

AValiação Ambiental e ECONÔMICA DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM WETLANDS CONSTRUÍDOS

*Juliana Dalia Resende¹
Sergio Almeida Pacca²
Marcelo Antunes Nolasco³*

RESUMO

Sistemas de tratamento de esgoto, apesar de possibilitarem a eliminação ou redução de poluentes e substâncias indesejadas presentes nos efluentes, também ocasionam impactos ambientais. Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para avaliar o desempenho ambiental de sistemas de tratamento de esgoto é a avaliação do ciclo de vida (ACV), que pode ser complementada pela avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV), que permite calcular o custo do ciclo de vida de um projeto. No presente estudo, a ACV e a ACCV foram utilizadas com o objetivo de analisar os potenciais impactos ambientais e custos de duas configurações de sistemas-piloto de tratamento de esgoto descentralizados e de pequena escala envolvendo *wetlands* construídos (WC) com e sem aeração. A modelagem dos sistemas e os cálculos envolvidos na avaliação dos impactos do

¹ Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade – Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: julianadr@hotmail.com.

² Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade – Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: spacca@usp.br.

³ Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade – Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: mnolasco@usp.br.

ciclo de vida foram realizados por meio do programa openLCA (Versão 1.6.3). O método de avaliação de impactos do ciclo de vida ReCiPe foi aplicado para a avaliação das categorias de impacto ambiental: acidificação terrestre, mudança climática, eutrofização de água doce, formação de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana. Nas análises envolvendo um WC aerado, o uso de energia elétrica afetou significativamente o potencial de causar impactos ambientais para as categorias de ecotoxicidade, toxicidade humana e acidificação terrestre, representando, respectivamente, 95%, 94% e 90% desses potenciais impactos. O custo do ciclo de vida por m³ de esgoto tratado desse sistema mostrou-se quase metade do valor encontrado para o sistema sem aeração.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida, Análise econômica, *wetlands* construídos

EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT AND COSTS OF WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS WITH CONSTRUCTED WETLANDS

Abstract

Although wastewater treatment systems, allow for the elimination or reduction of pollutants and unwanted substances in wastewater, they also cause environmental impacts. One tool that can evaluate the environmental performance of wastewater treatment systems is Life Cycle Assessment (LCA), which can be complemented by Life Cycle Cost Analysis (LCCA), which calculates the total cost of a project over its entire life cycle. In the present study, the LCA and LCCA were used to analyze the potential environmental impacts and costs of two wastewater treatment pilot plant configurations involving constructed wetlands (CW) with and without aeration. The modeling of the systems and the calculations involved in the assessment of the life cycle impacts were performed using the openLCA v. 1.6.3 software. The impact assessment method used for the impact categories of terrestrial acidification, climate change, freshwater aquatic eutrophication, formation of photochemical oxidants, freshwater ecotoxicity and human toxicity was ReCiPe. In the analyzes involving an aerated CW, the use of electricity significantly affected the potential of causing environmental impacts for the categories of ecotoxicity, human toxicity and terrestrial acidification, representing, respectively, 95%, 94% and 90% of these potential impacts. The life cycle cost per m³ of treated wastewater from this system was almost half of the value found for the system without aeration.

Keywords: Life cycle assessment, Economic analysis, Constructed wetlands

1.1 INTRODUÇÃO

As várzeas naturais são áreas inundadas ou saturadas por água que dão suporte a plantas adaptadas a essas condições. Como exemplos desses tipos de ecossistemas estão os pântanos e brejos. Já os termos várzeas construídas, banhados artificiais, alagados artificiais ou *wetlands* construídos (WC) são denominações que podem ser utilizadas para designar processos de tratamento de águas residuárias que consistem em lagoas ou canais rasos, que abrigam plantas aquáticas e que utilizam mecanismos físicos, químicos e biológicos para tratar águas residuárias (VON SPERLING, 2005). Esses sistemas são projetados para imitar os sistemas de várzeas naturais e utilizam plantas que crescem em áreas úmidas, substratos e microrganismos associados para remover os contaminantes das águas residuais (VYMAZAL, 2011; SAEED; SUN, 2012).

Diferentes configurações de sistemas envolvendo WC têm sido estudadas, envolvendo desde sistemas mais simples até sistemas melhorados, como WC aerados artificialmente (WU et al., 2014). Assim, a seleção de alternativas para o tratamento de esgoto não é uma tarefa simples, diante da grande quantidade de tecnologias disponíveis e das variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão.

A análise dos potenciais impactos ambientais dos sistemas de tratamento de esgoto pode auxiliar os tomadores de decisões na escolha da melhor alternativa de tratamento ou na melhoria dos sistemas já existentes para reduzir o impacto ambiental decorrente de suas atividades (GALLEGO et al., 2008). A ferramenta de avaliação do ciclo de vida (ACV), concebida inicialmente para a análise produtos, pode ser bastante eficiente para avaliar o potencial impacto ambiental da infraestrutura sanitária, notadamente das estações de tratamento de esgoto (ETE) (COROMINAS et al., 2013).

Contudo, realizar apenas a análise ambiental dos sistemas não é o suficiente. A análise de aspectos econômicos também deve ser considerada, pois limitações financeiras podem inviabilizar a execução de um projeto. Uma metodologia que pode ser utilizada para tal análise é denominada avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV). A ACCV é uma ferramenta que permite calcular o custo total de um projeto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Ela leva em conta os custos ocorridos ao longo de todo o ciclo de vida do sistema, incluindo despesas com

consumo de energia elétrica, produtos químicos, manutenção, reparos e substituições de equipamentos (TROYER, 2015).

Estudos de ACV e ACCV de WC realizados anteriormente não envolveram a análise de WCs aerados artificialmente (DIXON; SIMON; BURKITT, 2003; MACHADO et al., 2006; LOPSIK, 2013; BROWN, 2016; LUTTERBECK et al., 2017; MCNAMARA, 2018). Além disso, há uma carência de dados de inventário de sistemas de tratamento de esgoto brasileiros, já que a maioria dos estudos de ACV de sistemas de tratamento de esgoto foi realizada no exterior (GUTIERREZ, 2014).

O presente estudo apresenta a ACV da etapa de operação e a ACCV de dois sistemas pilotos de tratamento descentralizado de esgoto envolvendo WC. Um deles (denominado Sistema 1) é composto por um tanque séptico (TS) seguido por um WC com fluxo subsuperficial vertical (WCFV) e um WC com fluxo subsuperficial horizontal (WCFH). O outro (denominado Sistema 2) é composto por um TS seguido por um WC de fluxo livre com aeração forçada (WCFL), um decantador secundário (DS) e um WCFV. O volume médio de esgoto tratado ao longo de 20 anos no Sistema 1 é de 4.672 m³, enquanto no Sistema 2 é de 10.950 m³ (vide Figura 1).

O programa OpenLCA (versão 1.6.3) foi utilizado para modelagem dos sistemas e avaliação dos potenciais impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos sistemas estudados. Entre as categorias de impacto que foram consideradas estão: acidificação terrestre, mudança climática, eutrofização de água doce, formação de oxidantes fotoquímicos, toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce, que foram avaliadas pelo método ReCiPe.

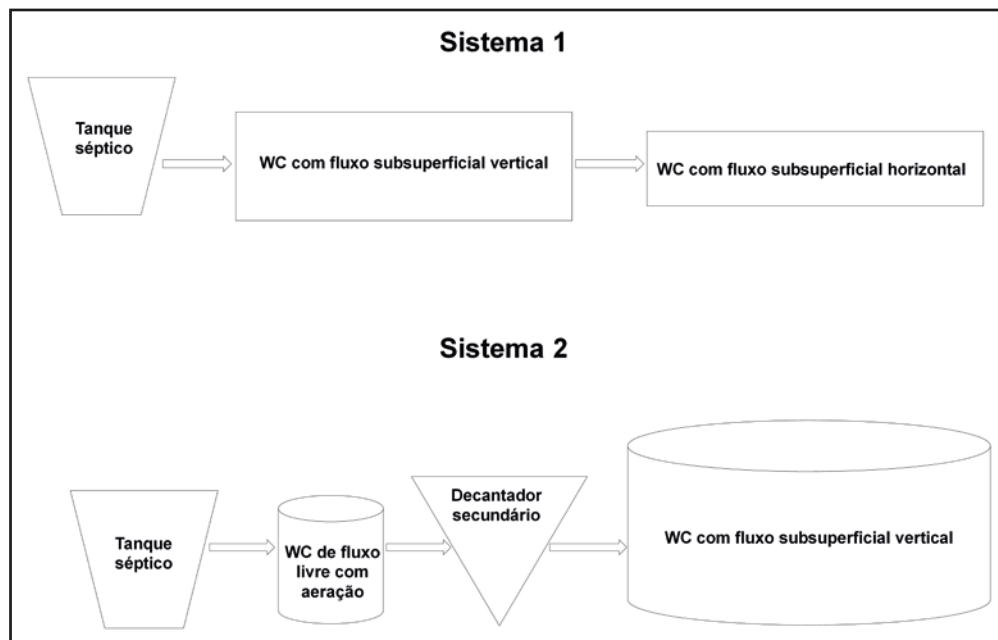
1.2 METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em duas partes principais:

- i. Metodologia para a ACV da etapa de operação dos sistemas de tratamento de esgoto.
- ii. Metodologia para a ACCV dos sistemas de tratamento de esgoto.

Os experimentos estudados, denominados Sistemas 1 e 2 (Figura 1.1) foram instalados no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), localizado na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo (SP), em São Paulo (SP). A água residual usada nos experimentos é proveniente da moradia estudantil e de um dos restaurantes do *campus*.

Figura 1.1 – Esquema simplificado (sem escala) dos Sistemas 1 e 2.



As considerações em relação à metodologia utilizada para a realização da ACV dos sistemas de tratamento de esgoto estudados serão apresentadas na Sessão 2.1.

1.2.1 Metodologia para a ACV dos sistemas de tratamento de esgoto

A metodologia utilizada para a realização da ACV foi baseada nas normas ISO 14040 e 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a,b). Segundo a norma ISO 14040, a ACV consiste em uma “compilação e avaliação das entradas e saídas e dos potenciais impactos ambientais associados a um produto ou sistema ao longo de seu ciclo de vida” (ABNT, 2009a, p. 3). Para a aplicação de tal metodologia é necessário definir uma unidade funcional (UF), que é a referência quantitativa para o estudo, a qual todos os fluxos de entrada e saída na ACV devem estar relacionados (MASSET; VIEUX; DARMON, 2015). A UF adotada neste estudo foi 1 m³ de esgoto tratado durante 20 anos.

Os dados operacionais utilizados são provenientes de análises físico-químicas realizadas quinzenalmente no Laboratório de Saneamento da Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP) por Mendonça (2016) e Andrade (2017). Os parâmetros físico-químicos analisados na entrada e saída dos sistemas e considerados neste estudo foram: demanda

química de oxigênio (DQO), nitrogênio total *Kjeldahl* (N-total), nitrogênio amoniacal (N-NH₄), fósforo total (P-Total) e fosfato (P-PO₄), conforme apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Resultados das análises dos parâmetros físico-químicos dos Sistemas 1 e 2

Parâmetros (mg/l)	Esgoto bruto			Esgoto tratado (Sistema 1)			Esgoto tratado (Sistema 2)		
	Média	D.P	n	Média	DP	n	Média	DP	n
DQO	967,0	487,0	34,0	129,6	158,6	22,0	76,0	39,0	34,0
P-total	10,1	34,0	4,8	7,2	2,1	16,0	5,4	34,0	2,8
P-PO ₄	7,3	33,0	1,6	5,4	1,0	22,0	4,8	32,0	1,5
N-NH ₄	52,3	32,0	20,4	45,9	19,3	20,0	30,2	31,0	14,1
N-total	80,9	33,0	18,0	74,6	51,5	23,0	38,5	33,0	13,0

Fonte: Adaptado de Mendonça (2016) e Andrade (2017).

Os dados referentes ao processo produtivo dos materiais de construção a serem substituídos ao longo da vida útil do sistema (mangueiras, brita e areia) foram provenientes da base de dados Ecoinvent (versão 3.3). O consumo de energia elétrica pelo sistema de aeração do WCFL foi estimado a partir do tempo de funcionamento do equipamento e da sua potência, conforme a Equação 1.1.

$$\text{consumo} = \text{potência} \times \text{tempo} \quad (1.1)$$

As emissões atmosféricas dos sistemas foram calculadas utilizando equações apresentadas nos relatórios do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006; 2013), as quais têm sido amplamente utilizadas em estudos de ACV de sistemas de tratamento de esgoto (CHEN et al., 2011; PAN; ZHU; YE, 2011; YOSHIDA et al., 2014; SLAGSTAD; BRATTEBØ, 2014; FARIA et al., 2015; GUO et al., 2016). Contudo, o IPCC não apresenta uma metodologia para a estimativa de emissão de N₂O por tanques sépticos. Assim, foi utilizado o valor estimado por Diaz-Valbuena et al. (2011) para essas emissões, que é de 0,005 g de N₂O percapita⁻¹ dia⁻¹.

1.2.2 Metodologia para a ACCV dos sistemas de tratamento de esgoto

Todos os cálculos de custo do ciclo de vida (CCV) deste estudo foram realizados utilizando uma planilha eletrônica e tiveram como ano de referência 2015. Para o cálculo do CCV, foi utilizada a Equação 1.2, baseada em Bhoeye, Saner e Aher (2016):

$$CCV = CA + CCI + OM + S \quad (1.2)$$

Onde:

CA = custo de aquisição de materiais e equipamentos;

CCI = custo de construção e/ou instalação;

OM = valor presente (VP) do custo de operação e manutenção;

S = VP do custo de substituição de componentes do sistema.

Como alguns dos custos incorridos ao longo do ciclo de vida da unidade em estudo podem estar distribuídos ao longo de décadas, como os custos de operação e manutenção, estes devem ser convertidos para o valor presente (VP). Isso significa que todos os valores a serem pagos no futuro são recalculados para o valor equivalente para o tempo presente (NILSSON; BERTLING, 2007).

Assim, para o cálculo do VP acumulativo para os gastos anuais fixos foi utilizada a Equação 1.3:

$$VP_1 = GA \times \left[\frac{1-(1+i)^{-20}}{i} \right] \quad (1.3)$$

Onde:

VP₁ = VP acumulado dos gastos anuais médios;

GA = gastos anuais médios;

i = taxa de desconto.

Já para o cálculo do VP de itens que serão adquiridos n anos mais tarde, como é o caso dos elementos que compõem os custos de substituição, foi utilizada a Equação 1.4:

$$VP_2 = \frac{C}{(1+i)^n} \quad (1.4)$$

Onde:

VP₂ = VP de itens que serão adquiridos n anos mais tarde;

C = custo no ano de referência (2015);

i = taxa de desconto;

n = período considerado (anos).

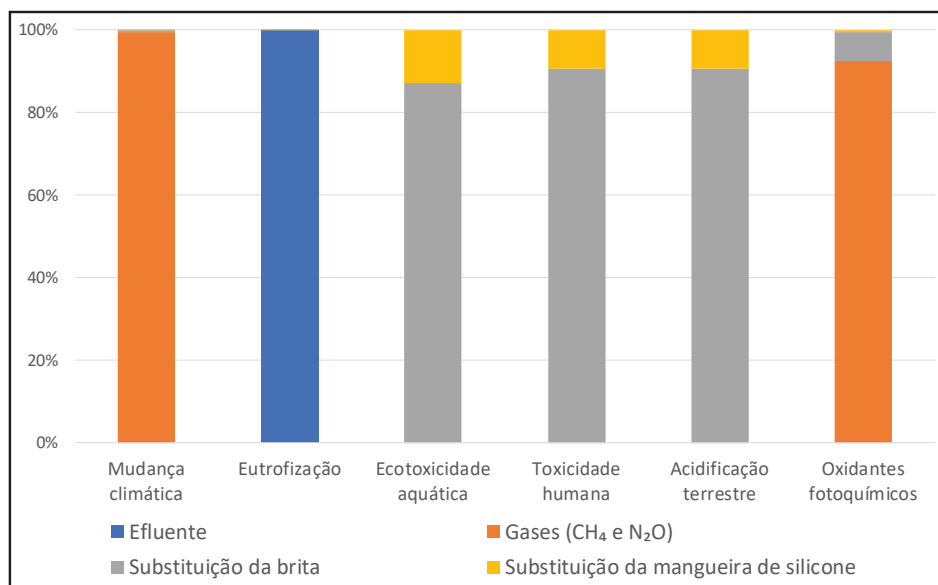
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à ACV dos sistemas de tratamento de esgoto estudados e das análises econômicas serão apresentados e discutidos na Sessão 3.1.

1.3.1 Resultados da ACV do Sistema 1

Na Figura 1.2 estão apresentados os resultados da avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) encontrados para a etapa de operação do Sistema 1 (considerando a substituição de materiais e os efluentes e gases emitidos) para as categorias de impacto analisadas pelo método ReCiPe.

Figura 1.2 – Resultados da AICV da etapa de operação do Sistema 1.



Para as categorias de mudança climática e formação de oxidantes fotoquímicos, os elementos que apresentaram o maior potencial de causar impactos foram os gases emitidos, CH₄ e N₂O, representando 99% e 92% do potencial de causar impactos, respectivamente. Segundo Fuchs, Mihelcic e Gierke (2011), as emissões gasosas (de CH₄ e N₂O) dos WC verticais e horizontais estudados em sua pesquisa foram de longe o elemento de maior impacto para a categoria de mudanças climáticas.

Para a categoria de eutrofização de água doce, o maior porcentual foi encontrado para o efluente final (99,95%). Roux et al. (2010) atribuem a ocorrência dos potenciais impactos relativos à categoria de eutrofização, principalmente à

incompleta remoção de nitrogênio e fósforo nesses sistemas. Para as categorias de ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana e acidificação terrestre os maiores potenciais de causar impactos encontrados estão correlacionados à substituição da brita, sendo de, respectivamente, 87%, 91% e 91%.

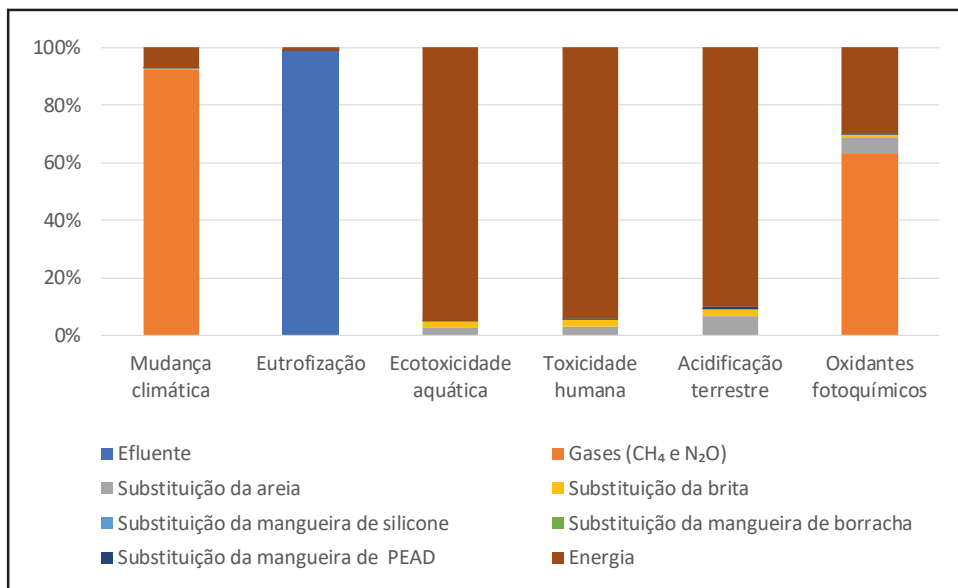
Embora esses valores sejam altos, Lopsik (2013) ao realizar uma ACV de um WC utilizando argila expandida como meio filtrante, concluiu que a substituição desse material por areia e brita levaria a uma redução dos potenciais impactos ambientais de 10% a 42%, dependendo do método de avaliação de impacto adotado. Assim, o uso de areia e brita como meio filtrante mostra um desempenho ambiental melhor que o uso de argila expandida.

A substituição da mangueira foi o elemento que apresentou as segundas maiores porcentagens em relação a essas mesmas categorias, 13%, 9% e 9%, respectivamente. A substituição da brita foi responsável por 7% dos impactos referentes à categoria de formação de oxidantes fotoquímicos.

1.3.2 Resultados da ACV do Sistema 2

Na Figura 1.3 estão apresentados os resultados encontrados em relação ao potencial de causar impacto ambiental de elementos (efluentes, gases, energia elétrica e substituição de materiais) que compõem a etapa de operação do Sistema 2 para as categorias de impacto analisadas pelo método ReCiPe.

Figura 1.3 – Resultados de AICV da etapa de operação do Sistema 2.



Para as categorias de mudança climática e formação de oxidantes fotoquímicos, os elementos que apresentaram o maior potencial de causar impactos, novamente, foram os gases emitidos, CH₄ e N₂O, representando 92% e 63% do potencial de causar impactos, respectivamente. Para essa última categoria, a energia elétrica foi responsável por 30% dos potenciais impactos ambientais, justificando o menor valor encontrado em relação ao porcentual de contribuição para o potencial de causar impactos ambientais dos gases, comparativamente ao Sistema 1. Para a categoria de eutrofização de água doce, o maior porcentual foi encontrado para o efluente final (99%), resultado semelhante ao encontrado para o Sistema 1. E para as categorias de ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana e acidificação terrestre os maiores potenciais para causar impactos estão correlacionados à energia elétrica, sendo, respectivamente, de 95%, 94% e 90%, enquanto para o Sistema 1 essas três últimas categorias foram afetadas principalmente pela substituição da brita.

Garfí, Flores e Ferrer (2017) compararam três sistemas para o tratamento de esgoto utilizando a metodologia de ACV: sistema de lodos ativados; WCFV + WCFH; e lagoas de alta taxa de produção de algas. Constataram que o sistema de lodos ativados foi o que apresentou o pior desempenho ambiental para todas as categorias de impacto analisadas, enquanto o sistema de WC e o sistema de lagoas mostraram um desempenho ambiental similar entre si. Isso se deveu principalmente ao maior consumo de energia elétrica. Cabe mencionar que no referido estudo foi considerada a matriz energética espanhola de 2016 (22% nuclear; 14% carvão; 19% eólica; 16% hidráulica; 11% combustíveis fósseis; 10% cogeração; 5% solar fotovoltaica e termoelétrica; 1% outras energias renováveis e 1% resíduos), enquanto no presente estudo foi considerada a matriz energética brasileira de 2015 (64% hidráulica, 12,9% gás natural, 8% biomassa, 4,8% derivados do petróleo, 4,5% carvão e derivados, 3,5% eólica, 2,4% nuclear, 0,01% solar fotovoltaica) fornecida pelo Balanço Energético Nacional (BEN, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Não é possível realizar uma comparação direta entre os resultados de AICV dos Sistemas 1 e 2 de modo a identificar qual deles apresenta um menor potencial de causar impactos ambientais, pois possuem efluentes tratados com características diferentes.

1.3.3 Resultados de ACCV do Sistema 1

A Tabela 1.2 traz os custos de aquisição do Sistema 1.

Tabela 1.2 – Custos de aquisição do Sistema 1 para o cenário base

Item	Quantidade	Unidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Tanque séptico	1	unidade	1.560*	1.560
Tubos de PVC, DN 25 mm	8,68	m	2,78**	24,13
Tubos de PVC, DN 40 mm	6,5	m	2,40**	15,60
Tubos de PVC, DN 50 mm	16,99	m	10,76**	182,81
Tubos de PVC, DN 75 mm	2	m	23,54**	47,08
Registros de esfera soldável de PVC marrom, DN 40 mm	4	unidades	32,67**	130,68
Válvula de retenção em PVC, DN 50 mm	1	unidades	48,73**	48,73
Tês de PVC, DN 25 mm	5	unidades	2,28**	11,40
Tês de PVC, DN 50 mm	4	unidades	6,72**	26,88
Joelho/cotovelo de PVC, DN 25 mm	4	unidades	0,59**	2,36
Joelho/cotovelo de PVC, DN 50 mm	4	unidades	4,14**	16,56
Cimento Portland	89,76	kg	0,48**	43,08
Cal hidratada	254,32	kg	0,45**	114,44
Areia média	892,8	kg	0,0388**	34,67
Água	0,2951	m ³	6,46***	1,91
Tijolo maciço comum	864	unidades	0,27**	233,28
Tijolo vazado (21 furos)	65	unidades	1,92**	124,80
Barras de aço corrugado	55,17	kg	3,40**	187,58
Brita nº 1	3,41	m ³	54,47**	185,74
Brita nº 2	0,59	m ³	54,47**	32,14
Mangueira flexível transparente, DN 40 mm	3,2	m	12,05**	38,56
Área (terreno)	7,2	m ²	1.953,77****	14.067,14
Total				16.812,58

Fontes: * Fornecedores; ** Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices da Construção Civil (2016); *** Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2017); **** Vasques (2015).

Os custos de construção e/ou instalação do Sistema 1 para o cenário-base foram apresentados na Tabela 1.3. Estes envolvem os custos com a mão de obra para a construção da estrutura dos WC, bem como o revestimento desta e a instalação dos tubos de PVC, e foram baseados nos valores apresentados pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2016).

Tabela 1.3 – Custos de construção e/ou instalação do Sistema 1 para o cenário-base

Item	Custo do m ² (R\$)	Área construída (m ²)	Custo total (R\$)
Alvenaria	55,19	12,52	690,98
Emboço (massa única)	25,84	29,78	769,51
Instalação dos tubos de PVC	Não se aplica	Não se aplica	74,16
Total		R\$1.534,65	

Em relação aos custos de operação e manutenção do Sistema 1, foram considerados os custos anuais referentes à mão de obra necessária para a poda dos WC e para a manutenção do sistema, além dos custos anuais com o transporte e disposição final do lodo (considerando uma limpeza por ano). Contudo, como esses valores se repetem ao longo do ciclo de vida do sistema, foi calculado o VP referente ao período de 20 anos utilizando a Equação 1.3, apresentada na Sessão 2.2, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 – Custos anuais de operação e manutenção e VP do Sistema 1.

Item	Custo total (R\$)	VP (R\$)
Auxiliar de jardinagem	354,48	3.559,43
Auxiliar de manutenção	347,76	3.491,95
Transporte e disposição final do lodo	325,00	3.263,41
VP total (R\$)		10.314,79

Em relação aos custos de substituição, foi considerado que a mangueira seria trocada a cada 5 anos e que o meio filtrante seria substituído a cada 10 anos (com base em STEER; ASELTYNE; FRASER, 2003; VYMAZAL, 2005; HUGHES-RILEY et al., 2014; BESANÇON et al., 2017). O VP referente a esses custos foi calculado utilizando a Equação 1.4 da Sessão 2.2 e foi apresentado na Tabela 1.5, sendo que a taxa de desconto (r) utilizada em todos os cálculos do presente trabalho foi de 9,6%.

Tabela 1.5 – VP dos custos de substituição para o Sistema 1

Material	VP – Ano 5 (R\$)	VP – Ano 10 (R\$)	VP – Ano 15 (R\$)	Soma do VP de cada material (R\$)
Mangueira	24,38	15,42	9,75	49,55
Brita	Não se aplica	87,12	Não se aplica	87,12
VP total da substituição (R\$)				136,67

Assim, tem-se um custo total de aquisição de R\$ 16.812,58, um custo total de construção e instalação de R\$ 1.534,65, um custo total de operação e manutenção de R\$ 10.314,79 e um custo de substituição de R\$ 136,67. Somando todos esses valores, obtém-se, com base na Equação 1.2, um CCV de R\$ 28.798,69, e o CCV por m³ de esgoto tratado é de R\$ 6,16.

1.3.4 Resultados de ACCV do Sistema 2

A Tabela 1.6 traz os custos de aquisição de materiais de construção e do terreno para a instalação do Sistema 2 para o cenário-base. Assim como para o Sistema 1, foi feito um levantamento dos custos referentes aos tubos e conexões de PVC e dos materiais utilizados no meio filtrante (brita e areia grossa). Como nesse sistema os tanques não foram construídos com tijolos (assim como no caso do Sistema 1), mas produzidos em fibra de vidro, o custo da aquisição desses tanques também é apresentado. O custo dos materiais e equipamentos utilizados para a aeração do sistema, como compressor de ar e mangueiras, também foram incluídos.

Tabela 1.6 – Custos de aquisição do Sistema 2 para o cenário base

Item	Quantidade	unidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Tanque séptico	1	unidade	2.340*	2.340,00
Tubo de PVC, DN 20	4,5	m	4,70**	21,15
Tubo de PVC, DN 40	12,4	m	8,68**	107,63
Tubo PVC, DN 100	3	m	9,90**	29,70
Tê de PVC, DN 40 mm	7	unidades	10,51**	73,57
Tê de PVC água 1/2”	5	unidades	3,64**	18,20
Cotovelo/joelho de PVC, 1/2”	8	unidades	1,46**	11,68
Cotovelo de PVC, DN 40	8	unidades	3,55**	28,40
Registro tipo esfera de PVC, DN 40 mm	2	unidades	32,67**	65,34
Flange parafusos 6 furos	3	unidades	8,05**	24,15
Cap de PVC, DN 40, água	2	unidades	2,68**	5,36
Tanque do WC aerado	1	unidade	1.787,35*	1.787,35
Decantador	1	unidade	1.657,50*	1.657,50
Tanque do WC saturado	1	unidade	2.971,45*	2.971,45
Brita nº 2	3	m ³	54,47**	163,41
Areia grossa	2	m ³	57,72**	115,44
Compressor eletromagnético	1	unidade	750,00*	750,00
Mangueira corrugada em PEAD, DN 40 mm	3,90	m	5,91**	23,04
Mangueira porosa, 75 cm	4	unidades	26,00**	104,00
Mangueira cristal 1/2”	4,50	m	1,05**	4,73
Terreno	6,77	m ²	1.953,77***	13.227,02
Custo total (R\$)				23.529,12

Fontes: * Fornecedores; ** Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices da Construção Civil (2016); *** Vasques (2015).

A Tabela 1.7 traz um resumo dos custos de construção e/ou instalação, que envolve os custos com a mão de obra para a instalação dos tanques e para a instalação elétrica, os quais foram calculados com base nos valores fornecidos pelo SINAPI (2016).

Tabela 1.7 – Custos de construção e/ou instalação do Sistema 2 para o cenário-base

Item	Quantidade	Unidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Ligação da tubulação	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	39,56*
Instalação elétrica	4	Horas.homem ⁻¹	20,52*	82,08
Custo total de construção e/ou instalação (R\$)				121,64

Fonte: *SINAPI (2016).

No cálculo dos custos de operação e manutenção foram considerados os valores anuais referentes à mão de obra necessária para a poda dos WC e a manutenção do sistema, além dos custos anuais com transporte e disposição final do lodo (tendo sido considerados os mesmos valores do Sistema 1) e os gastos referentes ao consumo de energia elétrica para a aeração do sistema. Ao longo do ano de 2015, a bandeira tarifária de energia elétrica esteve na cor vermelha. A tarifa para o subgrupo B1, que representa os consumidores residenciais, era de R\$ 0,20111 por kWh para a bandeira vermelha (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). Assim, esse valor foi considerado nos cálculos. O VP dos custos de operação e manutenção para $n = 20$ anos estão apresentados na Tabela 1.8.

Tabela 1.8 – Custos de operação e manutenção e VP do Sistema 2

Item	Custo total por ano (R\$)	VP (R\$)
Auxiliar de jardinagem	354,48	3.559,43
Auxiliar de manutenção	347,76	3.491,95
Disposição final do lodo	325,00	3.263,41
Energia – compressor	176,17	1.657,11
VP total (R\$)		11.971,90

Pela análise da Tabela 1.8, é possível constatar que o VP referente aos gastos relativos ao consumo de energia elétrica pelo compressor representa cerca de 14% do VP total dos custos de operação e manutenção.

O VP dos custos de substituição incorridos ao longo do ciclo de vida do Sistema 2 estão apresentados na Tabela 1.9. Para as mangueiras e o compressor de ar, considerou-se que a substituição seria feita a cada 5 anos (GLICK; GUGGEMOS, 2013). Para o meio filtrante (brita e areia), foi considerada uma troca a cada 10 anos, mesmo período considerado para o Sistema 1.

Tabela 1.9 – VP dos custos de substituição do Sistema 2

Material	VP – Ano 5 (R\$)	VP – Ano 10 (R\$)	VP – Ano 15 (R\$)	Soma do VP de cada material (R\$)
Mangueiras	75,73	47,89	30,28	153,91
Compressor	474,25	299,89	189,63	963,77
Meio filtrante – brita	Não se aplica	65,34	Não se aplica	65,34
Filtrante – areia	Não se aplica	46,16	Não se aplica	46,16
VP total da substituição (R\$)				1.229,17

Assim, tem-se um custo total de aquisição de R\$ 23.529,12, um custo total de construção e instalação de R\$ 121,64, um custo total de operação e manutenção de R\$ 11.971,90 e um custo de substituição de R\$ 1.229,17. Somando todos esses valores, obtém-se um CCV de R\$ 36.851,83, e o CCV por m³ de esgoto tratado é de R\$ 3,36, valor 1,8 vezes menor que o encontrado para o Sistema 1.

1.4 CONCLUSÃO

O Sistema 2, que apresenta uma configuração não convencional (WC com aeração), possibilitou, segundo os resultados encontrados neste estudo, uma maior remoção de poluentes. Além disso, o CCV por m³ de esgoto tratado desse sistema mostrou-se quase metade do valor encontrado para o Sistema 1, devido, principalmente, à menor necessidade de área para a instalação do sistema, possibilitada pela aeração. Porém, a introdução da aeração nesse sistema acarretou a necessidade de utilizar energia elétrica, e os potenciais impactos ambientais associados à produção, distribuição e uso da energia elétrica afetaram principalmente as categorias ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana e acidificação terrestre. Desse modo, a investigação do uso de fontes alternativas de energia, sob os pontos de vista ambiental e econômico, mostra-se uma estratégia a ser considerada em estudos futuros, visando melhorar mais ainda o desempenho desse sistema.

De modo geral, a partir da identificação dos pontos críticos sob os aspectos econômico e ambiental realizada no presente estudo, é possível elaborar estratégias para melhorar o desempenho dos sistemas estudados – por meio, por exemplo, da investigação de estratégias com potencial para redução de emissões

gasosas e melhoria da eficiência na remoção de poluentes, tornando assim, os sistemas de tratamento de esgoto mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução 1.844 de 2015**. Altera o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2014 da Eletropaulo e fixa novas Tarifas de Energia – TEs e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição – TUSDs. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/82851613/dou-secao-1-08-01-2015-pg-48>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

ANDRADE, H. H. B. **Desenvolvimento e monitoramento de *wetlands* construídos com aeração artificial: avaliação de desempenho, aspectos econômicos e microbiológicos**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14040**: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14044**: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

BESANÇON, A.; LE CORRE, K. S.; DOTRO, G.; JEFFERSON, B. Assessment of activated sludge, membrane bioreactors and vertical flow wetlands for upgrading sewage treatment works. **Environmental Technology**, v. 38, n. 2, p. 154–162, 2017. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27855542>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

BHOYE, V. Y.; SANER, A. B.; AHER, P. D. Life Cycle Cost Analysis of Sewage Treatment Plants. **International Journal of Modern Trends in Engineering and Research**, v. 3, n. 4, p. 426-429, 2016.

BROWN, C. **Life-Cycle Cost Analysis of Nutrient Reduction Technologies Employed in Municipal Wastewater Treatment**. 2016. Thesis – Environmental

Studies Department, Oberlin College, Oberlin, 2016. Disponível em: <https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=oberlin1462979592&disposition=inline>. Acesso em: 27 jul. 2018.

CHEN, G. Q.; SHAO, L.; CHEN, Z. M.; LI, Z.; ZHANG, B.; CHEN, H.; WU, Z. Low-carbon assessment for ecological wastewater treatment by a constructed wetland in Beijing. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 4, p. 622–628, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857411000097>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (Sabesp). **Comunicado 04/15**. São Paulo: Sabesp, 2015. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/clientes_servicos/comunicado_04_2015.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2017.

COROMINAS, L. et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. **Water Research**, v. 47, n. 15, p. 5480-5492, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313541300540X>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

DIAZ-VALBUENA, L. R. et al. Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Emissions from Septic Tank Systems. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n.7, p. 2741-27477, 2011.

DIXON, A.; SIMON, M.; BURKITT, T. Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. **Ecological Engineering**, v. 20, n. 4, p. 297-308, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857403000077>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional: relatório síntese – ano base 2015**. Ministério de Minas e Energia, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-92/Relat%C3%B3rio_S%C3%ADntese_2016.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2019.

FARIA, A. B. et al. Evaluation of new alternatives in wastewater treatment plants based on dynamic modelling and life cycle assessment (DM-LCA). **Water Research**, v. 84, p. 99-111, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135415300981>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

FUCHS, V. J.; MIHELICIC, J. R.; GIERKE, J. S. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. **Water Research**, v. 45, n. 5, p. 2073–2081, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135410008687>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

GALLEGO, A. et al. Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 52, p. 931-940, mar. 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134490800030X>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

GARFÍ, M.; FLORES, L.; FERRER, I. Life cycle assessment of wastewater treatment systems for small communities: activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 211-219, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617310569>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

GLICK, S.; GUGGEMOS, A. A. Rethinking Wastewater-Treatment Infrastructure: Case Study Using Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment to Highlight Sustainability Considerations. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 12, 2013. Disponível em: <[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000762](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000762)>. Acesso em: 27 jul. 2018.

GUO, J.; FU, X.; BAQUERO, G.; SOBHANI, R.; NOLASCO, D. A.; ROSSO, D. Trade-off between carbon emission and effluent quality of activated sludge processes under seasonal variations of wastewater temperature and mean cell retention time. **Science of the Total Environment**, v. 547, p. 331–344, 2016. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26789371>>. Acesso em: 27 jul. 2018

GUTIERREZ, K.G. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. 2014. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HUGHES-RILEY, T. et al. Advances in clog state monitoring for use in automated reed bed installations. **Lakes, reservoirs and ponds**, v. 8, n. 1, p. 52-65, 2014. Disponível em: <<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/84576>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands**. Report. Suíça, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/home/docs/wetlands/Wetlands_Supplement_precopyedit.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. v. 5 (Waste), Japão, 2006. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

LOPSIK, K. Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 6, p. 1295-1308, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-012-0159-y>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

LUTTERBECK, C. A. et al. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 527-536, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617302287>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

MACHADO, A. P. et al. Life Cycle Assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities: energy-saving systems versus

activated sludge. In: International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 10, 2006. **Atas**. Lisboa, 2006, p. 1203-1213. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.559.9226&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

MASSET, G.; VIEUX, F.; DARMON, N. Which functional unit to identify sustainable foods? **Public Health Nutrition**, v. 18, n. 13, p. 2488-2497, 2015. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25805001>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

MCNAMARA, G. **Economic and Environmental Cost Assessment of Wastewater Treatment Systems A Life Cycle Perspective**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Dublin City University, Dublin, 2018. Disponível em: <<http://doras.dcu.ie/22205/>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

MENDONÇA, A. A. J. **Tecnologias naturais e sustentáveis para tratamento descentralizado de esgotos domésticos: Avaliação de um sistema em escala real e fluxo contínuo composto por um tanque séptico e uma wetland construída híbrida, cultivada com capim Vetiver em meio suporte de brita**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-25052016-122129/pt-br.php/>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

NILSSON, J.; BERTLING, L. Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring Systems – Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 22, n. 1, 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4106011/>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

PAN, T.; ZHU, X.; YE, Y. Estimate of life-cycle greenhouse gas emissions from a vertical subsurface flow constructed wetland and conventional wastewater treatment plants: A case study in China. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 2, p. 248-254, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857410003083>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

ROUX, P. et al. Life cycle environmental assessment (LCA) of sanitation systems including sewerage: case of vertical flow constructed wetlands versus activated sludge. In: **IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, 12, Veneza, Itália. Proceedings, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/50219793_Life_Cycle_environmental_Assessment_LCA_of_sanitation_systems_including_sewerage_Case_of_Vertical_Flow_Constructed_Wetlands_versus_activated_sludge>. Acesso em: 27 jul. 2018.

SAEED, T.; SUN, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. **Journal of Environmental Management**, v. 112, p. 429–448, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712004197>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTO E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL (SINAPI). 2016. **Relatórios de Insumos e Composições - 2º semestre/2015**. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 23 mar.2016.

SLAGSTAD, H.; BRATTEBØ, H. Life cycle assessment of the water and wastewater system in Trondheim, Norway – A case study. **Urban Water Journal**, v. 11, n. 4, p. 323-334, 2014. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1573062X.2013.795232>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

STEER, D.; ASELTYNE, T.; FRASER, L. Life-cycle economic model of small treatment wetlands for domestic wastewater disposal. **Ecological Economics**, v. 44, p. 359-369, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180090300003X>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

TROYER, S. **Life Cycle Cost Analysis for Water and Wastewater Treatment Facilities Can Result in Lower Costs and Higher Quality Projects**. 2015. Disponível em: <http://www.foxeng.com/sites/default/files/pdf/Life%20Cycle%20Cost%20Analysis_0.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2015.

VASQUES, D. Preço do metro quadrado em SP. **Folha de São Paulo**. Disponível em: <<http://classificados.folha.uol.com.br/imoveis/1255116-estudo-apon-ta-perfil-e-preco-dos-imoveis-em-sp-confira.shtml>>. Acesso em 24 dez. 2016.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

VYMAZAL, J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 25, p. 478-490, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857405001588>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

VYMAZAL, J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. **Hydrobiologia**, v. 674, n. 1, p. 133-156, 2011. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-011-0738-9>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

WU, S. et al. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. **Water Research**, v. 57, p. 40-55, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414002103>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

YOSHIDA, H. et al. Influence of data collection schemes on the Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant. **Water Research**, n. 56, p. 292-303, 2014. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24699421>>. Acesso em: 27 jul. 2018

