

REVISTA AIDIS

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

ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO DO BRASIL E DA COSTA RICA: ESTUDO DE CASO COMPARATIVO DAS CONDIÇÕES DE QUALIDADE DO ESGOTO BRUTO, DO EFLUENTE E EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E SÓLIDOS

* Gabriela Rodrigues Barroso¹
Viviana Solano Ramírez¹
Saulo Nonato de Souza¹
Erick Javier Centeno Mora^{1,2}
Sílvia Corrêa Oliveira¹

WASTEWATER TREATMENT PLANS OF BRAZIL AND COSTA RICA: COMPARATIVE CASE STUDY OF RAW WASTEWATER AND EFFLUENT QUALITY AND REMOVAL EFFICIENCY OF ORGANIC MATTER AND SOLIDS

Recibido el 31 de enero de 2019; Aceptado el 2 de octubre 2019

Abstract

This article aims to evaluate 11 Wastewater Treatment Plants (WWTPs) from Costa Rica and Brazil, by comparing its Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Suspended Solids (TSS) in the raw sewage and in the effluent. Regarding the raw sewage composition, significant differences ($\alpha = 5\%$) between both countries were found for COD and TSS, with no significant differences for the BOD concentrations. In addition, Activated Sludge (AS)-based WWTP from Brazil showed a statistically significant better performance than the Costa Rican ones. Among the Brazilian WWTP, AS-based systems (two different variants were evaluated) had a better performance than the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor-based systems with a post-treatment of Trickling Filter (TF). Finally, in the case of the AS-based WWTP of Brazil, no statistically difference was detected in regards of their compliance of the Brazilian or the Costa Rican discharge limits for the three considered parameters, even when the Costa Rican compliance limits are more stringent.

Keywords: sewage, activated sludge, trickling filter, UASB reactor, effluent quality.

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

² Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA, Universidade Federal de Minas Gerais. Calle / Av. Antônio Carlos, 6627, Escola de Engenharia, Bloco 1 - 4º andar – Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 31270-010. Brasil. Email: gabriela_r_barroso@hotmail.com

Resumo

No presente estudo de caso foram comparadas 11 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do Brasil e da Costa Rica, considerando as características do esgoto bruto, efluente do sistema e eficiência de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos Suspensos Totais (SST). Ao comparar as condições do esgoto bruto entre os dois países, obteve-se uma diferença estatisticamente significativa ($\alpha = 5\%$) para os parâmetros DQO e SST, no entanto essa diferença não foi significativa para a DBO. Adicionalmente, os sistemas de lodos ativados de aeração prolongada do Brasil mostraram um desempenho estatisticamente superior a seus homólogos da Costa Rica para esses parâmetros. Ao avaliar o desempenho dos sistemas do Brasil segundo a tecnologia de tratamento biológico, os sistemas de lodos ativados (nas duas variantes presentes na amostra) apresentaram um desempenho superior ($\alpha = 5\%$) aos sistemas de reator anaeróbio de fluxo ascendente de manto de lodo (UASB) seguido por filtro biológico percolador (FBP). Finalmente, detectou-se que os sistemas com lodos ativados conseguiram atender na mesma proporção ($\alpha = 5\%$), para a maioria dos parâmetros avaliados, o padrão de lançamento de efluentes do Brasil e o da Costa Rica, sendo este último mais restritivo.

Palavras chave: esgoto, lodos ativados, filtro biológico percolador, reator UASB, qualidade do efluente.

Introdução

Os serviços de esgotamento sanitário representam um desafio comum para os países da região da América Latina e Caribe. No ano 2012 a região apresentava 79% de cobertura de esgotamento sanitário, sendo que apenas 15% do esgoto sanitário recebia tratamento em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) (Noyola *et al.*, 2012). Estima-se que é necessário um investimento de US \$ 33 mil milhões para atingir uma cobertura de 64% no tratamento do esgoto da América Latina e Caribe, para o ano 2030 (World Water Assessment Programme, 2017).

A coleta e o tratamento de esgoto são fundamentais para evitar a contaminação dos cursos d'água e conseqüentemente promover a saúde pública (Baum *et al.*, 2013; Semeyaga *et al.*, 2015). Desta forma, tais serviços de saneamento são de grande importância para garantir a qualidade de vida de uma população (Orssato *et al.*, 2015).

No Brasil, segundo o diagnóstico dos serviços de água e esgoto do ano base 2016, divulgado de acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e publicado em fevereiro de 2018, o índice de atendimento total com rede coletora de esgotos era de 51.9%, sendo que deste percentual apenas 74.9% era efetivamente tratado. Em relação ao total de esgotos gerados, o índice de tratamento de esgotos médio do país correspondia a um percentual de apenas 44.9%, indicando uma situação preocupante (Brasil, 2018).

Na Costa Rica a situação da coleta e do tratamento de esgotos é ainda mais precária. Em 2015 o percentual de coleta de esgoto doméstico era de 21.4%, sendo que 76.4% da população dispunha o esgoto em fossas sépticas. Da totalidade do esgoto doméstico gerado, apenas o 8.0% era tratado em ETE (Costa Rica, 2016).

Diante da conjuntura apresentada, torna-se primordial a avaliação de serviços de esgotamento sanitário. Compartilhar experiências de países pertencentes a uma mesma região e comparar as condições de ETEs existentes permite uma abordagem conjunta da problemática e favorece a cooperação entre países. Assim, o presente estudo de caso objetiva comparar um total de 11 ETEs do Brasil e da Costa Rica a partir dos dados de monitoramento de parâmetros de qualidade do esgoto bruto e do efluente.

Metodologia

Para comparar as ETEs, foram caracterizadas as concentrações afluentes, efluentes e as eficiências de remoção dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos Suspensos Totais (SST) por meio da estatística descritiva. Posteriormente foram aplicados testes de hipóteses para verificar a existência de diferenças significativas entre o esgoto bruto dos dois países, e entre o desempenho dos sistemas de lodos ativados de aeração prolongada, comum aos dois países. Também foi avaliada a diferença de desempenho das distintas tecnologias de tratamento empregadas nas ETEs do Brasil. Por fim, foi avaliado o percentual de atendimento aos padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pelas legislações ambientais vigentes.

Descrição das estações de tratamento de esgoto avaliadas

As estações de tratamento de esgotos (ETEs) avaliadas neste estudo estão localizadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e na Área Metropolitana da Costa Rica (AMCR). Na Tabela 1 estão apresentadas as características gerais, climatológicas e de cobertura dos serviços de esgotamento sanitário das duas regiões de estudo.

Tabela 1. Características das regiões em que as estações de tratamento de esgoto estão localizadas.

Região	Dados gerais		Climatologia			Cobertura de saneamento ²	
	População ¹ (hab)	Extensão (km ²)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Precipitação anual (mm)	Coleta (%)	Tratamento (%)
RMBH	5.00	9460	17.8	27.2	1602.6	83.3	64.1
AMCR	1.40	4462	18.0	29.0	1691.6	30.0	19.4

¹ Milhões de habitantes; ² Dados referentes ao ano de 2016.

Adaptado de: Agência RMBH (2016), INMET (2010), COPASA (2016), INEC (2011), IMN (2012), Costa Rica (2016)

Na Tabela 2 estão resumidas as características das 11 ETEs avaliadas neste estudo, incluindo a localização, a tecnologia usada no tratamento, a capacidade nominal e a frequência de monitoramento dos parâmetros.

Tabela 2. Principais características das estações de tratamento de esgoto avaliadas.

ETE	Localização	Tecnologia ¹	Capacidade nominal (L.s ⁻¹)	Frequência de monitoramento
1	RMBH	UASB + LA	510	Mensal
2	RMBH	UASB + LA	95	Mensal
3	RMBH	UASB + FBP	35	Mensal
4	RMBH	UASB + FBP	1 800	Mensal
5	RMBH	UASB + FBP	68	Mensal
6	RMBH	LAAP	95	Mensal
7	RMBH	LAAP	21	Mensal
8	AMCR	LAAP	2	Trimestral
9	AMCR	LAAP	4	Trimestral
10	AMCR	LAAP	3	Trimestral
11	AMCR	UASB + LA	6	Trimestral

¹ UASB + LA: Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente seguido por lodos ativados convencional; UASB + FBP: Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente seguido por filtro biológico percolador; LAAP: Lodos ativados de aeração prolongada.

Parâmetros considerados e padrões de lançamento de referência

Os parâmetros de qualidade do esgoto considerados neste estudo foram Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos Suspensos Totais (SST). Estes parâmetros foram selecionados por serem os mais utilizados para o monitoramento da qualidade do esgoto tratado (von Sperling e Chernicharo, 2002) e por estarem regulamentados nos dois países considerados neste estudo, ou seja, por possuírem padrão de lançamento preconizado por legislações específicas.

No caso das ETEs localizadas na RMBH foram considerados os padrões de lançamento estabelecidos pela Deliberação Normativa Conjunta do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) n° 01, de 05 de maio de 2008 – DN COPAM CERH 01/2008, do Estado de Minas Gerais, que dispõe sobre critérios de classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (Minas Gerais, 2008). No caso das ETEs localizadas na Costa Rica, foram considerados os padrões de lançamento estabelecidos pelo Regulamento de lançamento e reuso de águas residuais de 2007 (DE-33601-S-MINAE) para lançamento em corpo d'água superficial (Costa Rica, 2007).

Os padrões de lançamento estabelecidos nas referidas legislações e utilizados neste trabalho estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Padrões de lançamento de referência.

Legislação	DBO	DQO	SST
DN COPAM CERH 01/2008 MG - Brasil	DBO até 60 mg.L ⁻¹ ou tratamento com eficiência de redução de DBO em, no mínimo, 60% e média anual igual ou superior a 70%	DQO até 180 mg.L ⁻¹ ou tratamento com eficiência de redução de DQO em, no mínimo, 55% e média anual igual ou superior a 65%	Sólidos em suspensão totais até 100 mg.L ⁻¹
DE - 33601 – S – MINAE Costa Rica	DBO até 50 mg.L ⁻¹	DQO até 150 mg.L ⁻¹	Sólidos em suspensão totais até 50 mg.L ⁻¹

Adaptado de: Minas Gerais, 2008 e Costa Rica, 2007.

Conforme observado na Tabela 3, a legislação da Costa Rica (DE-33601 - s - Minae) apresenta padrões de lançamento mais restritivos do que a legislação DN COPAM CERH 01/2008 do Estado de Minas Gerais - Brasil. Desta forma, para fins de comparação foram avaliados e discutidos os percentuais de atendimento aos padrões de lançamento considerando os limites estabelecidos nas duas legislações.

Análises estatísticas

Primeiramente, foi calculada a estatística descritiva para os dados brutos de cada parâmetro (DBO, DQO e SST) do esgoto afluente, do esgoto tratado e das eficiências de remoção para cada uma das 11 ETEs, a fim de caracterizá-las. Na estatística descritiva foi calculado o número de observações, os valores mínimo e máximo encontrados, a média, a mediana, o desvio padrão, o coeficiente de variação, os percentis 25 e 75 e o coeficiente de assimetria. Além disso, foi calculado o percentual de *outliers* pelo método exploratório da Amplitude Interquartis (AIQ) (Tukey, 1977 *apud* Naghettini e Pinto, 2007). Todas as ocorrências de *outliers* foram analisadas individualmente para a decisão de sua manutenção ou retirada das análises.

A fim de avaliar a normalidade dos dados, foi aplicado o teste de *Shapiro-Wilk*, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0.05$). Como não foi observada uma distribuição normal dos dados (p -valor < 0.05), foram aplicados testes de hipóteses não paramétricos visando identificar diferenças significativas entre as comparações estabelecidas no presente estudo. Destaca-se que outros estudos também constataram que, no geral, dados de esgotos brutos e tratados não seguem uma distribuição normal (Oliveira e von Sperling, 2008; Oliveira *et al.*, 2012).

Para comparar as concentrações do esgoto bruto do Brasil e da Costa Rica, foi aplicado o teste não paramétrico de *Mann-Whitney*, o qual também foi aplicado para comparar as eficiências de remoção das ETEs de aeração prolongada do Brasil e da Costa Rica. Importante frisar que a comparação entre as eficiências de remoção das ETEs do Brasil e da Costa Rica foi realizada para a tipologia de tratamento lodos ativados de aeração prolongada, por ser a tipologia comum entre os países e com banco de dados representativo.

Já para a comparação entre as três tecnologias de tratamento empregadas no Brasil (UASB + LA; UASB + FBP e LAAP) foi aplicado o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis*, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn (Dunn, 1964), quando identificada diferença significativa no teste de *Kruskal-Wallis*, para identificar quais tecnologias diferiam umas das outras.

Ainda em relação às tecnologias de tratamento das ETEs do Brasil, foram utilizadas tabelas de contingência 3 x 2 para verificar a associação entre o atendimento aos padrões de lançamento de efluentes e a tecnologia empregada, através da aplicação do teste Qui-Quadrado ao nível de significância de 5%. O mesmo teste foi empregado para detectar relação de independência/dependência entre o atendimento ao padrão do Brasil ou da Costa Rica para cada tecnologia de tratamento, para cada parâmetro analisado, por meio da utilização de tabelas de contingência 2x2, ao nível de significância de 5%. O resultado do teste Qui-quadrado, que compara as frequências observadas em cada categoria da tabela de contingência com as frequências esperadas, foi utilizado para determinar se os desvios entre os percentuais de atendimento são significativos, concluindo assim que existe independência entre os métodos linha-coluna de classificação. Na Figura 1 observa-se o modelo das tabelas de contingência usadas neste estudo de caso.

Cabe ressaltar, que todos os testes estatísticos foram feitos usando o software estatístico *Statistica 10* (Statsoft, 2011), considerando o nível de significância (α) de 5%.

Modelo de tabela de contingência 3 x 2			Modelo de tabela de contingência 2 x 2			
Tecnologia	Atendimento ao padrão BR		País	Atendimento ao padrão		Total
	Sim	Não		Sim	Não	
UASB + LA	Observações		Brasil	Observações		
UASB + FBP			Costa Rica			
LAAE			Total			
Total						
<i>Associação entre o atendimento aos padrões de lançamento de efluentes do Brasil e a tecnologia de tratamento empregada, por parâmetro.</i>			<i>Associação entre o atendimento ao padrão do Brasil ou da Costa Rica e a tecnologia de tratamento empregada, por parâmetro.</i>			

Figura 1. Modelo das tabelas de contingência usadas para a análise dos dados.

Resultados e Discussão

Dados de monitoramento das estações de tratamento

Na Tabela 4 é apresentada a estatística descritiva com as principais medidas de tendência central e com o coeficiente de assimetria para a vazão de esgoto tratado e para as concentrações afluentes, efluentes e eficiências de remoção dos parâmetros (DBO, DQO e SST) para cada uma das ETEs.

Tabela 4. Estatística descritiva resumida dos parâmetros vazão, DBO, DQO e SST das ETEs avaliadas.

Estatística	ETE												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Número de observações (adimensional)	60	59	59	60	60	60	59	32	32	27	36		
Vazão	Média (L.s ⁻¹)	361.0	22.4	29.9	1644	61.0	50.6	29.1	1.9	2.2	2.3	3.4	
	Mediana (L.s ⁻¹)	358.0	22.5	33.3	1627	64.0	47.8	30.6	1.6	1.9	2.4	3.4	
	C.A.	0.53	0.01	-0.68	0.25	-0.66	0.75	-1.75	4.12	0.44	-0.28	-1.30	
DBO	Média (mg.L ⁻¹)	243	317	292	261	293	327	307	318	241	285	270	
	Mediana (mg.L ⁻¹)	246	326	285	257	297	335	302	322	228	274	267	
	C.A.	-0.11	-0.09	0.61	0.35	-0.59	1.08	2.05	0.03	1.24	0.77	0.39	
Afluente	DQO	Média (mg.L ⁻¹)	572	924	652	610	650	730	652	665	444	545	506
	Mediana (mg.L ⁻¹)	555	862	656	592	683	713	642	666	441	499	474	
	C.A.	1.46	2.90	0.64	0.63	-0.59	1.62	1.42	0.24	1.37	1.00	2.66	
SST	Média (mg.L ⁻¹)	302	549	271	299	251	320	256	215	184	216	241	
	Mediana (mg.L ⁻¹)	293	463	260	271	256	311	240	214	179	211	213	
	C.A.	0.51	3.15	5.20	1.49	-0.17	0.67	2.71	0.58	0.37	0.57	2.23	
Efluente	DBO	Média (mg.L ⁻¹)	11	15	32	33	39	22	14	45	21	41	-
	Mediana (mg.L ⁻¹)	10	13	26	31	36	15	12	40	19	33	-	
	C.A.	1.58	2.75	1.03	3.59	0.70	1.33	2.49	4.02	1.66	1.12	-	
DQO	Média (mg.L ⁻¹)	40	55	119	107	138	77	46	101	53	92	-	
	Mediana (mg.L ⁻¹)	38	49	100	98	131	73	42	86	40	69	-	
	C.A.	1.09	1.54	0.80	1.39	0.52	1.76	1.50	3.50	2.53	1.58	-	
SST	Média (mg.L ⁻¹)	15	18	53	37	46	31	19	52	21	52	-	
	Mediana (mg.L ⁻¹)	12	14	43	34	37	28	12	41	21	34	-	
	C.A.	1.42	3.23	1.71	2.24	1.23	1.08	4.17	1.99	0.78	2.36	-	
DBO	Média (%)	95	94	88	88	86	93	95	85	91	85	-	
	Mediana (%)	96	96	91	88	86	95	96	87	92	87	-	
	C.A.	-1.22	-2.39	-1.90	-2.19	-0.14	-1.29	-2.41	-3.04	-1.97	-1.14	-	
Eficiência de remoção	DQO	Média (%)	93	92	80	83	78	89	93	84	88	81	-
	Mediana (%)	93	94	83	83	79	91	93	87	90	87	-	
	C.A.	-1.03	-4.40	-2.51	-0.86	-0.04	-1.27	-1.28	-2.21	-2.52	-1.63	-	
SST	Média (%)	95	94	77	88	82	89	92	74	87	76	-	
	Mediana (%)	96	97	81	89	83	92	95	81	89	83	-	
	C.A.	-0.94	-2.56	-2.17	-2.04	-1.01	-1.17	-2.89	-2.02	-1.33	-1.95	-	

C.A: Coeficiente de assimetria.

Observa-se que a maioria dos dados apresentou um coeficiente de assimetria distante de zero, o que sugere que os dados não seguem uma distribuição normal, conforme comprovado pelo teste de *Shapiro-Wilk* (p -valor < 0.05). A maioria dos dados de concentrações afluentes e efluentes apresentou distribuição assimétrica à direita ($CA > 0$). Já para os valores de eficiência de remoção, observa-se que para todos os parâmetros o coeficiente de assimetria foi negativo ($CA < 0$), indicando que os dados de eficiência de remoção apresentam distribuição assimétrica à esquerda, com poucas observações de valores baixos de eficiência de remoção.

Após a análise da estatística descritiva, os dados foram agrupados e analisados segundo os critérios de interesse apresentados nos itens a seguir. Assim, as ETEs foram agrupadas por país com o objetivo de identificar diferenças entre as ETEs do Brasil e da Costa Rica e; também foram consideradas apenas as ETEs do Brasil para comparar as diferentes tecnologias de tratamento.

Comparação do esgoto bruto das ETEs do Brasil e da Costa Rica

Para a comparação do esgoto bruto, as ETEs foram agrupadas por país, objetivando portanto, identificar diferenças entre as concentrações afluentes de DBO, DQO e SST das ETEs do Brasil e da Costa Rica. Na Figura 2 são apresentados os gráficos *box-plot* das concentrações afluentes de DBO, DQO e SST de cada país, assim como a faixa típica relatada na literatura para cada parâmetro.

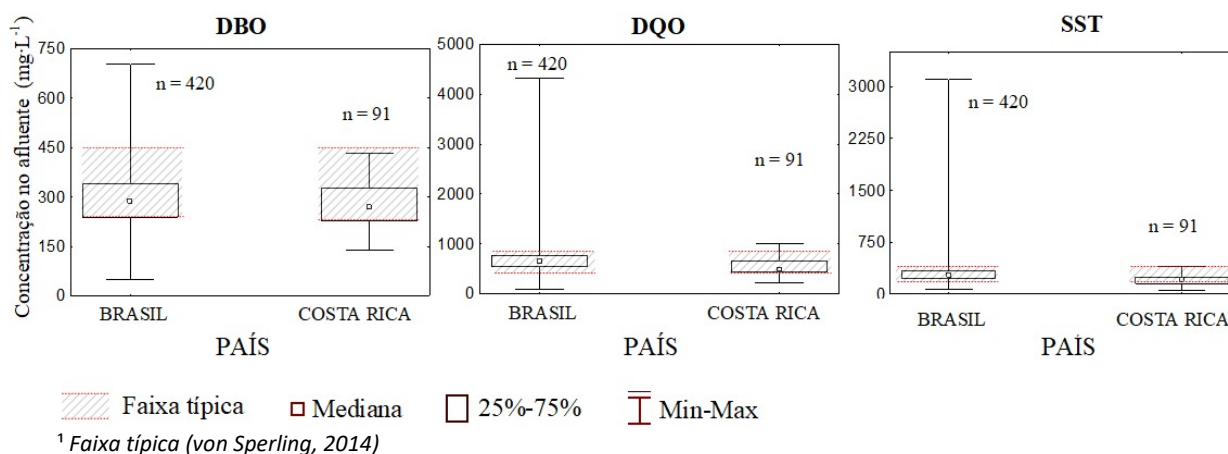


Figura 2. Concentrações de DBO, DQO e SST afluentes às ETEs do Brasil e da Costa Rica.

Na Figura 2 pode-se observar que o intervalo interquartil dos dados de concentrações afluentes de DBO, DQO e SST estão dentro das faixas típicas de concentrações para esgoto sanitário bruto, segundo von Sperling (2014). Portanto todas as medianas das concentrações afluentes de DBO, DQO e SST das ETEs avaliadas também se encontram de acordo com as faixas típicas indicadas pela literatura brasileira.

Ao aplicar o teste de *Mann-Whitney* para verificar se as concentrações afluentes de DBO, DQO e SST diferem significativamente entre os países, verificou-se que a concentração mediana de DBO do esgoto bruto não difere significativamente entre os países, para um nível de significância de 5% (p -valor = 0.213). No entanto, para as concentrações afluentes medianas de DQO e SST o teste evidenciou diferença significativa (p -valor = 0.000), ao nível de significância de 5%, sendo significativamente menores as concentrações medianas de DQO e SST no esgoto bruto da Costa Rica.

É importante ressaltar que diversos fatores podem ser responsáveis pela variabilidade do esgoto bruto, e conseqüentemente pelas diferenças significativas encontradas para DQO e SST do esgoto bruto dos países estudados. Segundo von Sperling (2014), Oliveira e von Sperling (2005), Oliveira *et al.* (2005) e von Sperling *et al.* (2006), a concentração do esgoto bruto pode variar de acordo com a contribuição per capita do poluente, o consumo per capita de água, a presença de despejos industriais, entre outros fatores específicos da localidade.

Assim, para o parâmetro DQO, a diferença entre os dois países pode estar relacionada à descarga de efluentes industriais com matéria orgânica não biodegradável que provoca um aumento na DQO, mas não na DBO. Existe a possibilidade de que as ETEs da Costa Rica não recebam despejos industriais, tratando unicamente esgoto sanitário em uma zona residencial pequena. Isto se confirma ao observar (Figura 2) que a mediana de DQO e DBO das ETEs do Brasil foi de 651 e 286 mg.L^{-1} respectivamente, enquanto que para as ETEs da Costa Rica foram de 491 e 282 mg.L^{-1} . Segundo Metcalf e Eddy (2014) a descarga de efluentes industriais em redes de esgotamento é de difícil predição e pode apresentar um padrão variável durante o dia ou durante o ano, o que poderia explicar alguns dos valores extremos encontrados para as ETEs do Brasil.

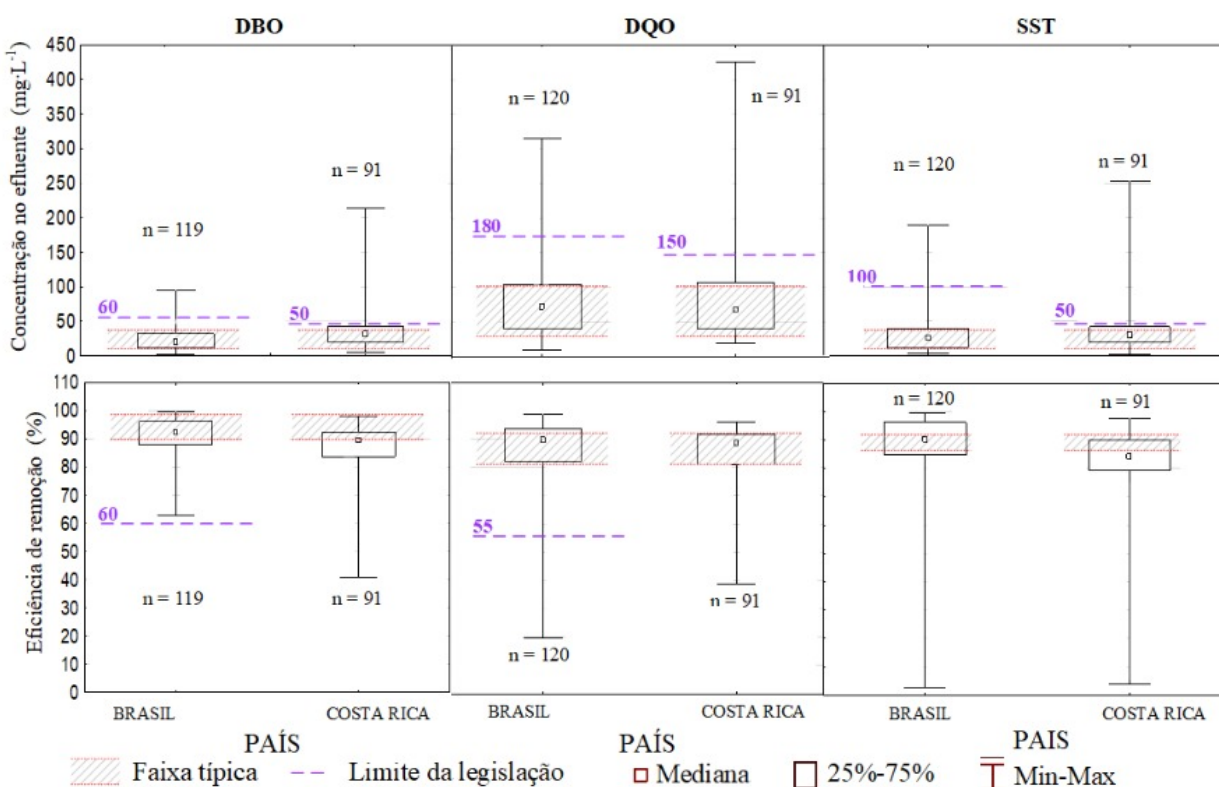
Em relação às diferenças estatísticas encontradas na concentração de SST do esgoto bruto nos dois países avaliados, as ETEs do Brasil apresentaram uma mediana de 272 mg.L^{-1} enquanto a concentração mediana desse parâmetro para as ETEs da Costa Rica foi de 207 mg.L^{-1} , com valores máximos menores para o segundo país (Figura 2). A descarga de efluentes industriais nas ETEs brasileiras poderia também explicar parte das diferenças encontradas. No entanto, outro possível fator seria a entrada de água pluvial durante a época chuvosa por meio de conexões clandestinas, contribuindo para o arraste de sólidos suspensos para o sistema durante eventos de chuva. Segundo Metcalf e Eddy (2014) esse aporte de vazão pode variar entre 0.2 a 28 $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$, com valores em caso de eventos extremos de até 500 $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$. A água pluvial enviada para o sistema de esgotamento sanitário, principalmente no começo da estação chuvosa, pode apresentar elevada concentração de sólidos suspensos, com cargas variando entre 0.03 a 18.4 $\text{kg}.\text{ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$, segundo Deebo e Reese (2013).

Dessa forma, um estudo mais aprofundado para os tipos de descargas realizadas nas ETEs brasileiras, particularmente para os efluentes industriais e para a contribuição de água pluvial,

permitiria uma melhor compreensão das diferenças encontradas entre as concentrações do esgoto bruto das ETEs dos dois países.

Comparação das eficiências de remoção das ETEs do Brasil e da Costa Rica para os sistemas de lodos ativados de aeração prolongada

Na Figura 3 são apresentados os gráficos *box-plot* das concentrações efluente e das eficiências de remoção dos parâmetros avaliados para os dois grupos em comparação (ETEs LAAP do Brasil e ETEs LAAP da Costa Rica).



¹ Faixa típica (von Sperling, 2014); ² Limite da legislação (Minas Gerais: DN COPAM CERH 01/2008 e Costa Rica: DE - 33601 - s - Minae Costa Rica)

Figura 3. Concentrações efluente e eficiências de remoção de DBO, DQO e SST considerando dois grupos: ETEs de LAAP do Brasil e ETEs de LAAP da Costa Rica.

A análise dos gráficos *box-plot* apresentados na Figura 3 e dos resultados do teste de *Mann Whitney* permitem identificar que as eficiências medianas de remoção de todos os parâmetros são significativamente superiores nas ETEs de aeração prolongada do Brasil em relação às ETEs da Costa Rica (p -valor < 0.05), para um nível de significância de 5%.

A partir da Figura 3, também é possível observar que, para os dois países a maioria das concentrações efluentes para os três parâmetros (mais de 75% das observações) encontra-se abaixo das concentrações limites estabelecidas nos padrões de lançamento das legislações específicas para as duas localidades. A maioria das concentrações efluentes para todos os parâmetros nos dois países também estão de acordo com as faixas típicas estabelecidas na literatura técnica (von Sperling, 2014).

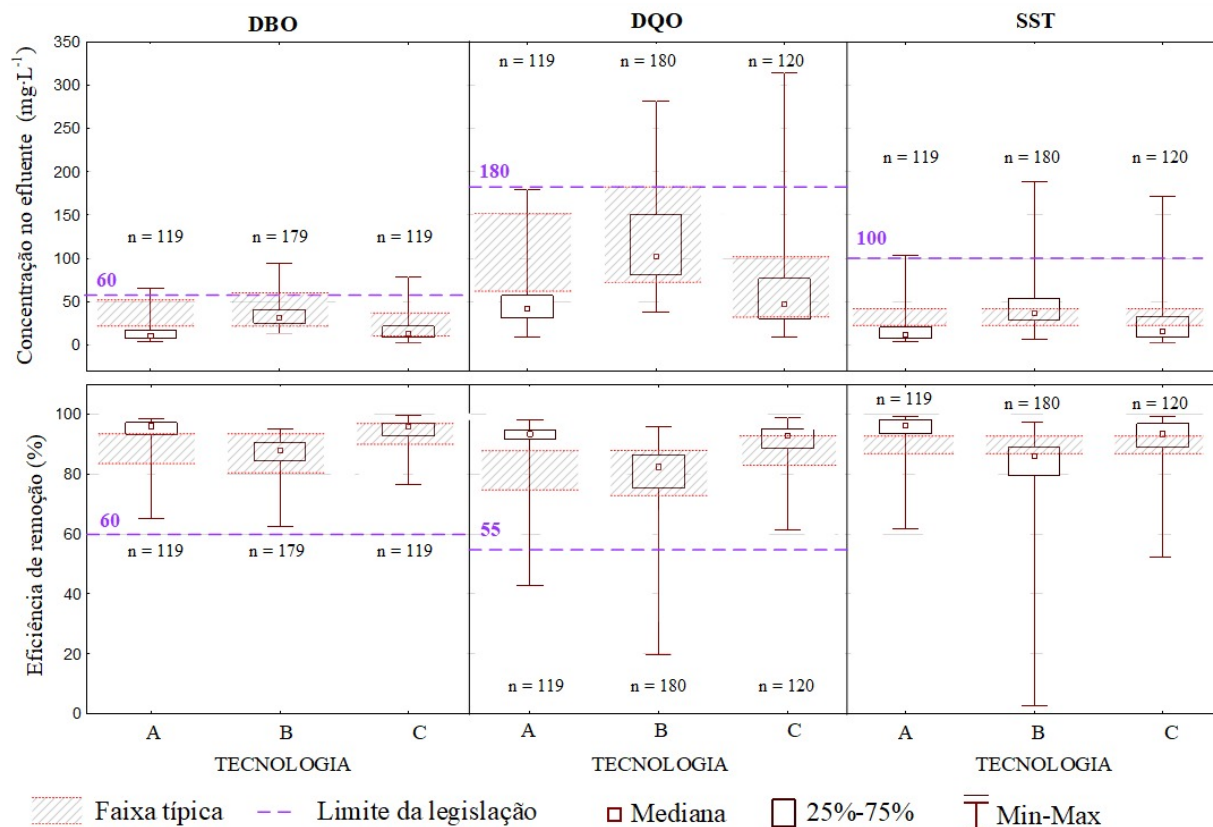
Esta tendência é similar para o caso da eficiência de remoção destes poluentes nas ETEs do Brasil. Nas ETEs de LAAP do Brasil a maioria das eficiências de remoção de todos os parâmetros ficaram acima do valor mínimo definido no padrão de lançamento estabelecido na DN COPAM CERH 01/2008. Além disso, a maioria das observações para as eficiências de remoção de todos os parâmetros nas ETEs brasileiras também ficaram de acordo com a faixa típica recomendada na literatura (von Sperling, 2014). No entanto, para as ETEs da Costa Rica a maioria dos dados de eficiência de remoção de DBO e SST estiveram abaixo da faixa típica da literatura.

Comparação das eficiências de remoção dos parâmetros e do atendimento ao padrão de lançamento por tecnologia de tratamento das ETEs do Brasil

Nesta análise foram consideradas apenas as ETEs do Brasil, uma vez que as ETEs da Costa Rica (todas de LAAP) mostraram comportamento diferente em relação às ETEs brasileiras, conforme discutido nos resultados anteriores.

Na Figura 4 são apresentados os gráficos *box-plot* das concentrações efluentes e das eficiências de remoção para os parâmetros avaliados, segundo a tecnologia de tratamento das ETEs do Brasil. Também é apresentada a faixa típica indicada na literatura de concentrações efluentes e de eficiências de remoção dos poluentes considerados, para cada tecnologia de tratamento, assim como os limites para as concentrações efluentes e eficiências de remoção estabelecidos na DN COPAM CERH 01/2008.

A partir dos resultados apresentados é possível notar um desempenho superior dos sistemas com lodos ativados (nas versões de UASB + LA e de LAAP) sobre o sistema de UASB + FP. Para a eficiência de remoção dos poluentes (DBO, DQO e SST), as tecnologias de tratamento que empregam lodos ativados apresentaram eficiência de remoção significativamente superior para todos os parâmetros em relação à tecnologia UASB + FBP (p-valor do teste de *Kruskal-Wallis* e de comparações múltiplas = 0.000), para um nível de significância de 5%. Ao comparar os sistemas de lodos ativados entre si, observa-se um melhor desempenho para a tecnologia UASB + LA em relação ao sistema de LAAP para o caso da eficiência de remoção de SST (significativamente superior no sistema UASB + LA, p-valor do teste de *Kruskal-Wallis* e de comparações múltiplas < 0.05).



¹ Faixa típica (von Sperling, 2014); ² Limite da legislação (Minas Gerais: DN COPAM CERH 01/2008);

³A: UASB + LA, B: UASB + FBP, C: LAAP

Figura 4. Concentrações efluentes e eficiências de remoção dos poluentes segundo a tecnologia de tratamento empregada no Brasil.

O intervalo interquartil dos dados de concentração dos parâmetros DBO e DQO no efluente final e de eficiência de remoção destes parâmetros encontram-se dentro da faixa típica para a tecnologia UASB + FBP, segundo a literatura técnica (von Sperling, 2014). No entanto, para esta tecnologia, cerca de 25% dos dados de concentração efluente de SST e de 75% dos dados de eficiência de remoção de SST ficaram fora da faixa indicada na literatura (Figura 4). Essa condição pode estar relacionada à problemas na operação do decantador secundário (por exemplo, descarte inadequado do lodo) que ocasionaria o arraste de sólidos no efluente final, como reportado em Almeida *et al.* (2018) para essa tecnologia.

Em relação à tecnologia LAAP, observa-se na Figura 4 que a maioria dos dados de concentração efluente dos parâmetros ficaram dentro da faixa relatada por von Sperling (2014), com exceção do parâmetro SST que apresentou concentrações inferiores ao indicado. No geral, as eficiências de remoção dos três parâmetros para a tecnologia LAAP também estão de acordo com a faixa relatada, apresentando alguns valores superiores, indicando o bom desempenho das ETEs.

Por fim, para a tecnologia UASB + LA mais de 75% dos dados de concentração efluente de todos os parâmetros encontram-se abaixo da faixa típica da literatura técnica (von Sperling, 2014). Em relação às eficiências de remoção dos parâmetros, esta tecnologia também mostrou excelente desempenho, uma vez que mais de 75% dos dados de eficiência de remoção dos três parâmetros estiveram acima da faixa também relatada pela literatura aqui mencionada.

Segundo von Sperling (2014), o processo LAAP normalmente apresenta um melhor desempenho do que o sistema UASB + LA, o que não foi observado neste estudo. Além disso, a faixa de desempenho esperada do sistema de UASB + LA é muito próxima do sistema de UASB + FBP, mas neste estudo o sistema UASB + FBP apresentou, em geral, desempenho estatisticamente inferior às tecnologias de lodos ativados.

Sobre esse ponto, uma possível explicação para as diferenças encontradas neste estudo é a capacidade ociosa para as diferentes tecnologias. Ao comparar os valores de vazão média das ETEs (Tabela 4) com as respectivas capacidades nominais (Tabela 2), é possível perceber que as ETEs com sistema UASB + LA apresentam uma vazão média igual a 383.4 L.s^{-1} correspondendo a 63% da capacidade nominal, enquanto os sistemas UASB + FBP apresentam vazão média de 1903 L.s^{-1} e 91% dessa capacidade e as ETEs LAAP reportam vazão média de 116 L.s^{-1} e 69% da capacidade nominal. Além disso, nota-se que uma das estações de LAAP (ETE 7) operou em sobrecarga (39% acima da capacidade), o que pode ter prejudicado a qualidade do efluente tratado. Similarmente, os sistemas UASB + FBP operaram em valores bem próximos à capacidade nominal, enquanto os sistemas UASB + LA mantiveram uma margem de 71% e 24% da capacidade do sistema, permitindo operar em condições mais favoráveis para a produção de efluentes com maior qualidade.

Na Figura 5 são apresentados os percentuais de atendimento aos padrões de lançamento estabelecidos na DN COPAM CERH 01/2008 de Minas Gerais e no DE-33601-s-minae da Costa Rica para os parâmetros DBO, DQO e SST segundo a tecnologia de tratamento, para as ETEs do Brasil, para fins de comparação. Neste caso, foi considerado apenas o limite estabelecido para a concentração efluente para o caso da DBO e DQO, desconsiderando a condição de eficiência de remoção destes parâmetros.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados do teste Qui-quadrado para verificação da relação de dependência/independência do atendimento aos padrões de lançamento em função das tecnologias de tratamento empregadas nas ETEs brasileiras. Esta tabela resume o resultado das tabelas de contingência 3x2 (primeira linha) e das tabelas 2x2 (linhas seguintes), conforme explicado na metodologia.

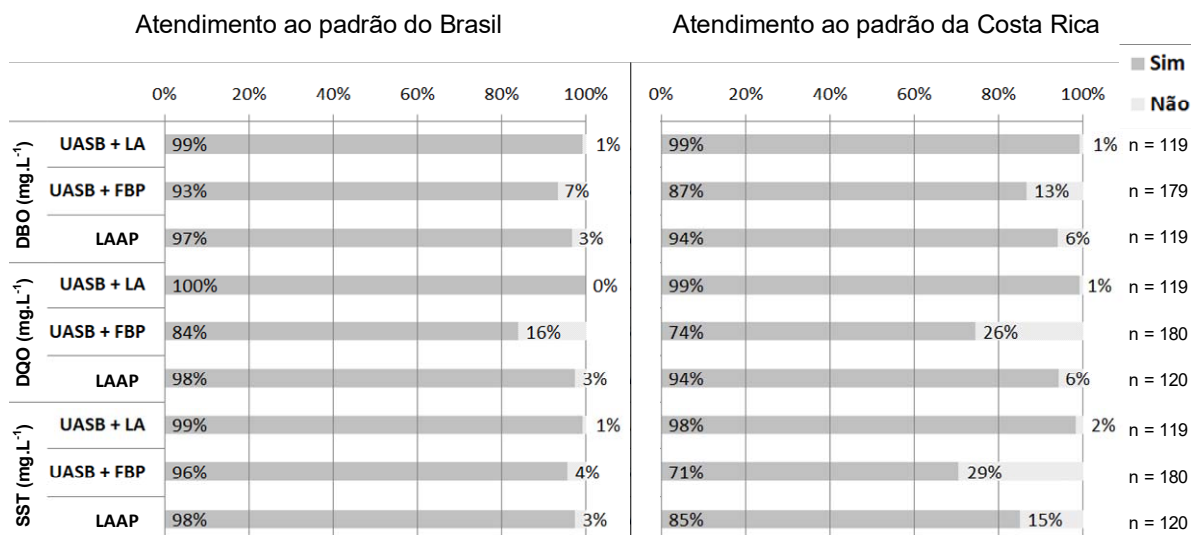


Figura 5. Percentual de atendimento aos limites de concentrações estabelecidos nos padrões de lançamento do Brasil e da Costa Rica, respectivamente, para os poluentes avaliados segundo a tecnologia de tratamento e considerando somente as ETEs instaladas no Brasil.

Tabela 5. Comparação estatística das tecnologias de tratamento empregadas nas ETEs do Brasil em relação ao atendimento aos padrões de lançamento.

	Parâmetro avaliado		
	DBO	DQO	SST
Dependência entre o atendimento ao limite (DN COPAM CERH 01/2008) e as tecnologias	Existe dependência estatística significativa. (p = 0.039)	Existe dependência estatística significativa. (p = 0.000)	Não existe dependência estatística significativa. (p = 0.180)
Dependência entre o atendimento ao limite e as tecnologias considerando os padrões do Brasil ou da Costa Rica	UASB + LA	Não existe dependência estatística significativa. (p = 1.000)	Não existe dependência estatística significativa. (p = 0.561)
	UASB + FBP	Existe dependência estatística significativa. (p = 0.035)	Não existe dependência estatística significativa. (p = 1.000)
	LAAP	Não existe dependência estatística significativa. (p = 0.354)	Existe dependência estatística significativa. (p = 0.001)

Entre parênteses: p-valor. <: significativamente inferior, >: significativamente superior; = não há diferença significativa.

No que diz respeito ao atendimento ao padrão de lançamento, é importante ressaltar que os três processos comparados neste estudo atenderam a legislação brasileira em 100% dos casos para os parâmetros de DBO e DQO (considerando o percentual mínimo de remoção desses poluentes de 60% e 55%, respectivamente). No entanto, comparando exclusivamente as concentrações efluentes com os limites de lançamento, é possível observar um atendimento da regulamentação superior a 83% para todos os parâmetros, em todos os casos, sendo esse valor superior a 96% para as tecnologias de lodos ativados avaliadas (Figura 5). O sistema UASB + FBP apresentou um pior desempenho em função dos valores de DQO efluente elevados.

Os resultados do teste Qui-quadrado para independência das tecnologias *versus* o atendimento ao padrão estabelecido na DN COPAM CERH 01/2008 mostraram que existe uma dependência estatisticamente significativa entre a tecnologia empregada e o atendimento aos padrões dos parâmetros DBO e DQO, e independência no caso dos SST (Tabela 5). Isto é confirmado quando se observa, na Figura 4, que os valores típicos para a concentração de SST no efluente final e a eficiência de remoção deste parâmetro para as três tecnologias são os mesmos.

Sendo assim, as diferenças encontradas no atendimento ao padrão de lançamento para o parâmetro SST não são dependentes da tecnologia de tratamento empregada. Outras possibilidades, como as condições construtivas e operacionais dos decantadores secundários dos sistemas, deveriam ser avaliadas para a obtenção de justificativas mais concretas.

Por fim, cabe destacar que para as ETEs com tecnologia UASB + LA avaliadas neste estudo, o atendimento aos limites estabelecidos nos padrões do Brasil ou da Costa Rica independe da tecnologia, ao nível de significância de 5% (Tabela 5). Portanto, as ETEs UASB + LA estudadas atenderiam os limites de lançamento da Costa Rica (mais restritivos do que os limites legais do Brasil, segundo a Tabela 3) na mesma proporção que atendem os limites do Brasil. Tal fato pode estar relacionado a maior folga desses sistemas que operam com vazões médias muito inferiores à capacidade nominal das ETEs, como foi discutido anteriormente.

Para a tecnologia UASB + FBP houve relação de dependência entre o atendimento ao padrão considerado (Brasil ou Costa Rica) para os parâmetros de DBO e SST. Neste caso o atendimento ao padrão da Costa Rica seria significativamente menor em relação ao atendimento ao padrão brasileiro. Para a tecnologia LAAP somente houve relação de dependência para atendimento ao padrão estabelecido para SST. Sendo assim, para o parâmetro DQO, as três tecnologias avaliadas atenderiam o padrão da Costa Rica (mais restritivo) na mesma proporção que se atende o padrão brasileiro. Isto sugere que poderiam ser estabelecidos limites de lançamento mais restritivos no Brasil, que permitam uma proteção ambiental maior, considerando que algumas tecnologias existentes e operadas no Brasil já conseguem atender estes limites.

Conclusões

Os resultados deste estudo de caso apontaram diferenças significativas entre o esgoto bruto do Brasil e da Costa Rica (para os parâmetros DQO e SST), assim como entre as eficiências de remoção dos parâmetros para as ETEs de LAAP dos dois países. As ETEs de LAAP brasileiras apresentaram, no geral, maiores eficiências de remoção em relação às ETEs de LAAP da Costa Rica. Portanto, considerando esta tipologia de tratamento, as estações de tratamento do Brasil apresentaram melhor desempenho.

Em relação as três tecnologias de tratamento empregadas nas ETEs brasileiras avaliadas neste estudo, foi possível concluir que as ETEs de lodos ativados apresentaram no geral melhor desempenho do que as ETEs que empregam a tecnologia UASB + FBP.

As três tecnologias de tratamento das ETEs do Brasil (UASB + LA; UASB + FBP e LAAP) atenderam ao padrão de lançamento brasileiro em 100% dos casos para os parâmetros de DBO e DQO e em mais de 95% dos casos para SST.

Por fim, considerando os padrões de lançamento estabelecidos pela regulamentação da Costa Rica, mais restritiva do que a brasileira, pode-se concluir que as ETEs do Brasil de lodos ativados analisadas neste estudo de caso, no geral, poderiam atender estes padrões mais restritivos, garantindo assim, maior proteção ambiental. Enquanto que as ETEs UASB + FBP nas condições avaliadas ainda não estão aptas para atenderem padrões mais restritivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos prestadores de serviço por terem disponibilizado os dados e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes - Código 001) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo apoio e cooperação durante a pesquisa. Os autores Viviana Solano e Erick Centeno agradecem ao Programa Estudantes - Convênio de Pós-graduação - PEC-PG, da CAPES/CnPq/MRE-Brasil e à Universidad de Costa Rica pelo apoio financeiro.

Referências bibliográficas

- Agência RMBH, Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte (2016) *Color Metropolitano*. Acesso em 23 de maio de 2018, disponível em: <http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/institucional/rmbh-e-color-metropolitano/>
- Almeida, P. G. S., Ribeiro, T. B., Silva, B. S., Azevedo, L. S., Chernicharo, C. A. L. (2018) Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário. Parte 6: Qualidade do efluente. *Revista DAE* 66(214), 90–108. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2018.043>
- Baum, R., Luh, J., Bartram, J. (2013) Sanitation: A Global Estimate of Sewerage Connections without Treatment and the Resulting Impact on MDG Progress, *Environmental Science & Technology* 47(4), 1994–2000. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/es304284f>

- COPASA, Companhia de Saneamento de Minas Gerais (2016) *Portal de informações*. Acesso em 23 de maio de 2018, disponível em: <http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet>
- Costa Rica (2007) *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. Ministerio de Salud. Nº 33601-MINAE-S. Acesso em 21 de junho de 2018, disponível em: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=59524&nValor3=83250&strTipM=TC
- Costa Rica (2016) *Estado de la nación 2016: recurso hídrico y saneamiento*. Ministerio de Salud. Acesso em 12 de junho de 2018, disponível em: https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/023/Ambientales/Herrera_J_2017a.pdf
- Debo, T., Reese, A. (2003) *Municipal Stormwater Management*, 2ed., Lewis Publisher, Florida
- Dunn, O. J. (1964) Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, **6**(3), 241-52.
- IMN, Instituto Meteorológico Nacional (2012) *Climatología aeronáutica 2000-2010 – 2012 San José*. Acesso em 12 de junho de 2018, disponível em: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/16505/Climatolog%C3%ADa+del+Aeropuerto+Tob%C3%ADas+Bola%C3%B1os+%28Pavas%29/58c11590-21ce-4646-a0d9-cbfc8c40ccd2>
- INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censo (2011) *X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011 – 2011*. Acesso em: 12 de junho de 2018, disponível em: <http://www.inec.go.cr/censos/censos-2011>
- INMET, Instituto Nacional de Meteorología (2010) *Estações e dados – 2010*. Acesso em 12 de junho de 2018, disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>
- Metcalf & Eddy (2014) *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*, 5th., McGrawHill, New York
- Minas Gerais (2008) *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Diário do Executivo, Minas Gerais. Sistema Integrado de Informação Ambiental. Conselho Estadual de Política Ambiental. Acesso em 04 de junho de 2018, disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>
- Naghattini, M., Pinto, E. J. A. (2007) *Hidrologia Estatística*. CPRM, Belo Horizonte, 552 pp.
- Noyola, A., Rivera, A. P., Sagastume, J. M. M.; Guereca, L. P., Padilla, F. H. (2012) Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America, *Clean – Soil, Air, Water*, **40** (9), 926–932. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/clen.201100707>
- Oliveira, S. M. A. C., von Sperling, M. (2005) Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1 – Análise de desempenho, *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **10**(4), 2005, 347-357. doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000400011>
- Oliveira, S. M. A. C., Souki, M. I. O., von Sperling, M. (2005) Características dos esgotos afluentes a 206 estações de tratamento de esgotos em operação no país, *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental 23*, Campo Grande/MS, Brasil.
- Oliveira, S. C., von Sperling, M. (2008) Reliability analysis of wastewater treatment plants, *Water Research*, **42** (4-5), 1182-1194. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2007.09.001>
- Oliveira, S. M. A. C., Souki, M. I. O., von Sperling, M. (2012) Lognormal behaviour of untreated and treated wastewater constituents, *Water Science and Technology*, **65** (4), 596-603. doi: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2012.899>
- Orsatto, F., Boas, M. V., Eyng, E. (2015) Gráfico de controle da média móvel exponencialmente ponderada: aplicação na operação e monitoramento de uma estação de tratamento de esgoto, *Revista Eng Sanit Ambient*. **20**(4), 543-550. doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040093742>
- Semiyaga, S. (2015) Conservation and Recycling Decentralized options for fecal sludge management in urban slum areas of Sub-Saharan Africa : A review of technologies, practices and end-uses. *Resources, Conservation & Recycling*, **104**,109–119. doi: <http://dx.doi.org/> <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.001>
- Statsoft (2011) *Statística 10.0. StatSoft Inc*. Acesso em 04 de junho de 2018, disponível em: <http://www.statsoft.com/2011>.

- Tukey, J. W. (1977) *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts apud Naghettini, M., Pinto, E. J. A. (2007) *Hidrologia Estatística*. CPRM, Belo Horizonte, 552 pp.
- Von Sperling, M., Chernicharo, C. A. L. (2002) Urban wastewater treatment technologies and the implementation of discharge standards in developing countries, *Urban Water*, **4**(1), 105–114. doi: [http://dx.doi.org/110.1016/s1462-0758\(01\)00066-8](http://dx.doi.org/110.1016/s1462-0758(01)00066-8)
- Von Sperling, M., Oliveira, S. M. A. C., Souky, I. O. (2006) Wastewater characteristics in a developing country, based on a large survey (166 treatment plants), *5th World Congresso f IWA – International Water Association*. Pequim, China.
- Von Sperling, M. (2014) *Introdução a qualidade da água e ao tratamento de esgotos*, 4 ed., Editorial UFMG, Belo Horizonte, 472 pp.
- World Water Assesment Programme (2017) *The United Nations World Water Development Report 2017 The Untapped Resource Wastewater World Water Assessment Programme United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*. Acesso em 04 de junho de 2018, disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002475/247553e.pdf>