanto para disposição final em aterro sanitário como para uso em solos, os sistemas WCL foram os que apresentaram os menores índices unitários de OPEX. Esse resultado evidencia a simplicidade das rotinas operacionais e logísticas associadas a esses sistemas. Além disso, apesar de não terem sido considerados os custos com monitoramento dos biossólidos e das áreas de aplicação, como nos WCL a frequência de formação de lotes de biossólidos ocorre em intervalos maiores de tempo (5 a 10 anos), as rotinas e custos de monitoramento são substancialmente reduzidas quando comparadas com as demais alternativas.

**Tabela 8-** Matriz de avaliação global de arranjos de tratamento e gerenciamento de lodo: aplicabilidade e índices unitários de área, CAPEX e OPEX.

Destinação	Arranjo	Faixa aplicável (kg ST/dia)					ÁREA <sup>c,d</sup> (m <sup>2</sup> /(kg ST/dia))	CAPEX <sup>a,d</sup> (R\$/ (kg ST/dia))	OPEX <sup>a,b</sup> (R\$/kg ST)				
		<100	100-1.000	1.000-4.000	4.000-8.000	8.000-20.000			Processamento	Transporte	Manuseio	A.A / D.A.	TOTAL
ATERRO SANITÁRIO	Leito secagem + A.S.						1,2 – 1,3	1.106 – 1.199	0,34 – 0,35	0,22	0,006	0,60	1,17 – 1,17
	WCL + A.S.						3,7 – 6,1	2.587 – 2.920	0,07 – 0,30	0,17	0,007	0,45	0,69 – 0,93
	Geotêxtil + A.S.						1,3 – 1,8	281 – 311	1,55 – 2,65	0,45	0,011	1,20	3,21 – 4,30
	Centrífuga + A.S.						(c)	349 – 1.330	0,23 – 0,79	0,34	0,008	0,90	1,47 – 2,04
	Rosca desaguadora + A.S.						(c)	610 – 2.328	0,17 – 0,73	0,34	0,008	0,90	1,41 – 1,97
USO EM SOLOS	Leito secagem + EAP (MN) + U.S.						1,7 – 2,4	1.765 – 1.913	0,67 – 1,11	0,10	0,012	0,014	0,80 – 1,23
	Leito secagem + Compostagem + U.S.						5,2 – 8,5	3.632 – 4.501	1,28 – 4,59	0,13	0,023	0,019	1,46 – 4,76
	WCL + U.S.						3,7 – 6,1	2.587 – 2.920	0,07 – 0,30	0,08	0,007	0,012 e	0,16 – 0,39
	Geotêxtil + EAP (MN) + U.S.						1,8 – 2,8	915 – 1.012	1,88 – 3,14	0,10	0,012	0,014	2,01 – 3,26
	Centrífuga + EAP (MC) + U.S.						0,5 – 1,0	1.528 – 2.722	0,54 – 1,05	0,10	0,012	0,014	0,66 – 1,17
	Centrífuga + Compostagem + U.S.						4,0 – 7,2	2.534 – 4.501	1,04 – 1,73	0,13	0,023	0,019	1,21 – 1,91
	Centrífuga + Secagem Solar + U.S.						0,6 – 1,1	2.270 – 3.499	0,33 – 0,96	0,04	0,004	0,006	0,38 – 1,01
	Centrífuga + Secagem Térmica (S/A) + U.S.						0,2 – 0,4	1.190 – 3.960	2,77 – 3,89	0,04	0,004	0,006	2,82 – 3,95
	Centrífuga + Secagem Térmica (C/A) + U.S.						0,2 – 0,4	1.440 – 4.915	1,01 – 2,13	0,04	0,004	0,006	1,06 – 2,18
	Rosca Desaguadora + EAP (MC) + U.S.						0,5 – 1,0	1.937 – 3.720	0,47 – 0,98	0,10	0,012	0,014	0,60 – 1,11
	Rosca Desaguadora + Compostagem + U.S.						4,0 – 7,2	2.943 – 5.498	0,97 – 1,67	0,13	0,023	0,019	1,15 – 1,85
	Rosca Desaguadora + Secagem Solar + U.S.						0,6 – 1,1	2.531 – 4.496	0,27 – 0,90	0,04	0,004	0,006	0,32 – 0,95
	Rosca Desag. + Secagem Térm. (S/A) + U.S.						0,2 – 0,4	1.452 – 4.958	2,71 – 3,83	0,04	0,004	0,006	2,76 – 3,88
	Rosca Desag. + Secagem Térm. (C/A) + U.S.						0,2 – 0,4	1.702 – 5.912	0,94 – 2,07	0,04	0,004	0,006	1,00 – 2,12

WCL = Wetlands construídos para lodo; A.S. = Aterro sanitário; U.S. = Uso em solos; EAP = Estabilização alcalina prolongada; MN = manual MC = mecanizada; S/A = Sistema sem aproveitamento de biogás; C/A = Sistema com aproveitamento de biogás; A.A = Assistência agrônômica (uso em solos); D.A. = Disposição final (aterro sanitário).

**FONTE:** a autora (2021).

**NOTAS:** a) Valores unitários máximos de CAPEX e OPEX estão associados aos sistemas de menor porte, considerando a faixa de aplicação adotada para cada método; b) Para arranjos de uso em solos, não estão inclusos custos anuais associados à análise laboratorial (valores devem ser acrescidos em função da frequência de monitoramento ou frequência de formação de lotes de lodo); c) Não está incluída a área associada a construção de edifícios de tratamento de lodos para sistemas mecanizados (considerar de 100 a 400 m<sup>2</sup>); d) Requisitos de área e CAPEX associados às unidades de estocagem, quando aplicável, estão inclusos nos índices apresentados; e) Este índice deve ser aplicado apenas no ano de remoção dos biossólidos (a cada 10 anos de operação).

## 2- Avaliação econômica comparativa – ETEs de diferentes portes populacionais

Na Fig. 1 estão apresentados os resultados obtidos na análise dos custos totais (CAPEX + VPL OPEX) para os cinco cenários avaliados.

Para os cenários 01, 02 e 03 (respectivamente, ETEs para 2.000, 20.000 e 50.000 habitantes utilizando UASB + Pós-tratamento aeróbio), o arranjo que utiliza sistema WCL com posterior destinação em solos foi o que apresentou o menor custo total. Nos cenários 01 e 02, esse arranjo demonstrou redução de custos, respectivamente, de 28% e 39% quando comparado com o clássico arranjo “Leito de secagem + aterro sanitário”. No cenário 03, a diferença entre os custos totais do arranjo “WCL + uso em solos” e do arranjo “Centrífuga + aterro sanitário”, alternativa tipicamente adotada em ETEs deste porte, foi ainda mais representativa, sendo que o primeiro apresentou valor cerca de 60% inferior ao encontrado para a opção centrífuga + aterro.

Para o cenário 02, além do arranjo “WCL + uso em solos”, a alternativa “Leito de secagem + EAP + uso em solos” também apresentou custos totais inferiores àqueles obtidos para as alternativas cuja disposição final se dá em aterro sanitário.

Analogamente, no cenário 03, as alternativas de desaguamento mecanizado seguidas de EAP ou de secagem solar com posterior uso em solos também apresentaram custos totais inferiores àqueles obtidos para as alternativas de desaguamento mecanizado, ou geotêxtil, seguido de aterro sanitário. Entretanto, o arranjo “WCL + aterro sanitário”, apesar de apresentar custos superiores ao arranjo “WCL + uso em solos”, ainda apresentou custos totais inferiores aos dos demais arranjos avaliados.

Para o cenário 4 (ETE para 100.000 habitantes utilizando lodos ativados), as alternativas de desaguamento mecanizado seguidas de EAP ou de secagem solar e posterior uso em solos demonstraram ser mais econômicas do que as alternativas que

utilizam apenas o desaguamento seguido de aterro. Apesar do VPL do OPEX ser inferior para os arranjos com secagem solar, os custos totais desses arranjos foram ligeiramente superiores (4%) àqueles obtidos para os arranjos com EAP, uma vez que o CAPEX no primeiro arranjo é mais significativo.

Para o cenário 05 (ETE para 500.000 habitantes utilizando lodos ativados), apenas as alternativas que utilizam sistema de secagem térmica sem aproveitamento de biogás foram mais onerosas do que as alternativas de desaguamento mecanizado seguido de aterro sanitário. Ou seja, o uso de posterior higienização com secagem solar ou secagem térmica com aproveitamento de biogás apresentou os menores custos totais. Comparando esses dois métodos de higienização, tem-se que a alternativa com secagem solar apresentou custos totais cerca de 34% inferiores aos custos com o uso de secagem térmica com aproveitamento de biogás.

De maneira geral, observa-se que os arranjos de tratamento que utilizam geotêxtil, compostagem e secagem térmica sem aproveitamento de biogás foram os que apresentaram os maiores custos totais nos cenários em que foram utilizados. Já a alternativa de secagem térmica com aproveitamento de biogás apresentou custos totais inferiores aos dos arranjos com destinação em aterro apenas no cenário 05.

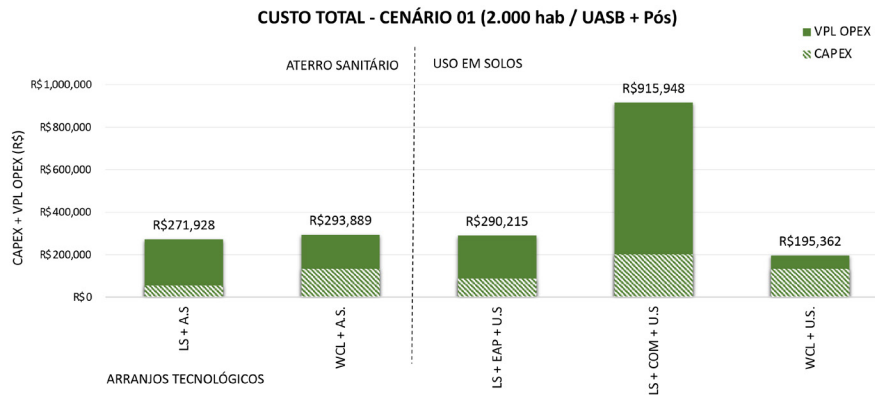
É importante ressaltar que a interpretação desses resultados deve ser feita à luz das premissas que foram utilizadas e que, em alguns casos, são extremamente sensíveis, podendo apresentar grande variabilidade. Alguns exemplos são: o custo do material geotêxtil (no estudo foram considerados valores médios do Geotube®, que são materiais importados, entretanto, o valor pode ser maior ou menor em função do fornecedor e contrato firmado); a compra de material estruturante para compostagem (no estudo foi considerada a aquisição desse material, mas, em alguns casos, esses custos podem ser reduzidos ou até mesmo elimi-

dados); o tipo e custo da fonte de energia utilizada para secagem térmica (no estudo foi considerado gás GLP); o valor adotado para cálculo dos custos com assistência agrônômica para uso em solos; as premissas de custo e demanda de mão de obra, entre outras.

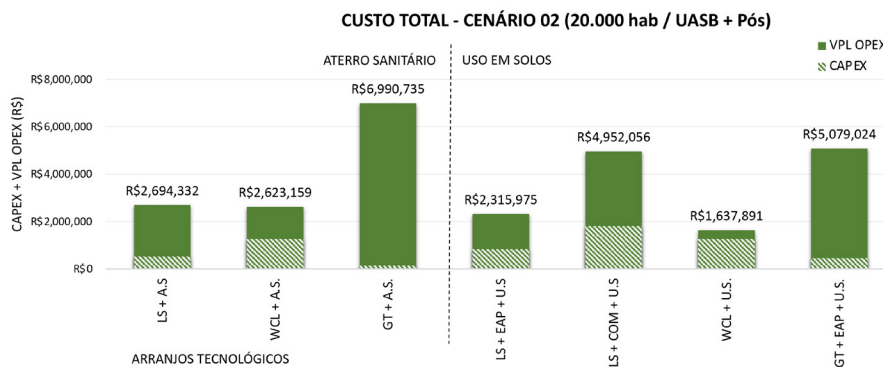
Portanto, atentando-se para essas ressalvas e limitações do estudo, o resultado global obtido

para avaliação comparativa entre alternativas aponta que, para todos os cenários avaliados (portes de ETE variando de 2.000 a 500.000 habitantes), existem um ou mais arranjos de tratamento de lodo para posterior destinação em solos que apresentam custos totais (CAPEX + VPL do OPEX em 20 anos) mais baixos do que aqueles obtidos para os arranjos cuja disposição final se dá em aterro sanitário.

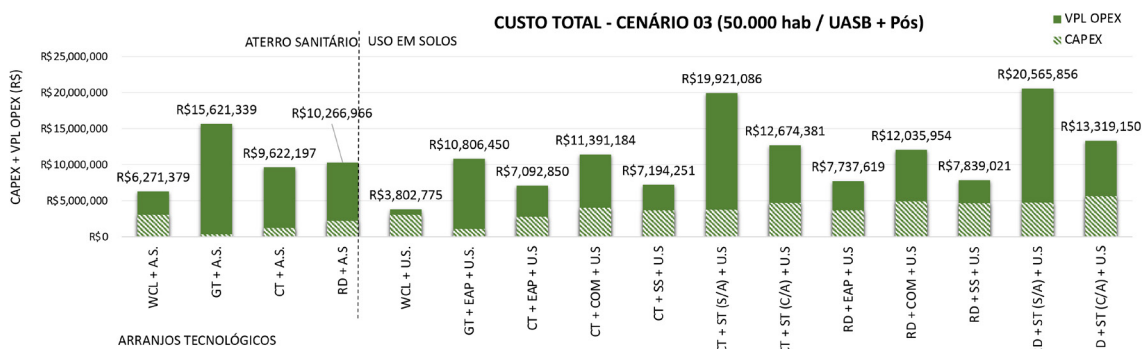
**Figura 1** - Custo total das alternativas de tratamento de lodo para os 05 cenários avaliados: CAPEX + OPEX (VPL - 20 ANOS).



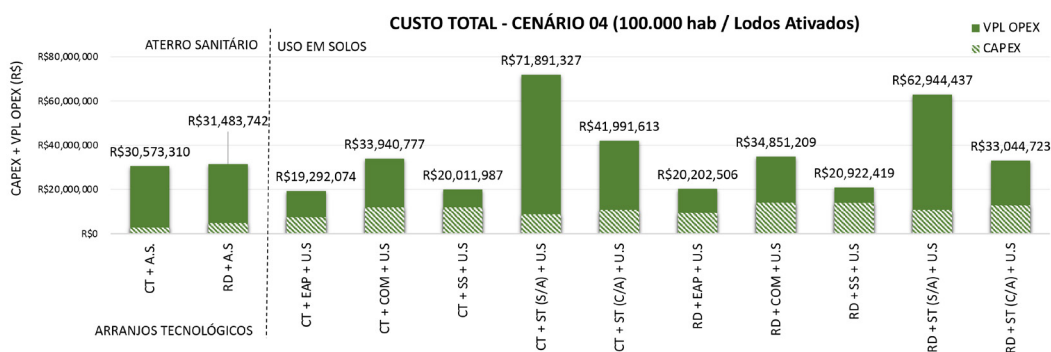
**(a)** Custo total de alternativas de tratamento de lodo - Cenário 01 (2.000 hab. / UASB + pós)



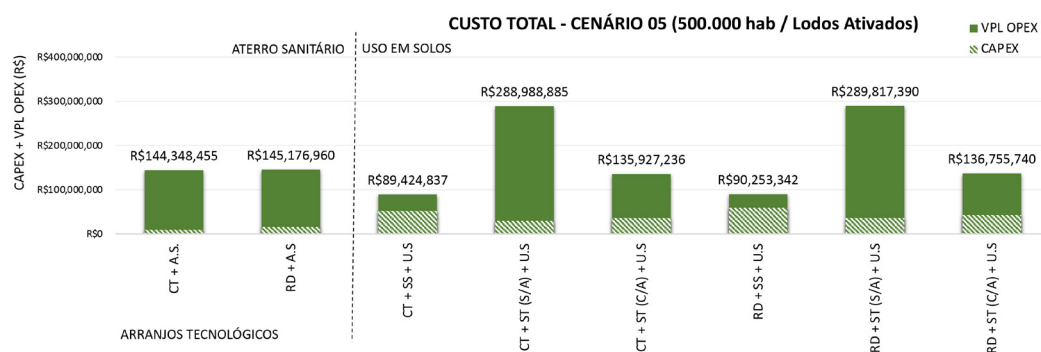
**(b)** Custo total de alternativas de tratamento de lodo - Cenário 02 (20.000 hab. / UASB + pós)



**(c)** Custo total de alternativas de tratamento de lodo - Cenário 03 (50.000 hab. / UASB + pós)



(d) Custo total de alternativas de tratamento de lodo - Cenário 04 (100.000 hab. / Lodos ativados)



(e) Custo total de alternativas de tratamento de lodo – Cenário 05 (500.000 hab. / Lodos ativados)

LS = Leito de secagem; A.S. = Aterro sanitário; WCL = *Wetlands* construídos para lodo; GT = Geotêxtil; CT = Centrífuga; RD = Rosca desaguadora; EAP = Estabilização alcalina prolongada; U.S. = Uso em solos; COM = Compostagem; SS = Secagem solar; ST = Secagem térmica; S/A = Sistema sem aproveitamento de biogás; C/A = Sistema com aproveitamento de biogás;

**FONTE:** a autora (2021).

**NOTA:** i) Nos gráficos apresentados, a parcela hachurada corresponde à contribuição do CAPEX no custo total (CAPEX + VPL OPEX de 20 anos); ii) VPL (Valor Presente Líquido) considerando 20 anos de operação e taxa de juros anual de 6,5%; iii) Para OPEX, estão incluídos apenas custos com processamento (desaguamento e higienização), transporte e manuseio de lodo, assistência agrônômica (caso uso em solos) e disposição em aterro sanitário (caso destinação final em aterro); iv) Custos de implantação associados às unidades de estocagem, quando aplicável, estão incluídos nos índices apresentados.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou e comparou aspectos técnicos e econômicos de dezenove arranjos tecnológicos de processamento e gerenciamento de lodo para uso em solos como opções alternativas à destinação final em aterro sanitário, considerando ETEs de diferentes portes populacionais. Foram incluídos na análise tanto métodos tradicionalmente utilizados, como leitos de secagem e centrífugas, como métodos com potencial de crescimento no Brasil, como sistemas *wetlands* construídos para lodos e sistemas

de secagem solar. As informações acerca de cada alternativa tecnológica foram convertidas em unidades comuns, em função da massa seca de lodo, permitindo comparar, de forma equânime, todos os arranjos de tratamento avaliados.

Para as premissas consideradas, a avaliação econômica comparativa entre alternativas aponta que, para todos os cenários avaliados (portes de ETE variando de 2.000 a 500.000 habitantes), existem um ou mais arranjos de tratamento de lodo para posterior destinação em solos que

apresentam custos totais (CAPEX + VPL do OPEX em 20 anos) mais baixos do que aqueles obtidos para os arranjos cuja disposição final se dá em aterro sanitário.

Ainda, dentre os arranjos de tratamento e gerenciamento de lodo avaliados, a análise econômica comparativa entre alternativas permitiu concluir que:

- Para todas as situações em que se aplica (avaliado neste estudo para ETEs de 2.000, 20.000 e 50.000 habitantes), o uso de *wetlands* construídos para tratamento de lodo (WCL) com posterior uso em solos foi o que apresentou o menor custo total, sendo este de 28% a 60% inferior àqueles obtidos para os arranjos típicos de leitos de secagem ou centrífugas seguidos de aterro sanitário.
- Para ETEs/UGL de médio a grande porte (avaliado no estudo ETEs de 50.000 e 100.000 habitantes), as alternativas de desaguamento mecanizado seguidas de higienização com estabilização alcalina prolongada (EAP) ou secagem solar e posterior uso em solos apresentaram custos totais inferiores àqueles obtidos para arranjos que utilizam apenas o desaguamento seguido de disposição em aterro sanitário. Para maiores gerações (avaliado no estudo ETE de 500.000 habitantes), o uso de secagem térmica com aproveitamento de biogás e uso em solo também apresentou custos inferiores aos obtidos para os sistemas de desaguamento seguido de aterro sanitário.
- De maneira geral, os arranjos de tratamento que utilizam métodos de geotêxtil, compostagem ou secagem térmica sem aproveitamento de biogás foram os que apresentaram os maiores custos totais nos cenários em que foram utilizados.

Cabe ressaltar que, durante a fase de estudos de concepção e/ou de viabilidade, além dos índices unitários levantados (CAPEX, OPEX, requisitos de

área, energia e matérias primas), demais aspectos técnicos, operacionais, sanitários, culturais, locais e ambientais, não abarcados em profundidade no presente estudo, também devem ser considerados na avaliação global comparativa entre os arranjos de tratamento e gerenciamento de lodos de ETE.

Por fim, o presente estudo traz subsídios e apresenta resultados que, dentro das condições e limitações do trabalho, se opõem ao *status quo* de que a disposição de lodo em aterro sanitário é sempre a alternativa financeiramente menos onerosa. Ao contrário, aponta que arranjos de tratamento que permitem o uso do lodo em solos, além de todas as demais vantagens associadas e apesar das barreiras a serem vencidas, podem trazer, em muitos casos, economias significativas. Este é, portanto, mais um fator motivador para o fomento a essa prática no Brasil e, em maior escala, para a mudança de paradigma no saneamento, incorporando ao tratamento de esgotos e à gestão de lodos a lógica de economia circular e regenerativa.

## 6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

**Investigação, Metodologia, Redação - Primeira versão:** Boratto, D. C.; **Conceitualização, Redação - Revisão & Edição, Supervisão:** Von Sperling, M.

## 7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCUMBUSTÍVEIS – ANP. **Síntese dos Preços Praticados - Brasil** – Resumo II - Período: 2021–Maio. <[https://preco.anp.gov.br/include/Resumo\\_Mensal\\_Combustiveis.asp](https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Mensal_Combustiveis.asp)>. Acesso 22 jun. 2021.

ALLONDA. **Custo | Geotubes**. Mensagem recebida por <deboraboratto@hotmail.com> em 14 mai. 2021.

AMARAL, K. G. C. **Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV**. Tese (Doutorado em

Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná. 2018.

ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F.(Ed). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p.317-395 (Cap. 8).

BANCO CENTRAL DO BRASIL - BCB. **Focus: Relatório de Mercado - 16 de julho de 2021**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>>. Publicado em 19/07/2021. Acesso em 22/07/2021.

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

BITTENCOURT, S. **Gestão de processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná. 2014.

BIOCOMP Soluções Ambientais LTDA. **Contato pessoal**. Responsável técnico e supervisor geral. Usina de compostagem. Papagaios, julho, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama n.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**, Brasília, DF, 19 ago. 2020.

CERQUEIRA, P. L. W. **Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio: subsídios para estudos de concepção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná. 2019.

COMPARINI, J.B. Engenharia de aplicação dos biossólidos. In: TSUTIYA M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (Ed.). **Biossólidos na Agricultura**. 2ª Ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. p.405-431 (Cap. 13).

COPASA. **Contato pessoal**. Engenheiro de Produção e Operação. Unidade de Serviço de Tratamento de Esgoto da Bacia do Rio Paraopeba. Belo Horizonte, agosto, 2021.

DIOGO, V. H. F. **Estudo de viabilidade de tratamento regionalizado de lodos de fossa e tanque sépticos**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.

FERNANDES, F.; LOPES, D. D.; ANDREOLI, C. V.; SILVA, S. M. C. P. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p.297-315 (Cap. 7).

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M. VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p.157-258 (Cap. 5).

HUBER. **HUBER do Brasil Pedido de informação detalhada de produto**. Mensagens recebidas por: <debora-boratto@hotmail.com> em mai./jul., 2021.

ÍNDICE DE PREÇOS AO CONSUMIDOR AMPLO – IPCA. **Calculadora do IPCA**. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em 22 jun. 2021.

KURT, M.; AKSOY, A.; SANIN, F.D. Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements. **Water Research**. v.82. Elsevier, 2015. p.47-57.

LINDNER. **Requisitos e custos - Equipamentos desaguamento lodo de ETE**. Mensagem recebida por: <debora-boratto@hotmail.com> em 12 e 14 de mai. 2021.

MANZOCHI, C. I. S. **Logística para tratamento e disposição final de lodos de ETE's visando reciclagem agrícola**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.

NIELSEN, S.; LARSEN, J.D. Operational strategy, economic and environmental performance of sludge treatment reed bed systems – based on 28 years of experience. **Water Science & Technology**. v.74, n.8. IWA Publishing, 2016. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.295>.

PINTO, M.T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p.259-295 (Cap. 6).

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO – PROSAB. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. FERNANDES, F.; SILVA, S.M.C.P (autores). Universidade Estadual de Londrina. 1999.

SANEAGO – Companhia de Saneamento de Goiás. **TCC - Alternativas para tratamento e gerenciamento de lodo**. Mensagem recebida por <debora-boratto@hotmail.com> em 19 mar. 2021.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. **[Lodo SANEPAR]**. WhatsApp: [Grupo Estudo lodo UFMG SANEPAR]. Março - maio. 2021. Mensagens de WhatsApp.

VALENTE, V.B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

VISENTIN, R. **Viabilidade econômica da compostagem de lodo de esgoto para fins agrícola**. Dissertação (Mestrado em Ciências



Agronômicas), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2019.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p.15-65 (Cap. 2).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª edição. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018. (Volume 1)

WETLANDS CONSTRUÍDOS LTDA. **Contato pessoal**. Belo Horizonte, junho de 2021.