

II-816-MAPEAMENTO GEORREFERENCIADO DA PRODUÇÃO E DO VOLUME DE LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM (RMB)

Tatiana Aya Nagahama Costa⁽¹⁾

Discente da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA), Universidade Federal do Pará (UFPA).

Neyson Martins Mendonça⁽²⁾

Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento, Professor Associado do Instituto de Tecnologia, Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA).

Endereço⁽¹⁾: Travessa 3 de Maio, 1761 – São Brás – Belém – PA – CEP: 66063388 – Brasil – Tel: (91) 99343-7449 – e-mail: tatiaya10@gmail.com

RESUMO

As ETE's são unidades que integram o sistema de esgoto sanitário do tipo centralizado (SES-C) ou do tipo descentralizado (SES-D) para realizarem a remoção de C, N e/ou P, e que geram o subproduto sólido denominado de lodo, o qual necessita de gerenciamento adequado quanto ao transporte, tratamento e a destinação final em atendimento as diretrizes da ABNT NBR 12.2009/2011 e da Resolução Nº 498/2020 do CONAMA sob os aspectos quantitativos (massa e volume) e qualitativos (físico-químico e microbiológico) para que se possa ter a devida valorização de tal subproduto sólido. Nesse sentido, este trabalho teve o objetivo de realizar o mapeamento georreferenciado da geração de lodo das ETE's na RMB (Belém, Ananindeua e Marituba), de modo a se planejar o gerenciamento de lodo em termos de valorização, cujas etapas principais do trabalho foram: i) levantamento de campo e ii) estimativa da produção com o uso do software PROBIO 1.0, envolvendo em três cenários distintos para as ETE's identificadas na primeira etapa desse trabalho. Os resultados da etapa de levantamento de campo, ocorridos em 2019, permitiram mapear 23 ETE's com capacidade hidráulica de 1.089 L/s, PE em 765.783 habitantes e distribuição espacial de 17 ETE's (73,91%) em Belém, 5 ETE's (21,74%) em Ananindeua e 1 ETE (4,35%) em Marituba. E na estimativa da produção de lodo, em termos globais, se considerando todos os cenários e apenas a remoção de C por tratamento anaeróbio, se obteve valor mediano de ~572,8 kg/d (381,9 kg/d < IC < 763,8 kg/d – IC 0,9478) para as ETE's do SES-C e de ~60,22 kg/d (46,80 kg/d < IC < 76,75 kg/d – IC 0,9116) para as ETE's do SES-D, com produção percapita de 6,24gST/hab.d, 9,36gST/hab.d e 12,59gST/hab.d, respectivamente, para o cenário 1, 2 e 3.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento, ETE, Lodo, Gerenciamento.

INTRODUÇÃO

A qualidade desejada da remoção dos poluentes de cada localidade é atendida pelas etapas de tratamento de esgotos, sendo classificadas por nível de tratamento: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário (VON SPERLING, 2014).

“Estações de tratamento de esgoto (ETEs) geram subprodutos sólidos que precisam ser gerenciados de forma segura para não comprometer o meio ambiente e a saúde da população. Dentre estes subprodutos, destaca-se o lodo gerado nas unidades de tratamento primário, biológico e físico-químico, os quais concentram boa parte dos poluentes e contaminantes removidos durante o tratamento do esgoto” (“Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária E Ambiental”, 2021).

Para que não seja prejudicial, o lodo deve passar por um tratamento adequado, que consiste em adensamento (remoção de umidade), estabilização (remoção de matéria orgânica), condicionamento (preparação para a desidratação), desaguamento (redução do volume do lodo) e higienização (eliminação/redução dos organismos patogênicos). Apesar da existência de cuidados com o tratamento, o gerenciamento do lodo tornou-se um dos problemas da atualidade, por conta de sua produção em massa e de sua disposição final, especificamente o aterro sanitário como opção mais utilizada. Por isso, buscou-se alternativas para que o lodo não seja mais visto como somente descartável.

Segundo Khai (2007), nos Estados Unidos metade do lodo é empregado no solo, e na região europeia cerca de 30% do lodo de ETE vai para uso agrícola como fertilizante. No Brasil, Além Sobrinho (2001) consta que a produção de esgoto doméstico fica entre 80 e 120 L/hab.d, sendo a geração de lodo de 150 g/hab.d, e para Pedroza et al. (2010) a estimativa da produção de lodo gira em torno de 150 a 220 mil toneladas ao ano. Em termos quantitativos, tais pesquisas reforçam a ideia de ressignificar o uso do lodo como uma alternativa sustentável.

Com isso, ao longo dos anos, o lodo foi explorado e incorporado como potencial fertilizante, por possuir nutrientes suficientes e eficazes para uso em solo, conhecido como bio sólido, que consta como requisitos de alternativa ambientalmente adequada pela Resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (Bittencourt, 2021). Porém é pouco empregado na grande maioria do território nacional, pois os processos impostos pela Resolução para viabilizar o uso do subproduto sólido na agrícola são muito burocráticos e possuem algumas falhas que, caso não sejam revisadas, podem comprometer a segurança agrícola, sanitária e ambiental (Silva, 2017).

Desta forma, este artigo apresenta o mapeamento georreferenciado das ETE's da Região Metropolitana de Belém (RMB), com foco na geração de lodo, em termos mássico e volumétrico, com o intuito de se planejar o gerenciamento a ser desenvolvido para RMB, em termos de valorização e produção de energia.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi desenvolvida em etapas, que consistem em Área de Estudo, Descrição das Estações de Tratamento de Esgoto, Investigação Experimental e Tratamento de Dados.

ÁREA DE ESTUDO

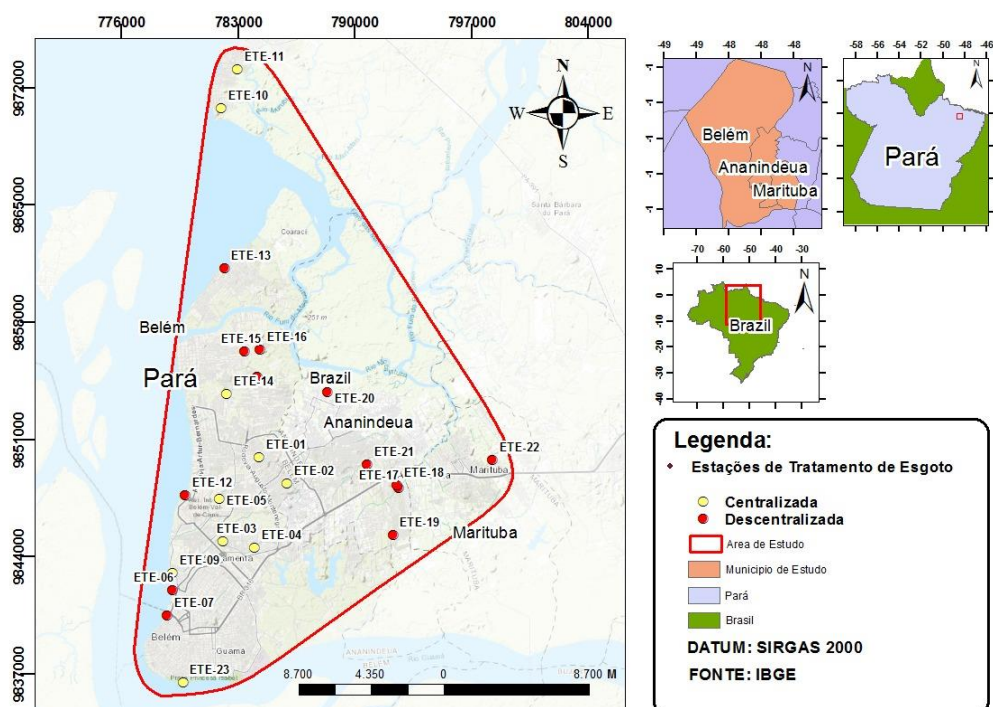
Atualmente a Região Metropolitana de Belém é composta por Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara do Pará e Santa Isabel do Pará, totalizando 6 cidades. Os municípios de interesse deste artigo são Belém, Ananindeua e Marituba.

Belém, com sua área territorial de 1.059,46 km², possui a população de 1.492.745 habitantes, sendo distribuída com 99,14% da zona urbana e 0,86% da zona rural. Em relação aos serviços de esgotamento sanitário, somente 15,77% da população total do município (235.469 habitantes) possui acesso.

Ananindeua, com sua área territorial de 190,450 km², possui a população de 530.598 habitantes, sendo 529.272 habitantes (99,75%) da zona urbana e 1.326 habitantes (0,25%) da zona rural. Em relação aos serviços de esgotamento sanitário, somente 2,08% da população total do município (11.018 habitantes) possui acesso.

Marituba, com sua área territorial de 103,340 km², possui a população de 131.521 habitantes, sendo 130.153 habitantes (98,96%) da zona urbana e 1.368 habitantes (1,04%) da zona rural. Em relação aos serviços de esgotamento sanitário, somente 10,83% da população total do município (14.250 habitantes) possui acesso. Os dados acima foram obtidos através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2019, do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2021 e do Atlas Esgoto 2013 da Agência Nacional de Água (ANA).

Por meio das informações obtidas pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), é possível verificar a numeração, a identificação, o município em se encontra e o tipo de sistema de cada estação de tratamento. Todas as informações constam no Mapa 1 a seguir.



Mapa 1: Área de estudo com localização das ETE's centralizadas e descentralizadas.

Nota: A identificação de cada ETE consiste em:

i) Centralizadas (Belém): ETE-01 – ETE Sideral; ETE-02 – ETE Coqueiro; ETE-03 – ETE Rua da Mata; ETE-04 – ETE Tavares Bastos; ETE-05 – ETE Benguí; ETE-09 – ETE UNA; ETE-10 – ETE Mosqueiro I (Vila); ETE-11 – ETE Mosqueiro II (Aeroporto); ETE-23 – ETE BHEN.

ii) Descentralizadas: 1) Belém: ETE-06 – ETE Vila da Barca; ETE-07 – ETE Porto Terminal Hidroviário; ETE-08 – ETE Fé em Deus; ETE-12 – ETE Pratinha; ETE-13 – ETE Outeiro; ETE-14 – ETE Viver Primavera; ETE-15 – ETE Viver Maracá; ETE-16 – ETE R. Quintas dos Paricás; 2) Ananindeua: ETE-17 – ETE R. Juscelino Kubitschek; ETE-18 – ETE R. Ulisses Guimarães; ETE-19 – ETE R. Portal do Aurá; ETE-20 – ETE R. Maguariaçú; ETE-21 – ETE R. Novo Cristo I; 3) Marituba: ETE-22 – ETE R. Viver Melhor.

DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Cada estação de tratamento situa-se em pontos estratégicos da região metropolitana, atendendo as necessidades de cada local, e, com isso, é estruturada de formas distintas. Logo a Tabela 1 descreve as vazões produzidas e os processos de tratamento de cada estação.

Tabela 1: Vazão e etapas de tratamento das estações.

ETE	Q _{EA} (L/s)	TRATAMENTO PRELIMINAR	PROCESSO DE TRATAMENTO	TRATAMENTO DE LODO	TRATAMENTO DO BIOGÁS
ETE-01	92,36	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB	LSC + HQ	NTU
ETE-02	125,00	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB	LSC + HQ	NTU
ETE-03	106,25	GM/PE/DA/MQP	UASB + LAC	DC+ HQ	NTU
ETE-04	256,25	GM/PE/DA/MQP	UASB + FAD	DC+ HQ	NTU
ETE-05	90,28	GM/DHCD/MQP/PRFI	UASB	LSC+ HQ	NTU
ETE-09	14,24	GM/DM/PRC/MQP	UASB + FAD	DC+ HQ	NTU
ETE-10	8,68	PRETRAT/MQP	UASB + LP	DC+ HQ	NTU

ETE-11	20,83	PRETRAT/MQP	UASB + LP	DC+ HQ	NTU
ETE-23	269,79	GM/DM/PRC/MQP	UASB	DC+ HQ	NTU
ETE-06	24,31	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-07	45,14	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-08	10,07	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-12	8,68	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB	LSC+ HQ	NTU
ETE-13	26,39	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-14	7,64	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + FA	LSC+ HQ	NTU
ETE-15	25,35	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-16	5,90	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-17	10,76	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-18	4,86	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-19	4,86	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-20	19,44	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-21	19,10	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU
ETE-22	133,30	GM/PRC/DHCD/MQP	UASB + BAS	LSC+ HQ	NTU

Nota: As siglas utilizadas em cada etapa de tratamento da fase líquida, sólida e gasosa foi a seguinte:

i) Tratamento Preliminar: 1) GM/PRC/DHCD/MQP: grade média manual; peneira rotativa de canal; caixa de areia de fluxo horizontal de câmara dupla; medidor de vazão Parshall; 2) GM/PE/DA/MQP: grade média manual; peneira estática; caixa de areia de aerada fluxo vertical; medidor de vazão Parshall; 3) GM/DHCD/MQP/PRFI: grade média manual; caixa de areia de fluxo horizontal de câmara dupla; medidor de vazão Parshall; peneira rotativa de fluxo interno; 4) Perneira rotativa de canal; caixa de areia aerada de fluxo horizontal/ medidor de vazão Parshall.

ii) Processo de tratamento: 1) UASB: reator anaeróbio de manta de lodo; 2) UASB+LAC: reator anaeróbio de manta de lodo + lodo ativado convencional; 3) UASB+FAD: reator anaeróbio de manta de lodo + flotação por ar dissolvido; 4) UASB+LP: reator anaeróbio de manta de lodo + lagoa de polimento; 5) UASB+BAS: reator anaeróbio de manta de lodo + biofiltro aerado submerso.

iii) Tratamento do lodo: 1) Leito de secagem coberto e higienização química com cal; 2) Decanter centrífuga e higienização química com cal.

iv) Tratamento do biogás- não tem unidade implantada (NTU).

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

A investigação experimental foi realizada no período de 2019, dividida em duas etapas distintas. A primeira etapa (Figura 1) consiste no levantamento de campo, obtendo informações quantitativas e qualitativas relativas ao esgoto bruto que chega nas ETE's.



Figura 1: Primeira etapa do procedimento de investigação experimental para estimativa da geração de energia e emissão de metano produzido nas ETE's da RMB nos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba para o SES-C e o SES-D.

Nota: Os dados da Figura 1 são meramente ilustrativos.

Em seguida tem-se a segunda etapa (Figura 2) que corresponde a estimativa da produção e do volume de lodo.

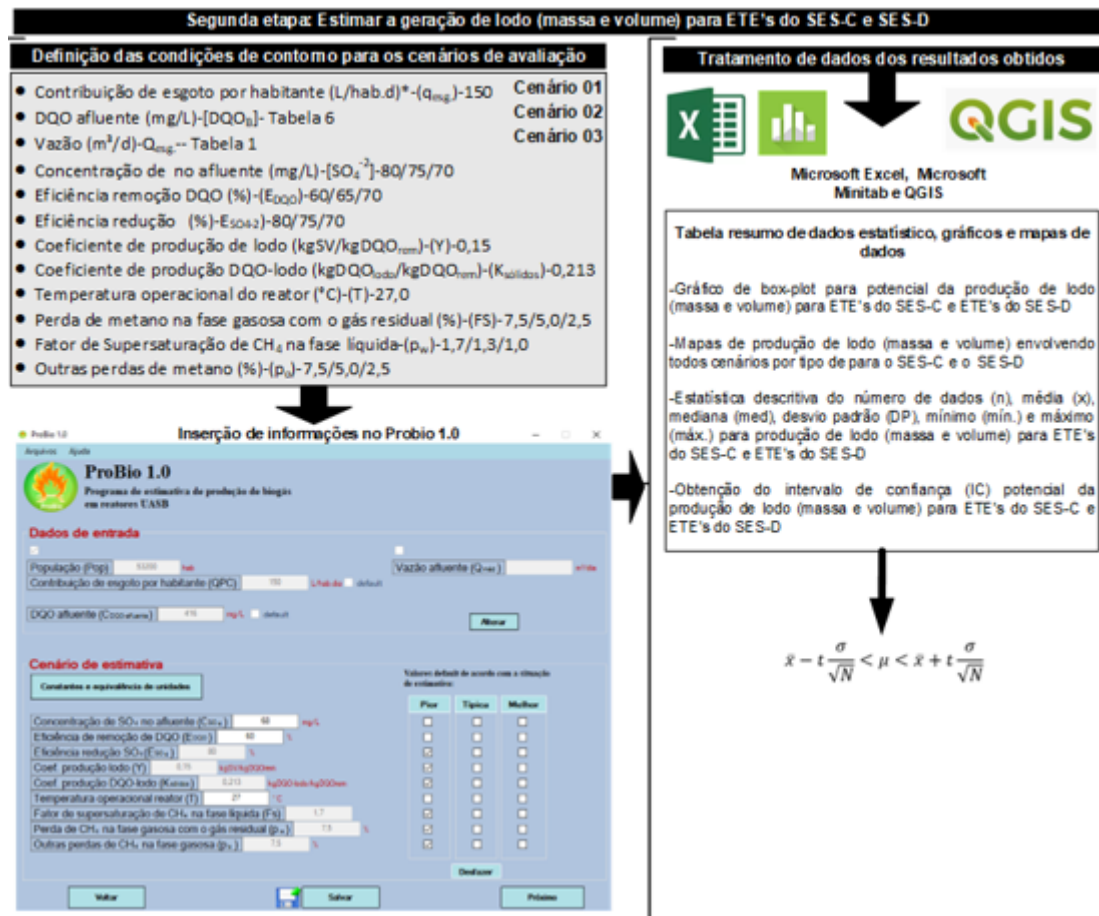


Figura 2: Segunda etapa do procedimento de investigação experimental para estimativa da geração de energia e emissão de metano produzido nas ETE's da RMB nos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba para o SES-C e o SES-D.

Nota: Os dados da Figura 2 são meramente ilustrativos.

A parceria com a Unidade de Serviço de Tratamento de Esgoto (USTE) da COSANPA foi de fundamental importância para a obtenção dos dados quantitativos e qualitativos. Os dados quantitativos são compostos pela vazão de esgoto afluente e pela capacidade hidráulica de projeto das ETE's. Os dados qualitativos são compostos por campanhas de amostragem nas ETE's, que determinaram as variáveis físico-químicas e microbiológicas. O detalhamento das variáveis, da metodologia e dos equipamentos utilizados constam no artigo de Santos (2022).

Após finalizar a primeira etapa, foi feita a quantificação dos dados iniciais para os cálculos da produção e do volume do lodo, envolvendo três cenários (pessimista-1, realista-2 e otimista-3), que consta na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Dados de entrada para quantificação do lodo nas ETE's da RMB.

Variáveis de entrada	Sigla	Cenários de avaliação		
		1	2	3
Contribuição de esgoto por habitante (L/hab.d)*	$q_{\text{esg.}}$	150	150	150
DQO afluente (mg/L)	[DQO _B]	416	416	416
Concentração de SO_4^{2-} no afluente (mg/L)	[SO_4^{2-}]	68	68	68
Eficiência remoção DQO (%)	E_{DQO}	60	65	70
Eficiência redução SO_4^{2-} (%)	$E_{\text{SO}_4^{2-}}$	80	75	70
Coefficiente de produção de lodo (kgSV/kgDQO _{rem})	Y	0,15	0,15	0,15
Coefficiente de produção DQO-lodo (kgDQO _{lodo} /kgDQO _{rem})	K _{sólidos}	0,213	0,213	0,213
Temperatura operacional do reator (°C)	T	27,0	27,0	27,0
Perda de metano na fase gasosa com o gás residual (%)	FS	7,5	5,0	2,5

Fator de Supersaturação de CH ₄ na fase líquida	p _w	1,7	1,35	1,0
Outras perdas de metano (%)	p _o	7,5	5,0	2,5
Concentração do lodo de descarte (%)	[C _{lodo}]	4,0	4,5	5,0
Densidade do lodo (kgSST/m ³)	[g _{lodo}]	1.020	1.020	1.020
Coef. de sólidos no sistema (kgSST/kgDQO _{aplicada})	Y _{lodo}	0,10	0,15	0,20

Com as informações da Tabela 2, a seguir apresentam-se as equações, utilizadas pelo software PROBIO 1.0, para a estimativa da produção e do volume do lodo.

$$C_{(DQO)a} = \frac{Q_{EA} \times [DQO_B]}{1000} \quad \text{equação (1)}$$

Sendo:

C_{(DQO)a}: Carga de DQO Aplicada (kgDQO/d)

Q_{EA}: Vazão de Esgoto Afluente (L/s)

[DQO_B]: Concentração de DQO Afluente (g/m³)

$$P_{LODO} = Y_{LODO} \times C_{(DQO)a} \quad \text{equação (2)}$$

Sendo:

P_{LODO}: Produção de Lodo ou Carga de SST (kgSST/d)

Y_{LODO}: Coeficiente de Produção de Sólido (kgSST/kgDQO_{aplicada})

C_{(DQO)a}: Carga de DQO Aplicada (kgDQO/d)

$$V_{LODO} = \frac{P_{LODO}}{\frac{[C_{LODO}]}{100} \times \gamma} \quad \text{equação (3)}$$

Sendo:

V_{LODO}: Volume de Lodo (m³/d)

P_{LODO}: Produção de Lodo ou Carga de SST (kgSST/d)

[C_{LODO}]: Concentração de Lodo de Descarte (%)

γ: Massa Específica do Lodo (kg/m³)

TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento dos dados foi feito em programas computacionais, sendo eles a Planilha do Microsoft Excel e o Minitab 21, e, com isso, obteve-se as estatísticas descritivas e analíticas. As estatísticas descritivas determinadas foram a contagem de amostras (N°), a média (MÉDIA), o desvio padrão (DP), o mínimo (MÍN), a mediana (MED) e o máximo (MÁX). As estatísticas analíticas determinadas foram a produção de lodo (P_{LODO}) e o volume de lodo (V_{LODO}). A partir dessas informações foi possível determinar o intervalo de confiança (IC), que envolve a natureza dos dados em paramétricos (Teste de t - Amostra Única) ou não paramétricos (Teste de Wilcoxon - Amostra Única). Ademais foram elaborados gráficos do tipo box-plot dos 3 cenários de P_{LODO} e V_{LODO}, avaliando a distribuição dos dados, quanto a amplitude interquartil (AIQ) e a ocorrência de valores extremos (outliers).

RESULTADOS

Os resultados obtidos consistem em Caracterização da Vazão e do Esgoto Bruto e Resultado da Estimativa da Produção e do Volume de Lodo.

CARACTERIZAÇÃO DA VAZÃO E DO ESGOTO BRUTO

Para o total, a soma e a média da vazão das ETE's são de 1.329,50 L/s e de 57,80±76,50 L/s, respectivamente, cujo sistema de esgotamento tem uma faixa de variação da vazão com valor mínimo de 4,90 L/s (ETE-19/ETE-20) e valor máximo de 269,80 L/s (ETE-09).

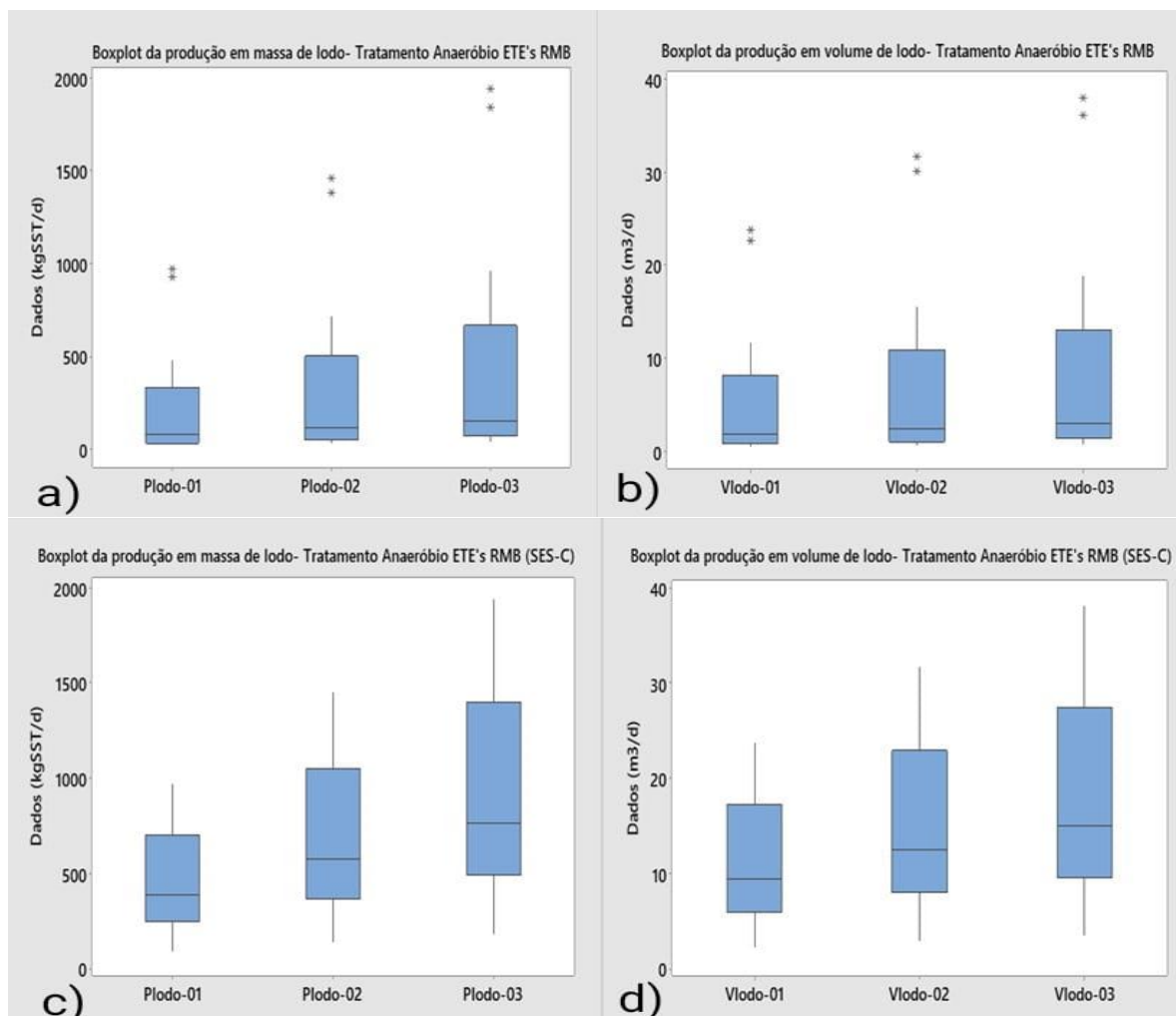
Para o SES-C, a soma e a média da vazão das ETE's são de 1.142,70 L/s e de $127,00 \pm 84,70$ L/s, respectivamente, cujo sistema de esgotamento tem uma faixa de variação da vazão com valor mínimo de 24,30 L/s (ETE-10) e valor máximo de 269,80 L/s (ETE-09). Em termos percentuais, a vazão do SES-C corresponde a 85,95% da capacidade hidráulica de todas as ETE's da RMB, o equivalente a 658.182 habitantes atendidos.

Para o SES-D, a soma e a média da vazão das ETE's são de 186,81 L/s e de $13,34 \pm 7,51$ L/s, respectivamente, cujo sistema de esgotamento tem uma faixa de variação da vazão com valor mínimo de 4,86 L/s (ETE-19/ETE-20) e valor máximo de 26,39 L/s (ETE-14). Em termos percentuais, a vazão do SES-D corresponde a 9,35% da capacidade hidráulica de todas as ETE's da RMB, o equivalente a 107.600 habitantes atendidos.

Se comparar os resultados para cada cidade metropolitana, tem-se a soma e a média da vazão das ETE's para Belém de 1264,55 L/s e de 74,39 L/s, para Ananindeua de 45,83 L/s e de 9,17 L/s, e para Marituba de 19,10 L/s e de 19,10 L/s, respectivamente.

RESULTADO DA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO E DO VOLUME DE LODO

A Figura 3 a seguir apresenta o comportamento de variação para PLODO e VLODO nos cenários de avaliação das ETE's TOTAL, SES-C e SES-D.



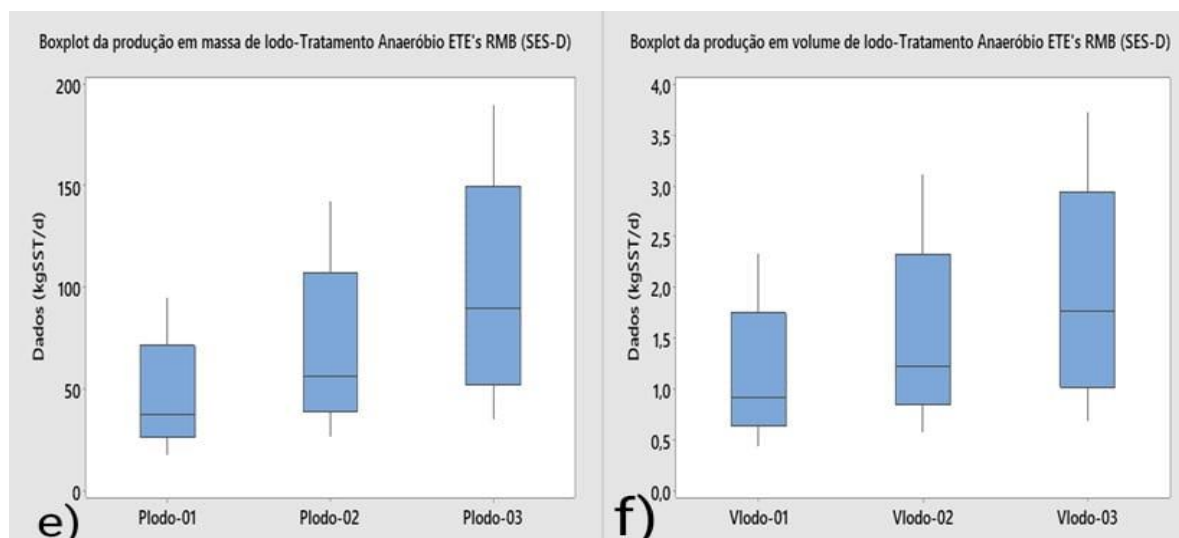


Figura 3: Boxplot da produção e do volume de lodo das ETE's.

Nota: a) Produção de Lodo TOTAL; b) Volume de Lodo TOTAL; c) Produção de Lodo SES-C; d) Volume de Lodo SES-C; e) Produção de Lodo SES-D; f) Volume de Lodo SES-D.

Na Figura 3, para ambos os sistemas, é possível observar que a AIQ da produção e do volume de lodo foi crescente, conforme a mudança nos valores de referência de cada cenário. O TOTAL possui apenas 2 outliers, devido aos intervalos de valores dos dois sistemas serem distintos. Tanto o SES-C e o SES-D não possuem outliers. Os maiores valores de produção e volume pertencem ao sistema centralizado, por possuir maior capacidade hidráulica e maior tratamento da carga orgânica em comparação com o sistema descentralizado.

A Tabela 3 mostra o resumo estatístico descritivo de cada tipo de sistema de tratamento de esgoto.

Tabela 3: Estatística descritiva de produção e volume de lodo de cada SES

TIPO DE SISTEMA	CENÁRIO	VARIÁVEIS	UNID.	Nº	SOMA	MÉDIA	DP	MÍN	MÁX
TOTAL	1	P _{LODO}	kgSST/d	23	4778,50	207,80	275,00	17,50	969,70
		V _{LODO}	m³/d	23	117,12	5,09	6,74	0,43	23,77
	2	P _{LODO}	kgSST/d	23	7167,70	311,60	412,60	26,20	1454,60
		V _{LODO}	m³/d	23	156,16	6,79	8,99	0,57	31,69
	3	P _{LODO}	kgSST/d	23	9644,00	419,00	548,00	35,00	1939,00
		V _{LODO}	m³/d	23	189,10	8,22	10,74	0,69	38,03
SES-C	1	P _{LODO}	kgSST/d	9	4107,00	456,00	304,00	87,00	970,00
		V _{LODO}	m³/d	9	100,66	11,18	7,46	2,14	23,77
	2	P _{LODO}	kgSST/d	9	6161,00	685,00	457,00	131,00	1455,00
		V _{LODO}	m³/d	9	134,22	14,91	9,95	2,85	31,69
	3	P _{LODO}	kgSST/d	9	8214,00	913,00	609,00	175,00	1939,00
		V _{LODO}	m³/d	9	161,06	17,90	11,94	3,43	38,03
SES-D	1	P _{LODO}	kgSST/d	14	671,43	47,96	27,01	17,47	94,85
		V _{LODO}	m³/d	14	16,46	1,175	0,662	0,428	2,325
	2	P _{LODO}	kgSST/d	14	1007,10	71,90	40,50	26,20	142,30
		V _{LODO}	m³/d	14	21,94	1,567	0,883	0,571	3,10
	3	P _{LODO}	kgSST/d	14	1430,20	102,20	54,90	34,90	189,70
		V _{LODO}	m³/d	14	28,04	2,003	1,076	0,685	3,72

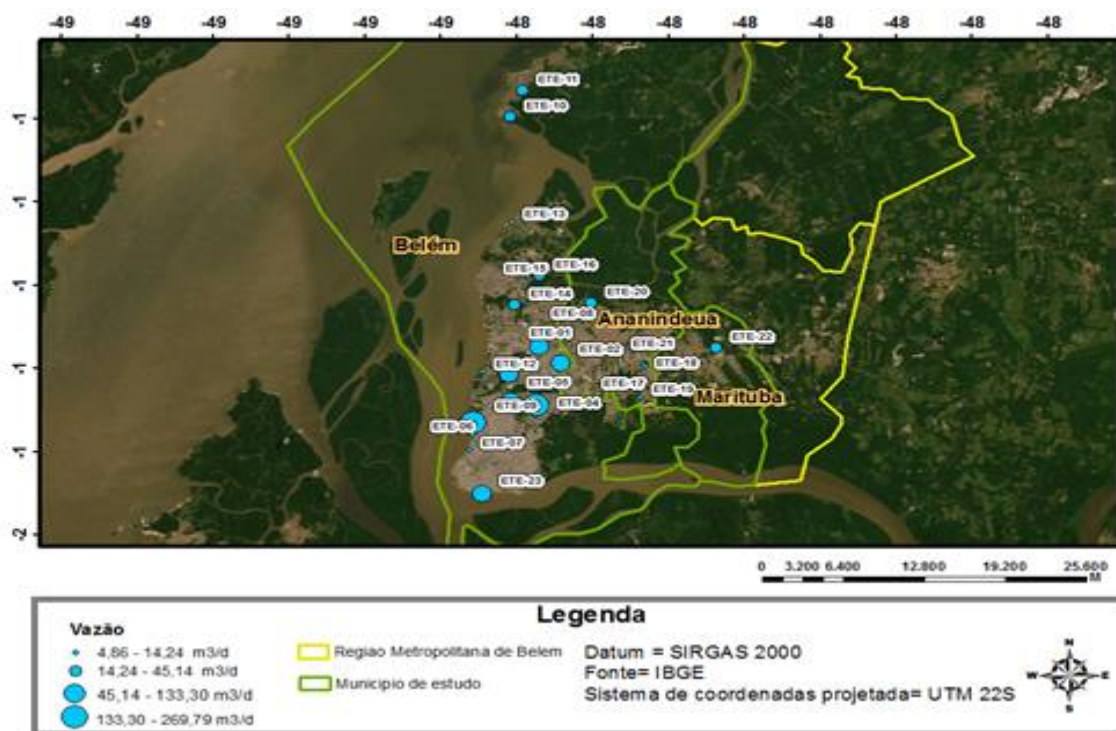
No Cenário 1, a soma da produção de lodo TOTAL foi de 4778,50 kgSST/d, sendo a soma do SES-C de 4107,00 kgSST/d e a soma do SES-D de 671,43 kgSST/d, enquanto a soma do volume de lodo TOTAL foi de 117,12 m³/d, sendo a soma do SES-C de 100,66 m³/d e a soma do SES-D de 16,46 m³/d. Em termos populacionais, tanto o sistema centralizado como o descentralizado possuem a produção de 6,24 gSST/hab.d e o volume de

0,15 L/hab.d. Em relação a cada cidade metropolitana, a produção e o volume de lodo foram para Belém de 4545,11 kgSST/d e de 111,40 m³/d, para Ananindeua de 164,74 kgSST/d e de 4,04 m³/d, e para Marituba de 68,64 kgSST/d e de 1,68 m³/d, respectivamente.

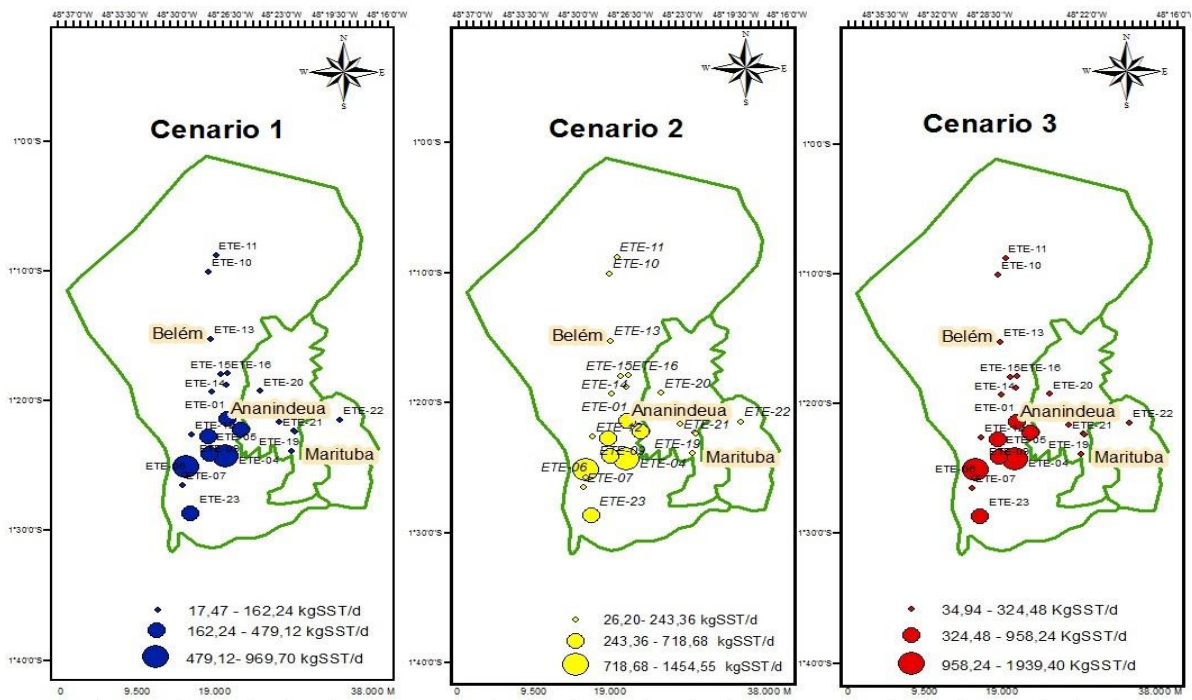
No Cenário 2, a soma da produção de lodo TOTAL foi de 7167,70 kgSST/d, sendo a soma do SES-C de 6161,00 kgSST/d e a soma do SES-D de 1007,10 kgSST/d, enquanto a soma do volume de lodo TOTAL foi de 156,16 m³/d, sendo a soma do SES-C de 134,22 m³/d e a soma do SES-D de 21,94 m³/d. Em termos populacionais, tanto o sistema centralizado como o descentralizado possuem a produção de 9,36 gSST/hab.d e o volume de 0,20 L/hab.d. Em relação a cada cidade metropolitana, a produção e o volume de lodo foram para Belém de 6817,67 kgSST/d e de 148,53 m³/d, para Ananindeua de 247,11 kgSST/d e de 5,38 m³/d, e para Marituba de 102,96 kgSST/d e de 2,24 m³/d, respectivamente.

No Cenário 3, a soma da produção de lodo TOTAL foi de 9644,00 kgSST/d, sendo a soma do SES-C de 8214,00 kgSST/d e a soma do SES-D de 1430,20 kgSST/d, e a soma do volume de lodo TOTAL foi de 189,10 m³/d, sendo a soma do SES-C de 161,06 m³/d e a soma do SES-D de 28,04 m³/d. Em termos populacionais, o sistema centralizado possui a produção de 12,48 gSST/hab.d e o volume de 0,24 L/hab.d, e o sistema descentralizado possui a produção de 13,29 gSST/hab.d e o volume de 0,26 L/hab.d. Em relação a cada cidade metropolitana, a produção e o volume de lodo foram para Belém de 9177,58 kgSST/d e de 179,95 m³/d, para Ananindeua de 329,48 kgSST/d e de 6,46 m³/d, e para Marituba de 137,28 kgSST/d e de 2,69 m³/d, respectivamente.

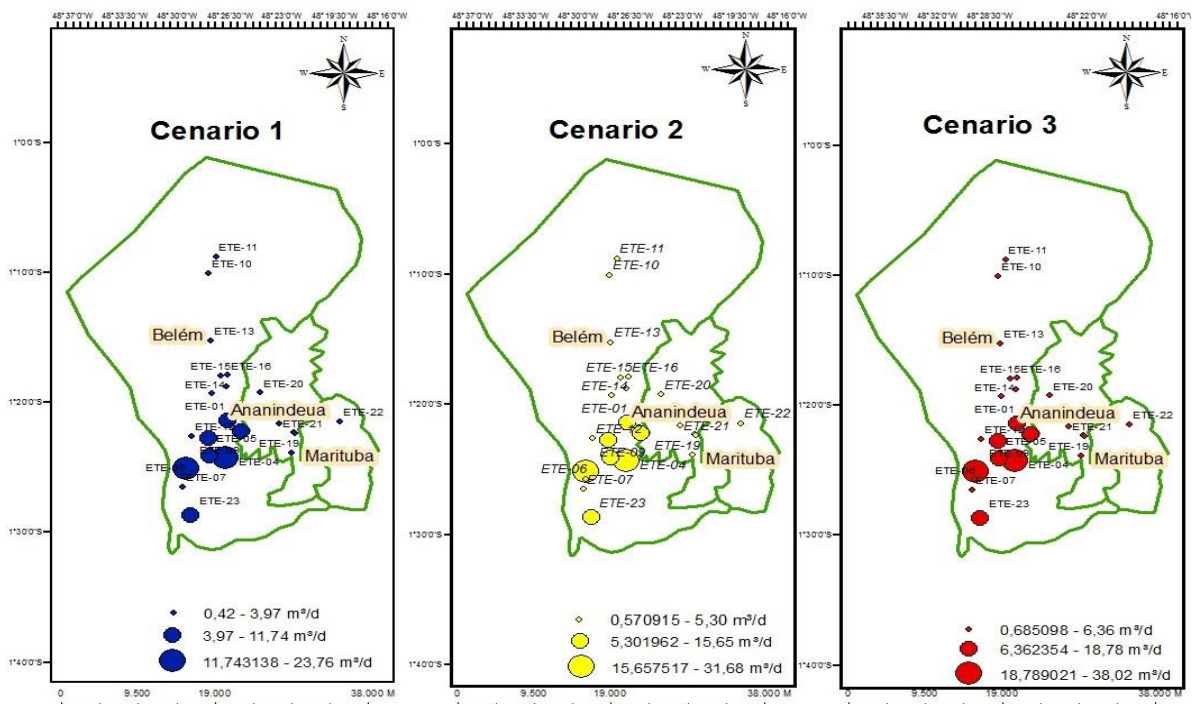
Com isso, é possível observar a quantificação das variáveis em seus respectivos pontos georreferenciados nos mapas a seguir.



Mapa 2: Mapa georreferenciado de vazão das ETE's.



Mapa 3: Mapa georreferenciado de produção de lodo das ETE's.



Mapa 4: Mapa georreferenciado de volume de lodo das ETE's.

A seguir, na Tabela 4, tem-se o resumo do intervalo de confiança (IC) para ETE's da RMB considerando os cenários avaliados, de maneira a se ter conhecimento da margem de incerteza (ou imprecisão) frente aos cálculos efetuados no presente estudo.

Tabela 4: Resumo do intervalo de confiança para P_{LODO} e V_{LODO} dos dois sistemas.

TIPO DE SISTEMA	VARIÁVEL	Nº	MEDIANA (%)	CONFIANÇA ATINGIDA	INTERVALO DE CONFIANÇA (IC)	
					INFERIOR	SUPERIOR
SES-C	P_{LODO}	27	572,8	0,9478	381,9	763,8
	V_{LODO}	27	12,48	0,9478	9,36	15,66
SES-D	P_{LODO}	42	60,22	0,9116	46,80	76,75
	V_{LODO}	42	1,259	0,9116	1,020	1,713

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos do presente trabalho, conclui-se que o mapeamento georreferenciado mais as previsões de lodo (cenários 1, 2 e 3) realizadas no software PROBIO 1.0 demonstraram ser ferramentas importantes para se entender como ocorre de maneira especializada da produção de lodo por município (Belém, Ananindeua e Marituba) e ETE interligada ao tipo de SES (centralizado e descentralizado), o que possibilitará melhorar o gerenciamento de lodo na RMB.

A etapa de levantamento de campo, durante o ano de 2019, mapeou 23 ETE's cuja capacidade hidráulica total é de 1.089 L/s, população estimada (PE) em 765.783 habitantes e distribuição espacial de 17 ETE's (73,91%) em Belém, 5 ETE's (21,74%) em Ananindeua e 1 ETE (4,35%) em Marituba.

A produção de lodo, em termos globais, se considerando todos os cenários e apenas a remoção de C por tratamento anaeróbio, se obteve valor mediano de $\sim 572,8$ kg/d (IC 0,9478) para as ETE's do SES-C e de $\sim 60,22$ kg/d (IC 0,9116) para as ETE's do SES-D, com produção percapita de 6,24gST/hab.d, 9,36gST/hab.d e 12,59gST/hab.d, respectivamente, para o cenário 1, 2 e 3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e produção de lodo. In: Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, 2001. p. 7 – 40.
2. BATISTA, L. F. Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final. 197 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
3. BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M. Regulamentação brasileira quanto à frequência de monitoramento de lodo de esgoto para uso agrícola: estudo de caso do estado do Paraná. Revista DAE, Edição nº 206, p. 21-31, 2017.
4. BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; MIKI, M. K.; BASTOS, R. K. X. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 2 - Aspectos legais. Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 2, n. 1, p. 17-29, 2021a.
5. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 498. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2020.
6. KHAI, N. M. *Effects of using wastewater and biosolids as nutrient sources on accumulation and behaviour of trace metals in Vietnamese soils*. 2007. 71p. Tese (Doutorado) – Universidade Sueca de Ciências Agrícolas. 2007. Uppsala: 2007.
7. MENDONÇA, N. M.; CHERNICHARO, C. A. de L.; ANDREOLI, C. V.; PEREIRA, L. M.; SOUZA, M. A. de. Gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento de esgotos em empreendimentos habitacionais. Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais. Fortaleza. Editora Impreco. p. 493-572. 2019.
8. ÓRGÃO OFICIAL DE INFORMAÇÃO TÉCNICA DA ABES. Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária E Ambiental. Editora Zeppelini. Rio de Janeiro. v. 02, n. 01, p. 1-101, 2021.

9. PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. Revista Liberato (Novo Hamburgo), v. 11, p. 147-157, 2010.
10. SILVA, B. S. da; MIKI, M. K. Práticas operacionais e de empreendimentos – Análise crítica dos instrumentos legais do ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA) para uso agrícola do lodo de esgoto. Revista DAE, Edição nº: 205, p. 54-70, 2017.
11. SANTOS, T. do S. N. do. (2022) Estimativa Da Geração De Energia E Emissão De Metano Produzido Nas Estações De Tratamento De Esgoto Da Região Metropolitana De Belém (RMB). Artigo (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal do Pará, Belém, 15 pp.
12. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. v. 1.