

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## VALORIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO DIGERIDO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DESCENTRALIZADA POR MEIO DA COMPOSTAGEM.

Bárbara Costa Lima<sup>1</sup>  
Daniele Vital Vich<sup>1</sup>  
Viviana Maria Zanta<sup>1</sup>  
\*Luciano Matos Queiroz<sup>1,2</sup>

## VALORIZATION OF ANAEROBIC DIGESTED SEWAGE SLUDGE FROM DECENTRALIZED WASTEWATER TREATMENT PLANTS BY COMPOSTING

Recibido el 15 de agosto de 2017; Aceptado el 16 de octubre de 2018

### Abstract

*This work evaluated the composting process as an alternative for the valorization of anaerobic digested sludge from a decentralized wastewater treatment plant (WWTP). The process stability and performance were investigated by monitoring physico-chemical and microbiological parameters during two distinct and sequential phases. In the first phase, the composting process was evaluated by assembling piles with anaerobic sludge and sawdust as structuring agent. In the second one, food waste was added to compost piles. In addition, a net present value (NPV) calculation was made seeking to investigate the economic viability of the initiative. The results of the first phase showed that the piles did not reach temperatures in the thermophilic range indicating that the microbiological activity was not established. On the other hand, in the second phase, after addition of the food waste as an amendment agent, temperatures above 55°C were registered and maintained for five consecutive days at the top of the piles. The result of the NPV showed that it is necessary to adopt adequate criteria for sampling frequency and number of parameters analyzed, in order to enable the implementation of composting as an alternative to anaerobic sludge valorization in small WWTP.*

**Keywords:** anaerobic sludge, composting, food waste, valorization.

<sup>1</sup> Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

<sup>2</sup> Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Brasil.

\*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Rua Aristidis Novis, 2 – Federação, Salvador, Bahia. 40210-630. Brasil. Email: [lmqueiroz@ufba.br](mailto:lmqueiroz@ufba.br)

## Resumo

Este trabalho avaliou o processo de compostagem como alternativa para valorização de lodo de esgoto oriundo de reator UASB implantado em uma estação de tratamento de esgotos (ETE) descentralizada. A estabilidade e desempenho do processo foram investigados por meio do monitoramento de parâmetros físico-químicos e microbiológicos em duas fases distintas e sequenciais. Na primeira fase, avaliou-se a compostagem por meio da montagem de pilhas compostas apenas pelo lodo anaeróbico e a serragem como material estruturante. Na segunda fase, adicionaram-se resíduos de alimentos às pilhas de compostagem. Além disso, realizou-se uma análise de viabilidade econômica e financeira da alternativa por meio da técnica de Valor Presente Líquido (VPL). Os resultados da primeira fase mostraram que as pilhas não alcançaram temperaturas na faixa termofílica e que a atividade microbiológica não se desenvolveu de maneira satisfatória. Já na segunda fase, após a adição dos resíduos de alimentos como aditivo do processo, alcançaram-se temperaturas superiores a 55°C mantidas por cinco dias consecutivos no topo das pilhas. O resultado do VPL mostrou que se faz necessário buscar uma flexibilização das exigências de monitoramento, sobretudo dos critérios de frequência de amostragem e número de parâmetros analisados, de modo a tornar esse processo viável para valorização do lodo de ETE de pequeno porte.

**Palavras chave:** compostagem, lodo anaeróbico, resíduo de alimentos, valorização.

## Introdução

Dados levantados a partir do censo demográfico do ano de 2010 e publicados no mês de novembro do ano de 2013, mostram que no Brasil, até então, havia um déficit de 6940 milhões de unidades, sendo 85% na área urbana (Fundação João Pinheiro, 2013). No ano de 2009, o Programa Minha Casa Minha Vida foi concebido e implantado como Política Pública para enfrentamento dessa situação. Na primeira fase, compreendida entre março do ano de 2009 e metade do ano de 2011, a meta estabelecia a construção de um milhão de novas moradias. Já na segunda fase, concluída no final do ano de 2014, dobrou-se a meta da primeira fase, e previa-se a construção de mais dois milhões de unidades habitacionais. Essas novas moradias foram construídas no formato de grandes empreendimentos habitacionais (conjuntos de casas ou prédios de apartamentos padronizados).

Entretanto, quando se construíam esses empreendimentos em regiões com infraestrutura precária, previu-se soluções que compreendiam coleta, tratamento e disposição de esgotos sanitários na própria área dos empreendimentos (Brasil, 2013). Essa premissa aumentou exponencialmente a implantação de estações de tratamento de esgotos (ETE) descentralizadas no território brasileiro. No entendimento dos sistemas de tratamento de efluentes, os termos *onsite* e “descentralizados” são muitas vezes confundidos ou não diferenciados. Ambos são entendidos, coerentemente, como uma oposição aos sistemas centralizados, os quais utilizam grandes sistemas de coleta para tratamento de grandes volumes de efluentes em um único ponto, geralmente distantes das unidades geradoras. O sistema de tratamento de esgoto *onsite*, conhecido pela sigla OWTS (*Onsite Wastewater Treatment System*), na verdade, agrupa-se como um tipo de sistema descentralizado. O primeiro se restringe ao tratamento e disposição final do efluente na propriedade onde é produzido (Patern, 2009).

Porém, o desenvolvimento de potencialidades locais, observado como uma das oportunidades previstas nas ETE descentralizadas pode refletir, em contrapartida, um desafio na gestão dos mesmos, sobretudo no que concerne ao tratamento dos subprodutos dos processos de tratamento de efluentes como os gases e o lodo de esgoto.

Especificamente no caso do lodo de esgoto, a pesar de algumas limitações, existem algumas soluções para sua valorização, mas que dependem, sobretudo, dos custos envolvidos na instalação, da origem desse resíduo, do valor agregado, da qualidade do produto final gerado e dos potenciais impactos ambientais decorrentes da sua utilização. No Brasil, o destino mais utilizado ainda é o aterro sanitário, solução que não permite a valorização e o aproveitamento dos nutrientes contidos no lodo de esgoto que podem ser reciclados e aproveitados como fertilizante agrícola, por exemplo.

O uso da compostagem para a valorização do lodo de esgoto anaeróbio digerido vem se mostrando como uma forma ambientalmente mais adequada de manejo desse resíduo visto que permite a higienização e a produção de um composto orgânico que pode ser utilizado como fertilizante agrícola. Corroborando com essa afirmação, Kulikowska e Klimiuk (2011) enfatizam que a reciclagem está se tornando uma das formas mais atrativas para a destinação final do lodo de esgoto, pois é um método de tratamento simples e de baixo custo além de ser capaz de decompor matéria orgânica gerando um produto final com a possibilidade de ser utilizado na agricultura.

Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o processo de compostagem para a valorização do lodo de esgoto digerido em um reator UASB. Além disso, investigou-se a qualidade físico-química e microbiológica do produto final, bem como, os aspectos financeiros para a adoção do processo em estações de tratamento de esgotos descentralizadas e de pequeno porte.

### **Material e métodos**

O experimento foi dividido em duas fases. A primeira fase consistiu na montagem de duas leiras (LA e LB), com volume total igual a 0.5 m<sup>3</sup> cada, constituídas de uma mistura de serragem como agente estruturante e lodo de esgoto oriundo de um reator UASB que trata uma vazão média de esgotos domésticos igual a 23.7 L/s. Antes da montagem das leiras, o lodo foi submetido a processo de desidratação em um leito de secagem operado pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento – EMBASA. A serragem foi coletada em uma madeireira e era composta de uma mistura de madeiras não tratadas. As leiras foram montadas obedecendo a relação volumétrica de 1:1 (serragem e lodo com teor de sólidos igual a 30%) e a mistura foi manual realizada com o auxílio de ferramentas (pás e enxadas). Durante essa fase, a temperatura foi medida diariamente e as pilhas foram submetidas a revolvimento duas vezes por semana.

Na segunda fase, as leiras A e B foram misturadas e adicionaram-se resíduos de alimentos como aditivo do processo e fonte de substrato rapidamente biodegradável originando a leira C (LC). O resíduo de alimentos (legumes, verduras, hortaliças e frutas impróprias para o consumo) foi oriundo da Central de Abastecimento da Cidade de Salvador (CEASA) e coletado manualmente no chão dos galpões do estabelecimento.

Todas as leiras foram montadas na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia no galpão anexo do Laboratório Experimental de Saneamento 4 (LABEXSAN 4) do Departamento de Engenharia Ambiental localizado à latitude de 12°59'S, longitude 38°30'O e altitude de 58 metros. A Figura 1 mostra as etapas da pesquisa.

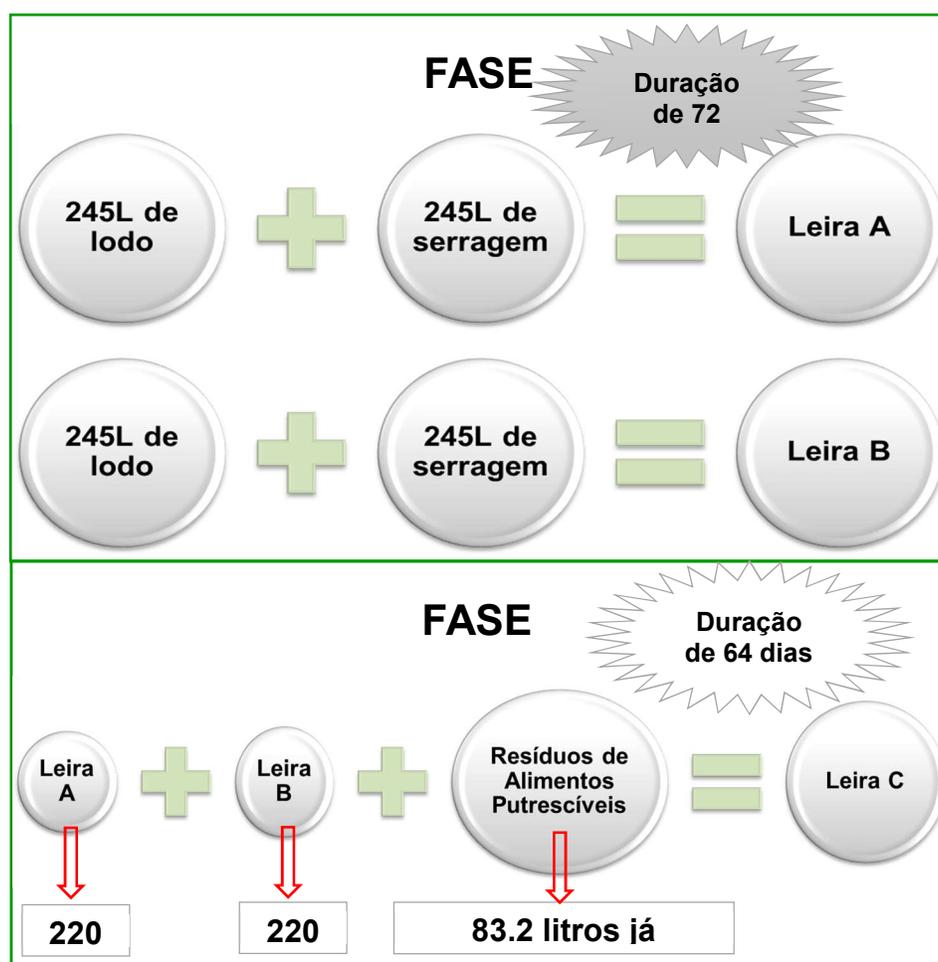


Figura 1. Desenho esquemático elucidativo das fases da pesquisa

O processo foi monitorado por meio do acompanhamento do perfil temporal dos seguintes parâmetros: temperatura, pH, umidade, sólidos voláteis, nitrogênio total Kjeldahl (NKT) e carbono orgânico total (COT). Os parâmetros microbiológicos analisados durante as duas fases foram: Coliformes totais, *Escherichia coli* e ovos viáveis de helmintos. A Tabela 1 mostra as características dos resíduos e da massa submetida ao processo de compostagem.

Ao fim da segunda fase, o composto final passou por peneira com malha de 0.5 cm e foram medidos o volume e o peso final do material retido e peneirado da pilha. Além disso, amostras em triplicata do composto peneirado foram analisadas pelo laboratório especializado *Eco System Preservação do Meio Ambiente Ltda.* localizado na cidade de São Paulo, Brasil. Os parâmetros físico-químicos analisados foram: carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, arsênio, boro, cádmio, cálcio, cálcio total, capacidade de retenção de água, chumbo, cloro, cobalto, cobre, cromo, densidade, enxofre, enxofre total, ferro, fosfato total, magnésio, magnésio total, manganês, matéria orgânica total, matéria orgânica compostável, matéria orgânica residual, mercúrio, molibdênio, níquel, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio nitrato/nitrato, nitrogênio total, óxido de potássio, pH, potássio total, resíduos minerais, resíduos minerais solúveis, silício, sódio total, umidade e zinco. Quanto aos parâmetros microbiológicos, coliformes termotolerantes e ovos de helmintos foram analisados.

Realizou-se um estudo de viabilidade econômico-financeira da implantação da compostagem como alternativa para valorização do lodo anaeróbio gerado em uma ETE descentralizada e de pequeno porte instalada em um empreendimento habitacional (1100 habitantes) localizada na cidade Lauro de Freitas, estado da Bahia, Brasil. Para estimar a produção de lodo de descarte foi utilizada a rotina de cálculo sugerida por Piveli (2004) o que resultou em uma a produção de lodo digerido e desidratado (teor de sólidos igual a 30%) aproximadamente igual a 1.0 m<sup>3</sup> por mês. Para o cálculo da área necessária para implantação da unidade de compostagem, considerou-se que o processo dura 16 (dezesesseis) semanas, e que se adiciona como material estruturante a serragem em proporção volumétrica de 1:1 para atingir umidade próxima ao teor ótimo igual a 60%. A Tabela 2 mostra os valores aplicados nos cálculos da viabilidade econômico-financeira.

**Tabela 1.** Características físico-químicas das matérias-primas utilizadas no processo de compostagem

Parâmetros	Primeira Fase		Segunda Fase	
	Lodo de esgoto	Serragem	Lodo de esgoto + serragem	Resíduos de alimentos
pH	8.7 ± 0.1	5.4 ± 0.2	6.1 ± 0.2	4.9 ± 0.2
Carbono Orgânico Total (%)	17.8 ± 1.4	20.2 ± 0.8	19.7 ± 0.6	25.0 ± 1.8
Nitrogênio Total Kjeldahl (%)	4.1 ± 0.1	0.4 ± 0.1	3.4 ± 0.1	2.0 ± 0.1
Relação C:N	4.3	54.7	5.8	12.7
Teor de umidade (%)	84.1 ± 0.1	13.5 ± 0.5	41.5 ± 0.9	90.4 ± 0.5
Sólidos voláteis (%)	64.6 ± 2.9	99.3 ± 0.1	74.7 ± 0.6	89.8 ± 0.4

Realizou-se um estudo de viabilidade econômico-financeira da implantação da compostagem como alternativa para valorização do lodo anaeróbico gerado em uma ETE descentralizada e de pequeno porte instalada em um empreendimento habitacional (1100 habitantes) localizada na cidade Lauro de Freitas, estado da Bahia, Brasil. Para estimar a produção de lodo de descarte foi utilizada a rotina de cálculo sugerida por Piveli (2004) o que resultou em uma produção de lodo digerido e desidratado (teor de sólidos igual a 30%) aproximadamente igual a 1.0 m<sup>3</sup> por mês. Para o cálculo da área necessária para implantação da unidade de compostagem, considerou-se que o processo dura 16 (dezesesseis) semanas, e que se adiciona como material estruturante a serragem em proporção volumétrica de 1:1 para atingir umidade próxima ao teor ótimo igual a 60%. A Tabela 2 mostra os valores aplicados nos cálculos da viabilidade econômico-financeira.

**Tabela 2.** Cálculo da demanda de área do galpão para realização da compostagem

Item	Valor	Unidade
Quantidade de pilhas	4	unid.
Volume da pilha	1.3	m <sup>3</sup>
Altura das pilha	1	m
Raio das pilha	1.1	m
Área da base da pilha	3.9	m <sup>2</sup>
Área de folga para revolvimento da pilha	3.9	m <sup>2</sup>
Área total para 4 pilhas	31.2	m <sup>2</sup>

Atualmente, o lodo digerido e com teor de sólidos próximo a 30% que é gerado nessa ETE é classificado como resíduo Classe II-A pela norma técnica brasileira NBR 10.004/2004 (Brasil, 2004). O único aterro que aceita esse tipo de resíduo é o aterro CITA-Bahia operado pela *Hera Ambiental Ltda.* e que está localizado no município de São Francisco de Conde, estado da Bahia. A distância entre a ETE estudada e o aterro CITA-Bahia é de, aproximadamente, 50 km. Avaliou-se a alternativa de valorização do lodo por meio da compostagem na própria ETE em detrimento da prática atual de transporte por meio de caminhão e disposição no aterro sanitário CITA-Bahia. Utilizou-se como ferramenta de avaliação de investimento a técnica de Valor Presente Líquido (VPL).

Incluíram-se os custos de instalação e operação do processo ao longo da vida útil da ETE descentralizada (20 anos) e as receitas. A taxa de juros utilizada foi a definida pelo Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) do Banco Central do Brasil. O projeto é considerado economicamente viável se apresentar VPL positivo. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade do cálculo do VPL conforme metodologia proposta por Rego (2016) a fim de verificar as mudanças do VPL com o crescimento das receitas e despesas. Toda essa análise foi realizada em uma planilha elaborada no ambiente Microsoft Office Excel 2007<sup>®</sup>. A Equação 1 mostra o cálculo utilizado para verificar o VPL do projeto.

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j} \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual,

$R_j$  = valor atual das receitas;

$C_j$  = valor atual dos custos;

$i$  = taxa de juros;

$j$  = períodos que as receitas ou os custos ocorrem; e

$n$  = duração do projeto.

Para o cálculo do investimento, considerou-se a construção de um galpão com 35 m<sup>2</sup> de área, a aquisição de um triturador para resíduos orgânicos, peneiras e dois termômetros analógicos. Quanto aos custos com a mão de obra, utilizou-se a taxa igual a R\$ 9.24 servente/hora, disponível no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), que estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos do governo brasileiro (IBGE, 2016). A partir dos resultados experimentais, estimou-se uma demanda de 16 horas semanais de um servente dedicado a revolver e monitorar as pilhas de compostagem. Para os custos de análises laboratoriais foram utilizadas cotações realizadas por Bittencourt (2014). O Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) foi aplicado para corrigir e atualizar todos os valores dos custos.

No Brasil, a Resolução 375/2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) define os critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. Essa legislação estabelece classes distintas e possíveis aplicações agrícolas do composto obtido, além de apontar critérios de monitoramento da qualidade do composto gerado. Basicamente, o critério que define a classificação do produto final são os parâmetros de segurança microbiológica. Para o produto ser considerado classe A, por meio da Resolução CONAMA 375/2006 se exige a análise de: coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e vírus. Para o produto ser considerado classe B, apenas, as análises de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos são exigidas.

Portanto, para avaliar o VPL foram propostos quatro cenários, observando que os valores para investimento e receitas são iguais para qualquer um dos cenários adotados, o que variam são os custos e, mais especificamente, o custo com realização de análises laboratoriais necessárias para o monitoramento da qualidade do composto definidas pela Resolução CONAMA 375/2006. A Tabela 3 mostra os cenários propostos para análise do VPL.

A Tabela 4 mostra os valores das médias dos custos das análises laboratoriais para cada cenário e, além disso, foram calculados os valores considerando a frequência de coleta de uma amostra por ano, e, também, quatro amostras por ano que é o critério preconizado no Anexo IV da Resolução CONAMA 375/2006.

**Tabela 3.** Cenários considerados para realização do VPL

Cenário	Descrição
1	Realização de todas as análises laboratoriais previstas na Resolução CONAMA 375/2006: substâncias orgânicas, substâncias inorgânicas, potencial agrônômico e sanidade
2	Suprimindo as análises para detecção de substâncias orgânicas
3	Suprimindo as análises para detecção de substâncias orgânicas e inorgânicas
4	Realizando análises laboratoriais apenas para verificação da qualidade e segurança microbiológica do composto final.

**Tabela 4.** Custos médios de análises laboratoriais por cenário

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1*	R\$ 4 528.78	R\$ 18 115.14	R\$ 4 004,55	R\$ 16 018.20
2*	R\$ 1 857.15	R\$ 7 428.61	R\$ 1 332.92	R\$ 5 331.67
3*	R\$ 1 464.94	R\$ 5 859.76	R\$ 940.71	R\$ 3 762.82
4*	R\$ 817.56	R\$ 7 687.68	R\$ 293.32	R\$ 1 173.29

*Valores expressos em Reais*

O valor monetário cobrado para destinação do lodo ao aterro sanitário foi considerado como receita, já que esse valor será economizado com a implantação da valorização do lodo. Além disso, considerando que o aterro sanitário fica localizado a 50 km da ETE, na cidade de São Francisco do Conde, considerou-se o custo para o transporte da produção mensal do lodo. Dentre os fatores que promovem receita, não foi considerada a comercialização do composto final visto que ainda não é uma prática comum no Brasil, o que torna difícil a atribuição de um valor monetário. A Tabela 5 mostra o resumo dos dados utilizados para análise do VPL.

**Tabela 5.** Resumo dos dados utilizados na análise do VPL.

Variável	Valor
Investimento Inicial	R\$ 13 878.33
Receita	R\$ 10 716.00
Custos	Variável e depende do cenário
Taxa de juros	14.15%
Duração do projeto	20 anos

## Resultados e discussão

O aumento da temperatura durante a compostagem é um indicativo da ocorrência de intensa atividade microbiológica, contudo, durante os 77 dias de duração da primeira fase, não se registrou variação significativa desse parâmetro com relação à temperatura ambiente, ou seja, o processo não atingiu a fase termofílica. O pico de temperatura registrado foi igual a,

aproximadamente, 36°C e esse valor não é considerado adequado para garantir a desinfecção do composto final e não atende às recomendações explícitas na Resolução 375/2006 (Brasil, 2006). Constatou-se, ainda, que o processo não apresentou variação das concentrações de sólidos voláteis, nem de carbono orgânico total (Tabela 6), evidenciando a ausência de atividade microbiológica intensa.

**Tabela 6.** Resultados dos parâmetros físico-químicos monitorados durante a primeira fase do experimento

	pH	COT (%)	NTK (%)	C:N	Umidade (%)	Sólidos voláteis (%)	
LA	A <sub>1</sub>	8.2 ± 0.1	26.4 ± 5.5	3.1 ± 0.1	8.7	75.7 ± 0.4	74.2 ± 1.4
	A <sub>2</sub>	7.6 ± 0.1	-	3.4 ± 0.1	-	74.0 ± 0.3	75.9 ± 0.9
	A <sub>3</sub>	6.7 ± 0.1	29.4 ± 1.1	3.6 ± 0.2	8.1	71.7 ± 0.3	75.2 ± 0.5
	A <sub>4</sub>	6.0 ± 0.1	-	3.6 ± 0.1	-	67.6 ± 0.9	74.7 ± 0.3
	A <sub>5</sub>	5.5 ± 0.3	33.8 ± 1.2	3.6 ± 0.1	9.6	64.1 ± 0.5	74.5 ± 0.4
LB	A <sub>1</sub>	7.9 ± 0.1	33.3 ± 0.5	2.6 ± 0.2	12.6	73.2 ± 0.4	79.4 ± 0.6
	A <sub>2</sub>	7.5 ± 0.1	-	3.0 ± 0.1	-	71.1 ± 0.4	78.7 ± 0.2
	A <sub>3</sub>	6.4 ± 0.2	33.3 ± 1.2	3.4 ± 0.1	9.8	68.3 ± 0.1	77.9 ± 0.4
	A <sub>4</sub>	5.8 ± 0.1	-	3.5 ± 0.1	-	64.9 ± 0.4	77.7 ± 0.2
	A <sub>5</sub>	5.4 ± 0.3	33.7 ± 0.9	3.6 ± 0.2	9.4	60.8 ± 0.3	77.4 ± 0.2

Legenda: A<sub>n</sub> = Aliquota; n = semana de coleta da aliquota

Diaz e Savage (2007) salientam que um excesso de umidade no início da compostagem pode favorecer processos anaeróbios, resultando em um processo mais lento e um produto final de baixa qualidade. Observando os dados da Tabela 5, constata-se que a umidade inicial, próxima de 75% em ambas as leiras, estava acima do considerado teor ótimo recomendado na literatura, ou seja, entre 50% e 60%. Portanto, optou-se por esperar as leiras atingirem o teor ótimo, com o auxílio de revolvimentos periódicos que, segundo Nikaeen *et al.*, (2015), permitem uma rápida diminuição do teor de água nas leiras por conta da troca de calor com o ambiente e, também, devido às condições climáticas locais.

A questão do alto teor de umidade foi a primeira hipótese para que a temperatura não se elevasse e a massa de compostagem chegasse à fase termófila, porém, mesmo após atingir o teor ótimo de umidade, as duas leiras mantiveram temperaturas próximas à temperatura ambiente descartando a hipótese da influência do teor de água para o alcance das temperaturas adequadas.

Certamente, a ausência de substrato orgânico rapidamente assimilável no lodo de esgoto digerido no reator UASB limitou o desenvolvimento da atividade microbiológica. Além disso, a serragem, utilizada como material estruturante, é uma material lignocelulósico e sua taxa de degradação microbiológica é muito lenta. Portanto, o uso de um substrato rapidamente biodegradável pareceu ser essencial para o desenvolvimento sustentado e equilibrado da

compostagem de lodo de esgoto digerido em reatores UASB. Considerando a disponibilidade e custos envolvidos, optou-se por utilizar resíduos de alimentos. Então, ao final da primeira fase, optou-se por reunir as duas leiras (LA e LB) e formar uma única leira (LC) com volume igual a 0.5 m<sup>3</sup> cujo teor de umidade inicialmente registrado foi igual a 41.5%. Por conseguinte, a adição de resíduos de alimentos putrescíveis, além de fornecer substrato rapidamente biodegradável, proporcionou a umidade necessária para que a pilha atingisse o teor ótimo de 60%.

Durante a segunda fase, como pode ser observado na Figura 2, o processo atingiu a fase termófila com pico de temperatura de 58°C no topo da leira, porém, a temperatura da base da leira cônica não ultrapassou os 53°C. Esperava-se que a temperatura da leira não fosse homogênea, pois no topo há maior fornecimento de oxigênio e constitui, naturalmente, um ponto de conversão térmica. O importante é, por meio do revolvimento regular, garantir que diversas partes da massa compostada tenham acesso ao topo possibilitando, assim, exposição às temperaturas mais elevadas. Desse modo, durante a fase termófila, o revolvimento da leira foi praticamente diário a fim de permitir o contato de toda massa compostada com temperaturas altas, além de fornecer oxigênio ao processo.

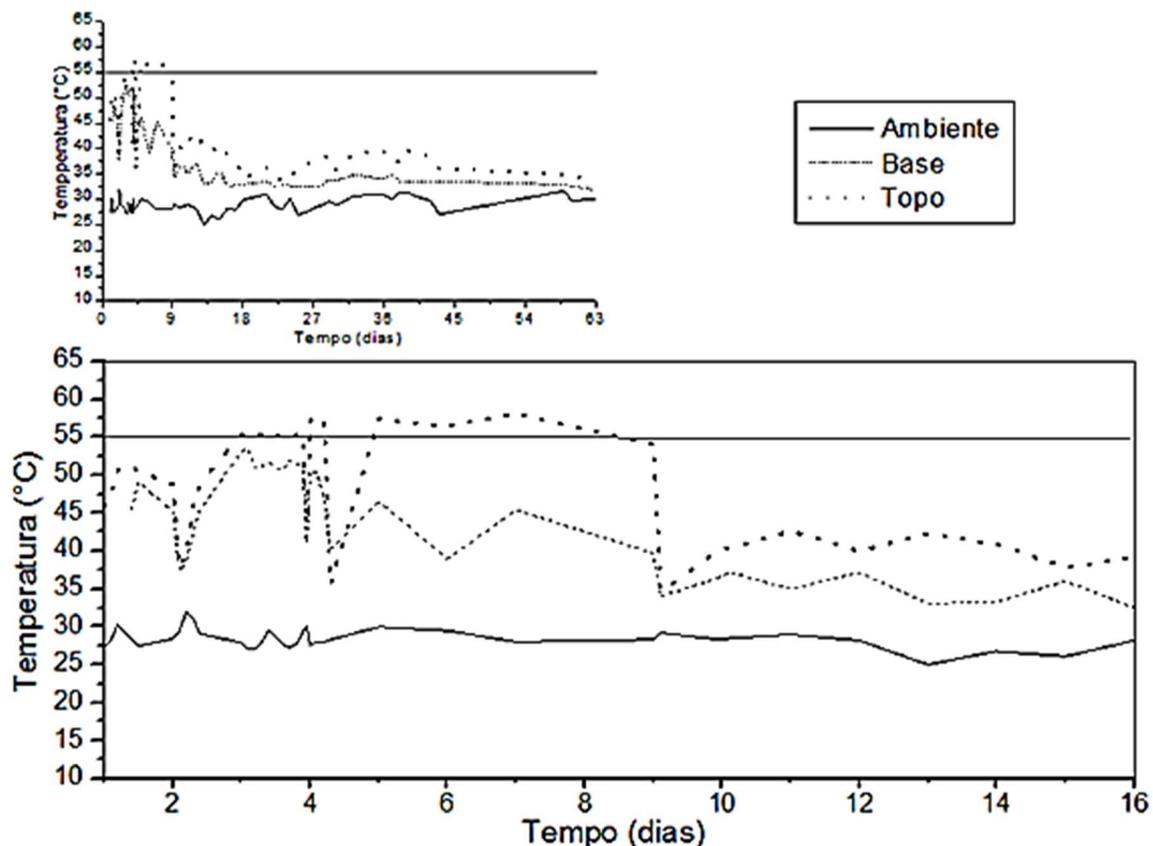


Figura 2. Perfil temporal de temperatura ao longo do experimento

Segundo o Art. 3º da Resolução CONAMA 375/2006, para o uso agrícola, o lodo deve passar por processo de redução significativa de patógenos e de atratividade de vetores, que são critérios relativos a temperatura atingida e o tempo de exposição no processo de compostagem. A Tabela 7 mostra os critérios que devem ser respeitados na compostagem para cada processo.

**Tabela 7.** Critérios de tempo-temperatura da Resolução CONAMA 375/2006 para o processo de compostagem de lodo

Redução significativa de patógenos (Classe B)	Redução adicional de patógenos (Classe A)	Redução da atratividade de vetores
A massa tem que atingir uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período.	Compostagem confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55°C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias ao longo dos 15 do processo).	A temperatura da biomassa deve ser mantida acima de 40°C por pelo menos 14 dias. A temperatura média durante este período deve ser maior que 45°C.

Fonte: (Brasil, 2006)

Sendo assim, considerando os critérios da legislação para o processo de redução significativa de patógenos, durante cinco dias, a temperatura do topo da leira esteve acima dos 55°C e por quatorze dias, acima 40°C. Correto, então, afirmar que o experimento realizado obteve sucesso para redução significativa de patógenos. Vale destacar que a leira manteve a temperatura mesmo após os revolvimentos que, nos primeiros momentos, esfriam a massa compostada, mas, que também garantiram o fornecimento de oxigênio para o processo. Adicionalmente, observa-se que o processo também atendeu aos critérios quanto à redução de atratividade de vetores, visto que se manteve por 14 dias com temperatura acima de 40°C e valor da média igual a 49.4°C.

Pode-se inferir que a adição dos resíduos de alimentos como fonte de substrato rapidamente biodegradável, auxiliou para que o processo atingisse a temperatura termófila com o fornecimento de nutrientes necessário para que os micro-organismos se desenvolvessem.

Ao fim do processo, toda massa compostada na leira LC foi peneirada e tanto o material retido, quanto o peneirado foram verificados quanto ao peso e volume. Considerando como composto apenas o material peneirado e que o processo se iniciou com 430 kg de lodo com volume de 490 litros, houve redução de, aproximadamente, 78% do peso e 60% do volume. O material que ficou retido na peneira, basicamente formado por serragem, poderia ser utilizado novamente como agente estruturante em um novo processo de compostagem com a vantagem adicional de atuar também como inóculo do processo de compostagem. A Figura 3 mostra um resumo da qualidade do composto final e a adequação das suas características aos padrões preconizados na legislação vigente no Brasil.

### CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO FINAL - CONAMA 375/2006

Parâmetro	Limite Resolução CONAMA 375/2006	Composto final
<b>Indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos</b>		
Ovos viáveis de helmintos (ovos/g de ST)	< 0,25 (Classe A) < 10 (Classe B)	< 0,25 
Coliformes termotolerantes (NMP/g de ST)	< 10 <sup>2</sup> (Classe A) < 10 <sup>5</sup> (Classe B)	< 1,1 
<b>Substâncias inorgânicas</b>		
Arsênio (mg/kg, base seca)	41	<0,006
Bário (mg/kg, base seca)	1.300	-
Cádmio (mg/kg, base seca)	39	2,4 ± 0,2
Chumbo (mg/kg, base seca)	300	<0,005
Cobre (mg/kg, base seca)	1.500	296 ± 24 
Cromo (mg/kg, base seca)	1.000	18,8 ± 1,2
Mercurio (mg/kg, base seca)	17	<0,0002
Molibdênio (mg/kg, base seca)	50	23,7 ± 4,0
Níquel (mg/kg, base seca)	420	21,8 ± 3,2
Selênio (mg/kg, base seca)	100	-
Zinco (mg/kg, base seca)	2800	809 ± 28

### CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO FINAL – outros parâmetros

Parâmetro	Composto final
Cálcio total (% base seca)	1,42 ± 0,15
Enxofre total (% base seca)	1,11 ± 0,08
Fósforo total (mg/kg, base seca)	4,733 ± 614
Magnésio total (% base seca)	0,16 ± 0,01
Nitrogênio amoniacal (mg N-NH <sub>3</sub> /g, base seca)	25,67 ± 1,15
Potássio total (mg/kg, base seca)	3,538 ± 446
Sódio total (mg/kg, base seca)	1707 ± 50
Sólidos voláteis (%)	63,63 ± 0,61
Capacidade de Retenção de Água (%)	127,32 ± 12,53
Cobalto (mg/kg, base seca)	3,25 ± 0,443
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,49 ± 0,01
Ferro (mg/kg, base seca)	17.970 ± 3.190
Potássio (K <sub>2</sub> O) total (% base seca)	1,2 ± 0,1
Resíduo Mineral (% base seca)	11,24 ± 0,79
Resíduo Mineral Insolúvel (% base seca)	18,04 ± 0,39
Resíduo Mineral Total (% base seca)	29,28 ± 0,57

Figura 3. Composição físico-química e microbiológica do composto final obtido na Leira C

A análise da viabilidade econômica do processo de compostagem como alternativa para valorização do lodo anaeróbico gerado em uma ETE projetada para atendimento da população de um empreendimento habitacional revelou que a obediência estrita às exigências preconizadas na Resolução 375/2006 do CONAMA torna o processo inviável, mesmo que se deseje gerar um composto classificado como produto classe B (Tabela 8).

Tabela 8. Resultados dos cálculos do VPL para os cenários propostos

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1	-22 103.59	-112 158.78	-18 628.78	-98 259.51
2	-4 395.06	-41 324.66	-920.25	-27 425.40
3	-1 795.34	-30 925.78	1 679.37	-17 026.52
4	2 495.74	-13 761.43	5 970.56	137.83

Analisando os valores encontrados, observa-se, no cenário 1, a inviabilidade financeira de adotar o uso do produto derivado da compostagem do lodo na agricultura com os critérios restritivos preconizados na vigente Resolução CONAMA 375/2006 e a exigência de monitoramento de todos os parâmetros independentemente da classificação desejada e da quantidade de amostras. Mesmo com a retirada da análise de substâncias orgânicas (cenário 2), o VPL continua negativo tanto para composto classe A, quanto para composto classe B, independentemente do número de amostras coletadas.

Considerando o cenário 3, com a supressão da realização de análises laboratoriais para quantificação das substâncias orgânicas e inorgânicas e mantendo as análises do rol de parâmetros de segurança microbiológica e potencial agrônômico preconizados na Resolução CONAMA 375/2006, é possível obter viabilidade financeira do processo para obtenção de composto enquadrado como produto Classe B, desde que seja aceita a proposta de monitoramento utilizando apenas 1 amostra por ano.

Considerando a proposta de priorizar o monitoramento da qualidade microbiológica do composto (cenário 4), obtém-se viabilidade financeira para o processo, inclusive para a classificação do composto final como produto classe A, desde que seja aceito o monitoramento por meio da análise de uma amostra por ano. Para a classificação do composto como produto classe B, atesta-se a viabilidade econômico-financeira tanto para o monitoramento com 1 amostra, quanto para 4 amostras por ano.

Como salientado por Bittencourt (2014), considerando a extensão do território brasileiro e as profundas diferenças de estágios de desenvolvimento social e econômico entre as suas regiões, os prestadores de serviços de saneamento têm dificuldade em contratar laboratórios certificados para a realização das análises exigidas além dos custos elevados, sobretudo, quando se trata de ETE descentralizada e de pequeno porte.

Constata-se, assim, que se forem adotadas todas as exigências da Resolução CONAMA 375/2006 (Cenário 1, classe A, 4 amostras) o valor do VPL é negativo, indicando a inviabilidade financeira da adoção do processo de compostagem para valorização do lodo de ETE implantada em empreendimentos habitacionais. Na medida em que ocorra a flexibilização das exigências tanto dos parâmetros de qualidade, quanto da quantidade de amostras, é possível constatar a viabilidade financeira.

A flexibilização, aqui defendida, está de acordo com o artigo 8 da própria Resolução CONAMA 375/2006 que estabelece que o órgão ambiental competente pode alterar a lista de substâncias analisadas dependendo das características da bacia de esgotamento. No caso das ETE de empreendimentos habitacionais, por se tratar de um equipamento de pequeno porte, com uma rede coletora curta, pouco sujeita às infiltrações e contribuições clandestinas de efluentes

industriais é razoável defender a flexibilização com maior atenção aos critérios de segurança microbiológica do produto final.

Bastos *et al.* (2013) afirmam que a legislação brasileira, claramente inspirada na resolução americana intitulada *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge* (USEPA,1994), é ainda mais restritiva que essa última. A legislação norte americana além de permitir o uso do produto Classe B (com restrições para uso), permite que essa classificação seja dada, apenas, por meio do controle das condições operacionais especificadas para os Processos de Redução Significativa de Patógenos (PRSP). A Tabela 9 mostra o fluxo de caixa para cada cenário a fim de avaliar os custos anuais da adoção do processo de compostagem.

**Tabela 9.** Fluxo de caixa para os cenários analisados

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1	-1 500.46	-15 086.82	-976.23	-12 989.88
2	1 171.17	-4 400.29	1 695.40	-2 303.35
3	1 563.38	-2 831.44	2 087.61	-734.50
4	2 210.76	-241.91	2 735.00	1 855.03

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9, pode-se observar que, em alguns casos nos quais o VPL é negativo, o fluxo de caixa é positivo, o que demonstra o peso dos custos de investimento no cálculo da viabilidade do processo. Outra observação é que, mesmo nos cenários que o fluxo de caixa é negativo, quando se divide o valor total pela população atendida (1100 habitantes), analisando o cenário com maior déficit (cenário 1, classe A, quatro amostras por ano), o custo é igual a R\$ 13.72/hab.ano o que não representa um valor *per capita* tão elevado.

Além disso, vale destacar que quando o lodo é considerado rejeito e tem que ser disposto em aterro, há duas possibilidades: aterros sanitários exclusivos ou codisposição com resíduos sólidos urbanos. A realidade é que aterros exclusivos demandam alto teor de sólidos ou mesmo que o lodo seja seco termicamente, enquanto a codisposição com resíduos sólidos urbanos, de modo geral, não são aceitas pelas Prefeituras devido a possibilidade de dificultar a operação e também por representar um risco adicional de contaminação da área. Essa dificuldade de aceitação do lodo de esgoto em aterros sanitários foi comprovada nessa pesquisa, visto a dificuldade de realizar orçamento em alguns aterros na região metropolitana da cidade de Salvador, estado da Bahia, que não aceitavam receber o lodo de esgoto.

Portanto, uma possibilidade para viabilização dos projetos seria o fornecimento de subsídios governamentais e linhas de financiamento específicas, visto que a valorização do lodo anaeróbio

e dos resíduos dos alimentos por meio da compostagem está em consonância com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que impõe uma ordem de prioridade na gestão e gerenciamento dos resíduos, qual seja: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. O lodo de esgoto não deve ser considerado rejeito visto seu potencial no uso agrícola e, com alguns incentivos financeiros ou fiscais, é possível a utilização desse resíduo de forma ambientalmente adequada.

### Conclusões

O experimento de compostagem em pequena escala de lodo de esgoto anaeróbico digerido em reator UASB permitiu concluir que:

Na escala do tratamento de esgotos descentralizado (estações *cluster*), para a aplicação da compostagem como alternativa para valorização do lodo se faz necessário além do uso de material estruturante, a incorporação de uma fonte de substrato rapidamente degradável para que o processo atinja temperaturas na faixa termofílica e, garanta a segurança microbiológica do produto final.

O volume das pilhas de compostagem influencia na classificação do produto final, pois para atendimento dos critérios de garantia da segurança microbiológica do composto previstos na Resolução CONAMA 375/2006 deve-se observar o binômio tempo-temperatura e, nas leiras com volumes reduzido é improvável que as pilhas mantenham temperaturas altas por longo período de tempo.

A análise econômico-financeira mostrou que a adoção desse processo em ETE de pequeno porte no território brasileiro depende da flexibilização na legislação ou do fornecimento de subsídios governamentais e linhas de financiamento específicas.

### Agradecimentos

*Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (Fapesb) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo fornecimento de bolsas de fomento e apoio financeiro que tornaram possível a consecução desse trabalho.*

### Referencias bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas (2004) *NBR 10004: Resíduos Sólidos: classificação*. Rio de Janeiro, 71 pp.
- Bastos, R.K.X., Bevilacqua, P.D., Mara, D.D. (2013). Análise crítico-comparativa das regulamentações brasileira, de biossólidos para uso agrícola, *Revista DAE*, **191**, 10-20.

- Bittencourt, S. (2014) *Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 200pp.
- Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Cosnelho Nacional do Meio Ambiente (2006) *Resolução CONAMA nº 375 - Define critérios e procedimentos, para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências*, Publicação Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília – DF, 29 de agosto de 2006. Acesso em 28 de abril de 2018, disponível em <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>
- Brasil, Presidência da República Casa Civil (2010) *Lei Federal nº 12.305 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*, Publicação Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília - DF, 02 de agosto de 2010. Acesso em 18 de junho de 2018, disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm)
- Brasil, Ministério das Cidades. Portaria nº 168 - *Dispõe sobre as diretrizes gerais para aquisição e alienação de imóveis com recursos advindos da integralização de cotas no Fundo de Arrendamento Residencial - FAR, no âmbito do Programa Nacional de Habitação Urbana – PNHU, integrante do Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV*. Publicação Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília – DF, 15 de abril de 2013. Acesso em 18 de junho de 2018, disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=15/04/2013&jornal=1&pagina=101>
- Diaz, L.F., Savage, G.M. (2007) Factors that affect the process. In Diaz, L.F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W., Stentiford, E. (Eds.), *Compost Science and Technology*, Elsevier, B.V., London, 49-65.
- Fundação João Pinheiro (2013) *Deficit habitacional municipal no Brasil 2010*. Acesso em 10 de março de 2018, Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/deficit-habitacional/216-deficit-habitacional-municipal-no-brasil-2010/file>
- Kulikowska, D., Klimiuk, E. (2011). Organic matter transformations and kinetics during sewage sludge composting in a two-stage system, *Bioresource Technology*, **102**(23), 10951-10958.
- Nikaeen, M., Nafez, A.H., Bina, B., Nabavi, B.F., Hassanzadeh, A. (2015) Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting, *Waste Management*, **39**, 104-110.
- Patern, S.M. (2009) *Planing and installing sustainable onsite wastewater systems*, 1a ed., McGraw-Hill, New York, 436pp.
- Piveli, R.P. (2004) *Tratamento de esgotos sanitários*. Acesso em 04 de agosto de 2016, disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/professor/elca/APOSTILA%20-%20TRATAMENTO%20DE%20ESGOTOS.pdf>
- Rego, E.E. (2014) *Curso de Engenharia Econômica*. Acesso em: 3 de outubro de 2016, disponível em: <http://www.veduca.com.br/assistir/engenharia-economica>
- Silva, M.L., Fontes, A.A. (2005) Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET), *Revista Árvore*, **29**(6), 931-936.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2016) *Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI – Relatório de Insumos e Composições sem desoneração*, Acesso em: 14 de outubro de 2016, disponível em: [http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria\\_642](http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_642)
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (1994) *A plain English guide to the EPA 503 part biosolids rule*. Acesso em 26 de setembro de 2016, disponível em: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a\\_plain\\_english\\_guide\\_to\\_the\\_epa\\_part\\_503\\_biosolids\\_rule.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a_plain_english_guide_to_the_epa_part_503_biosolids_rule.pdf)