

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
CURSO DE BACHALERADO EM ENGENHARIA CIVIL

JÉSSICA RODRIGUES SILVEIRA

**POTENCIAL DE REUSO DO EFLUENTE TRATADO POR SISTEMA *WETLAND*
CONSTRUÍDO**

Goiânia, GO

2018

JÉSSICA RODRIGUES SILVEIRA

POTENCIAL DE REUSO DO EFLUENTE TRATADO POR SISTEMA *WETLAND*
CONSTRUÍDO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Civil, do Instituto Federal de Educação
Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus
Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:
Prof. Me. Douglas Pereira da Silva Pitaluga

Goiânia, GO
2018

Si391p Silveira, Jéssica Rodrigues.

Potencial de reuso do efluente tratado por sistema *Wetland* construído / Jéssica Rodrigues Silveira. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.
117 f. : il.

Orientador: Prof. Me. Douglas Pereira da Silva Pitaluga.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Graduação em Engenharia Civil,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
Inclui apêndices.

1. Águas residuais. 2. *Wetland* construído. 3. Reuso de água. I. Pitaluga, Douglas Pereira da
Silva (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 628

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Jéssica Rodrigues Silveira

Matrícula: 20161011050370

Título do Trabalho: Potencial de reuso do efluente tratado por sistema *wetland* construído

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 18/02/2019

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumprir quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia
Local

18 / 02 / 19
Data

Jéssica Rodrigues Silveira

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

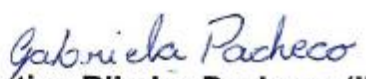
Jéssica Rodrigues Silveira

**POTENCIAL DE REUSO DO EFLUENTE TRATADO POR SISTEMA WETLAND
CONSTRUÍDO**

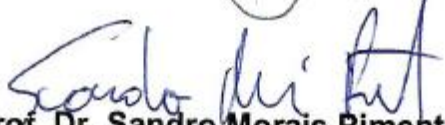
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Civil, do Instituto Federal de Educação
Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus
Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 20 de dezembro de 2018:


Prof. Me. Douglas Pereira da Silva Pitaluga (IFG)
(Orientador)


Profa. Me. Gabriela Cristina Ribeiro Pacheco (IFG)


Profa. Dra. Jussanã Milograna (IFG)


Prof. Dr. Sandro Moraes Pimenta (IFG)


Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida (UFG)

Goiânia, GO

2018

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Me. Douglas Pitaluga por toda dedicação, colaboração e acompanhamento, sempre orientando de forma competente a elaboração deste trabalho.

A todos os professores de graduação do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Goiânia, que se dedicam em transmitir conhecimentos de suas valiosas pesquisas, contribuindo na formação de novos profissionais.

À banca examinadora, Profa. Dra. Jussanã Milograna, Profa. Me. Gabriela Pacheco, Prof. Dr. Sandro Pimenta, Prof. Dr. Rogério Almeida, pelos apontamentos para melhoria deste trabalho.

À Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, na pessoa do Prof. Emiliano Godoi, por ceder a Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgotos com Plantas – EPTEP, para realização da pesquisa.

À Secretária de Infraestrutura (SEINFRA) da Universidade Federal de Goiás, tanto nos serviços prestados na ativação do sistema, quanto no fornecimento de equipamentos e ferramentas necessárias para execução da pesquisa.

Aos colegas de graduação, Jordana Neves, Marianne Santos, Camylla Rodrigues, Diego Andrade e Bruno Vieira, pelo trabalho e cooperação no desenvolvimento da pesquisa.

Aos demais colegas de graduação, em especial minha amiga Débora Silva, que direta ou indiretamente colaboraram para realização deste trabalho.

Ao laboratório da Engenharia Ambiental e Sanitária do IFG, Câmpus Goiânia, nas pessoas do Prof. Dr. Sandro Pimenta, Sra. Martha Prado, técnica de laboratório, e Sra. Ingrid Cavalcante, monitora de Microbiologia Ambiental, pela importante contribuição e orientação na realização das análises físicas, químicas e microbiológicas.

Aos laboratórios de Materiais de Construção e Solos do IFG, Câmpus Goiânia, nas pessoas do Sr. Sérgio Coelho e Sr. Sandro Vale, pela importante contribuição e orientação na realização dos ensaios de caracterização.

Ao meu querido Samuel Borges por compreender minha ausência nos momentos dedicados a este trabalho, além de contribuir diretamente em todas as etapas da pesquisa.

Em especial à minha amada família, aos meus pais, meus irmãos e meus sogros, pela confiança, amor e educação ao longo da vida, além do incentivo para realização dos meus objetivos profissionais e pessoais.

Por fim, ao Senhor Deus e aos anjos da guarda pelas bênçãos, minha eterna gratidão.

RESUMO

POTENCIAL DE REUSO DO EFLUENTE TRATADO POR SISTEMA *WETLAND* CONSTRUÍDO

AUTORA: Jéssica Rodrigues Silveira

ORIENTADOR: Douglas Pereira da Silva Pitaluga

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de reuso do efluente tratado por sistema *wetland* construído. De modo específico, objetivou-se retomar as atividades de pesquisa na Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgotos com Plantas, Câmpus I da Universidade Federal de Goiás, caracterizando as vazões do afluente e dos efluentes desse sistema para comparação dos resultados das análises com as normativas de águas de reuso. Nas análises foram avaliados os parâmetros de cor aparente, turbidez, temperatura, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, pH, dureza, alcalinidade, cloretos, coliformes totais e coliformes termotolerantes. O sistema *wetland* construído é constituído de um tanque de equalização e um tanque séptico, que encaminham afluente a três leitos independentes, preenchidos com brita # 0, cultivados com macrófitas do tipo *Typha latifolia* L., seguidos por três filtros independentes de brita # 0, areia fina e solo areno-argiloso. Após trinta dias da aplicação de afluente no sistema, realizaram-se três coletas de amostras simples de sete pontos definidos, sendo uma amostra de afluente, três amostras de efluentes de cada leito com plantas e três, de cada filtro. Os leitos apresentaram percentuais de remoção média de sólidos suspensos totais (87,2%), turbidez (75,3%), cor aparente (61,5%), cloretos (28,1%), alcalinidade (17,7%), sólidos dissolvidos totais (16,9%) e demanda bioquímica de oxigênio (7,6%). Os filtros contribuíram na redução média de sólidos suspensos totais (31,5%), demanda química de oxigênio (29,9%), alcalinidade (28,8%), cloretos (23,7%), condutividade elétrica (21,3%), sólidos dissolvidos totais (19,2%), turbidez (10,0%), dureza (9,5%) e cor aparente (4,6%). Os efluentes finais do sistema *wetland* construído, nas condições atuais, não estão em conformidade com as normativas de reuso de águas, devido ao processo de tratamento estar na fase de estabilização.

Palavras-chave: Reciclagem de água. Reutilização de água. Alagados construídos. Zona de raízes.

ABSTRACT

REUSE POTENTIAL OF A CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM EFFLUENT

AUTHOR: Jéssica Rodrigues Silveira
ADVISOR: Douglas Pereira da Silva Pitaluga

The present study had the goal of assessing the reuse potential of the treated effluent by a constructed wetland system. Specifically, the objectives were to return the research activities at the Station for Research on Wastewater Treatment with Plants, Campus I of the Federal University of Goiás, characterizing the flows of the tributary and the effluents of this system to compare the results of the analyzes with the normatives of reuse water. The parameters of apparent color, turbidity, temperature, total suspended solids, total dissolved solids, electrical conductivity, biochemical oxygen demand, dissolved oxygen, pH, hardness, alkalinity, chlorides, total coliforms and thermotolerant coliforms were evaluated. The constructed wetland system consists of an equalization tank and a septic tank, which affluent tributaries to three independent units filled with gravel # 0, grown with *Typha latifolia* L. macrophytes, followed by three independent filters, consisting of gravel # 0, fine sand and sandy-clay soil. After thirty days of tributary application in the system, three simple sample collections of seven defined points, being one tributary sample, three effluent samples from each unit with plants and three samples from each filter. The percentage of total suspended solids (87.2%), turbidity (75.3%), apparent color (61.5%), chlorides (28.1%), alkalinity (17.7%), total dissolved solids (16.9%) and biochemical oxygen demand (7.6%). The filters contributed to the reduction of total suspended solids (31.5%), chemical oxygen demand (29.9%), alkalinity (28.8%), chlorides (23.7%), electrical conductivity (%), total dissolved solids (19.2%), turbidity (10.0%), hardness (9.5%) and apparent color (4.6%). The final effluent from the constructed wetland system, under current conditions, does not comply with water reuse regulations due to the treatment process being in the stabilization phase.

Keywords: Water recycling. Water reuse. Constructed wetlands. Rootzone system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Índices de cobertura urbana de esgotos no Brasil	19
Figura 2	Esgotamento sanitário nas zonas rurais brasileiras	19
Figura 3	Índices de atendimento do esgotamento sanitário em Goiás	20
Figura 4	Classificação das águas residuais	23
Figura 5	Esquema representativo da classificação do sistema <i>wetland</i> construído	31
Figura 6	Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas flutuantes, com fluxo superficial	32
Figura 7	Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas submersas, com fluxo superficial	32
Figura 8	Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas emergentes, com fluxo superficial	33
Figura 9	Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas emergentes, com fluxo subsuperficial e horizontal	33
Figura 10	Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas emergentes, com fluxo subsuperficial e vertical	33
Figura 11	Componentes de um sistema <i>wetland</i> construído	35
Figura 12	Taboa, <i>Typha latifolia</i> L.	38
Figura 13	<i>Typha latifolia</i> L. (habitat)	38
Figura 14	Mecanismos de remoção de poluentes nos leitos com plantas	40
Figura 15	Variação na composição dos <i>wetlands</i> construídos de fluxo horizontal (WCFH) de acordo com estudos publicados no Brasil até o ano de 2011	42
Figura 16	Mapa de localização do sistema <i>wetland</i> construído	55
Figura 17	Condições antecedentes a avaliação e reativação do sistema	57
Figura 18	Planta baixa e corte longitudinal do sistema <i>wetland</i> construído	58
Figura 19	Novo arranjo das unidades da Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgotos com Plantas - EPTEP	59
Figura 20	Fluxograma da pesquisa	60
Figura 21	Caixa de passagem para o desvio de efluente bruto pelo <i>by-pass</i>	62
Figura 22	Unidades de pré-tratamento do sistema <i>wetland</i> construído	63
Figura 23	Remoção do substrato dos leitos de tratamento	63
Figura 24	Substituição dos reguladores de nível	64

Figura 25	Instalação dos reguladores de nível	64
Figura 26	Preenchimento dos leitos com brita # 0	65
Figura 27	Taboa no ambiente natural (local de coleta)	65
Figura 28	Muda de taboa utilizada no plantio (<i>Typha latifolia</i> L.)	65
Figura 29	Último plantio de taboa, <i>Typha latifolia</i> L.	66
Figura 30	Distribuição das mudas de taboa no plantio	66
Figura 31	Saturação dos leitos durante o pegamento das plantas	67
Figura 32	Descarga de água dos leitos	67
Figura 33	Unidades de polimento preenchidas com os substratos	68
Figura 34	Acréscimo de uma camada de brita sobre os filtros de areia e solo	68
Figura 35	Pontos de coleta das amostras do afluente do sistema	69
Figura 36	Pontos de coleta das amostras dos efluente tratados dos leitos e dos filtros	69
Figura 37	Condições atuais do sistema <i>wetland</i> construído	75
Figura 38	Mudas brotando no sistema	77
Figura 39	Floração de uma taboa, <i>Typha latifolia</i> L.	77
Figura 40	Variações dos resultados de cor aparente na primeira análise do afluente e dos efluentes	83
Figura 41	Variações dos resultados de cor aparente na segunda análise do afluente e dos efluentes	84
Figura 42	Variações dos resultados de cor aparente na terceira análise do afluente e dos efluentes	84
Figura 43	Variações dos resultados de turbidez na primeira análise do afluente e dos efluentes	85
Figura 44	Variações dos resultados de turbidez na segunda análise do afluente e dos efluentes	86
Figura 45	Variações dos resultados de turbidez na terceira análise do afluente e dos efluentes	87
Figura 46	Variações dos resultados de sólidos suspensos totais na primeira análise do afluente e dos efluentes	88
Figura 47	Variações dos resultados de sólidos suspensos totais na segunda análise do afluente e dos efluentes	88
Figura 48	Variações dos resultados de sólidos suspensos totais na terceira análise do afluente e dos efluentes	89
Figura 49	Variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais na primeira análise do afluente e dos efluentes	90

Figura 50	Variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais na segunda análise do afluente e dos efluentes	90
Figura 51	Variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais na terceira análise do afluente e dos efluentes	91
Figura 52	Variações dos resultados de condutividade elétrica na primeira análise do afluente e dos efluentes	92
Figura 53	Variações dos resultados de condutividade elétrica na segunda análise do afluente e dos efluentes	93
Figura 54	Variações dos resultados de condutividade elétrica na terceira análise do afluente e dos efluentes	93
Figura 55	Variações dos resultados de DQO na primeira análise do afluente e dos efluentes	94
Figura 56	Variações dos resultados de DQO na segunda análise do afluente e dos efluentes	95
Figura 57	Variações dos resultados de DQO na terceira análise do afluente e dos efluentes	95
Figura 58	Variações dos resultados de dureza na primeira análise do afluente e dos efluentes	97
Figura 59	Variações dos resultados de dureza na segunda análise do afluente e dos efluentes	97
Figura 60	Variações dos resultados de dureza na terceira análise do afluente e dos efluentes	98
Figura 61	Variações dos resultados de alcalinidade na primeira análise do afluente e dos efluentes	99
Figura 62	Variações dos resultados de alcalinidade na segunda análise do afluente e dos efluentes	99
Figura 63	Variações dos resultados de alcalinidade na terceira análise do afluente e dos efluentes	100
Figura 64	Variações dos resultados de cloretos na primeira análise do afluente e dos efluentes	101
Figura 65	Variações dos resultados de cloretos na segunda análise do afluente e dos efluentes	101
Figura 66	Variações dos resultados de cloretos na terceira análise do afluente e dos efluentes	102
Figura 67	Variações dos resultados de coliformes totais na primeira análise do afluente e dos efluentes	102
Figura 68	Variações dos resultados de coliformes totais na segunda análise do afluente e dos efluentes	103

Figura 69	Variações dos resultados de coliformes totais na terceira análise do afluente e dos efluentes	103
Figura 70	Variações dos resultados de coliformes termotolerantes na primeira análise do afluente e dos efluentes	103
Figura 71	Variações dos resultados de coliformes termotolerantes na segunda análise do afluente e dos efluentes	104
Figura 72	Variações dos resultados de coliformes termotolerantes na terceira análise do afluente e dos efluentes	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Características físicas das águas residuais domésticas	25
Quadro 2	Parâmetros biológicos das águas residuais domésticas	26
Quadro 3	Características químicas das águas residuais domésticas	27
Quadro 4	Riscos inerentes ao lançamento de águas residuais em recursos hídricos	29
Quadro 5	Espécies de macrófitas empregadas nos sistemas	37
Quadro 6	Mecanismos de tratamento de águas residuais pelo sistema <i>wetland</i> construído	41
Quadro 7	Estudos experimentais sobre sistemas <i>wetlands</i> construídos no Brasil	44
Quadro 7 (Continuação)	Estudos experimentais sobre sistemas <i>wetlands</i> construídos no Brasil	45
Quadro 7 (Continuação)	Estudos experimentais sobre sistemas <i>wetlands</i> construídos no Brasil	46
Quadro 8	Tipos de reuso de águas, classificação do uso e definição	48
Quadro 9	Unidades contribuintes de efluente bruto para o sistema <i>wetland</i> construído	56
Quadro 10	Pontos de coleta das amostras do sistema <i>wetland</i> construído	68
Quadro 11	Procedimentos simplificados das análises físicas, químicas e biológicas	71
Quadro 11 (Continuação)	Procedimentos simplificados das análises físicas, químicas e biológicas	72
Quadro 11 (Continuação)	Procedimentos simplificados das análises físicas, químicas e biológicas	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros básicos para águas de reuso	51
Tabela 2	Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 1	51
Tabela 3	Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 2	51
Tabela 4	Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 3	52
Tabela 5	Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 4	52
Tabela 6	Dimensões das unidades da estação de tratamento de efluentes	61
Tabela 7	Variáveis meteorológicas dos dias de coleta	77
Tabela 8	Variáveis meteorológicas semanais das coletas	77
Tabela 9	Composição do afluente do sistema <i>wetland</i> construído coletado nas bombonas (P1) e valores de referência	79
Tabela 10	Composições física, química e biológica das amostras de afluente e efluentes tratados do sistema <i>wetland</i> construído, no dia 13/11/2018	81
Tabela 11	Composições física, química e biológica das amostras de afluente e efluentes tratados do sistema <i>wetland</i> construído, no dia 21/11/2018	81
Tabela 12	Composições física, química e biológica das amostras de afluente e efluentes tratados do sistema <i>wetland</i> construído, no dia 24/11/2018	82
Tabela 13	Resultados dos parâmetros avaliados para águas de reuso	105
Tabela 14	Resultados dos parâmetros avaliados para águas de reuso	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
CE	Condutividade elétrica
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
EPTEP	Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgotos com Plantas
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
IFG	Instituto Federal de Goiás
NBR	Norma Brasileira
OD	Oxigênio dissolvido
SAC	Sistema alagado construído
SEINFRA	Secretária de Infraestrutura
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SST	Sólidos suspensos totais
UFG	Universidade Federal de Goiás
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UN-HABITAT	<i>United Nations Human Settlements Programme</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	Águas residuais.....	23
2.1.1	Águas residuais domésticas.....	23
2.1.2	Águas residuais industriais.....	24
2.1.3	Contribuições indevidas ao sistema de esgotamento sanitário	24
2.1.4	Composição das águas residuais.....	25
2.1.5	Riscos inerentes às águas residuais	28
2.2	Sistema <i>wetland</i> construído	29
2.2.1	Classificação do sistema <i>wetland</i> construído	31
2.2.2	Componentes do sistema <i>wetland</i> construído.....	34
2.2.2.1	Meio suporte.....	35
2.2.2.2	Macrófitas.....	36
2.2.3	Mecanismos de tratamento	38
2.2.4	Estudos experimentais	41
2.3	Reuso de águas residuais	47
2.3.1	Padrões de qualidade da água de reuso.....	50
2.3.2	Reuso para fins não potáveis.....	53
2.3.2.1	Reuso agrícola	53
2.3.2.2	Reuso industrial.....	53
2.3.2.3	Reuso urbano	54
2.3.2.4	Reuso doméstico.....	54
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.1	Caracterização do local de estudo.....	55
3.1.1	Estação experimental de tratamento de esgotos	56
3.2	Avaliação e reativação do sistema	58
3.2.1	Alimentação do sistema: Efluente bruto	61
3.2.2	Unidades anteriores ao sistema <i>wetland</i> construído	62
3.2.3	Leito com plantas	63

3.2.3.1	Meio suporte (filtrante) dos leitos.....	64
3.2.3.2	Macrófitas dos leitos.....	65
3.2.4	Unidades de polimento.....	67
3.3	Caracterização do afluente e efluentes do sistema.....	68
3.3.1	Caracterização quantitativa do afluente	69
3.3.2	Caracterização qualitativa do afluente bruto e dos efluentes tratados	70
3.4	Análise do potencial de reuso do efluente tratado.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	Avaliação e reativação do sistema	75
4.2	Caracterização dos materiais dos leitos e dos filtros	75
4.3	Leito com plantas	76
4.4	Caracterização do afluente e efluentes do sistema.....	77
4.4.1	Variáveis meteorológicas	77
4.4.2	Caracterização quantitativa	78
4.4.3	Caracterização qualitativa	79
4.4.3.1	Cor aparente.....	83
4.4.3.2	Turbidez.....	85
4.4.3.3	Sólidos suspensos totais	87
4.4.3.4	Sólidos dissolvidos totais.....	89
4.4.3.5	Condutividade elétrica	91
4.4.3.6	Demanda química de oxigênio	94
4.4.3.7	Potencial hidrogeniônico (pH).....	96
4.4.3.8	Dureza e alcalinidade	96
4.4.3.9	Cloretos	100
4.4.3.10	Coliformes totais e termotolerantes	102
4.5	Análise do potencial de reuso do efluente tratado.....	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS.....	109
	APÊNDICE A – Caracterização da amostra de brita por peneiramento (NBR NM 248:2003).....	114
	APÊNDICE B – Caracterização da amostra de areia por peneiramento (NBR NM 248:2003).....	115
	APÊNDICE C – Caracterização da amostra de solo por peneiramento e sedimentação (NBR 7181:2016)	116
	APÊNDICE D – Caracterização da amostra de solo por peneiramento e sedimentação (NBR 7181:2016)	117

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações responsáveis pela promoção do desenvolvimento urbano e qualidade de vida da população de uma determinada comunidade. As atividades a serem compreendidas pelo saneamento básico são o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e a drenagem e manejo de águas pluviais, ambas instituídas pela legislação brasileira (BRASIL, 2007).

Cabe à administração pública oferecer os serviços de saneamento. A Lei nº 11.445 estabelece que o esgotamento sanitário deve integrar os sistemas de coleta, transporte e tratamento nas estações de tratamento, e disposição final adequada (BRASIL, 2007; UNESCO, 2017). Entretanto, esses serviços ainda não são ofertados para toda a população, promovendo índices elevados de esgotos não coletados e não tratados (ANA, 2017).

Assim, com o passar do tempo as preocupações no campo do saneamento passaram a incorporar não somente questões de ordem sanitária, mas também ambiental. Quando os efluentes sanitários não são tratados adequadamente, o lançamento destes nos corpos receptores ocasiona a poluição de bacias hidrográficas, a proliferação de doenças de veiculação hídrica, e ainda, inviabiliza o uso destas águas para o abastecimento público (ANA, 2017).

Concomitante a contaminação de bacias, o consumo de água e a geração de resíduos, líquidos e sólidos, têm aumentado como reflexo da expansão urbana, do desenvolvimento econômico e das mudanças de hábitos da população. Frente a esta situação, o reuso de água tem sido incorporado como parte do saneamento básico, conjuntamente com a coleta, transporte e tratamento do esgoto.

O reuso de águas residuais é uma técnica segura e confiável, sendo uma parte importante na gestão dos recursos hídricos. Essa prática requer a adoção de medidas de tratamento adequado, com o objetivo de atender aos requisitos legais e padrões de qualidade da água de reuso. Além destes, a reutilização da água ainda depende de outros fatores, como a aceitação dos usuários, aprovação mercadológica e políticas de reconhecimento como tecnologia sustentável (MANCUSO; SANTOS, 2003; NUVOLARI, 2011).

O tratamento de esgotos pode ser realizado por meio de processos naturais ou artificiais. Ambos se diferenciam pelos custos relativos à implantação, operação e manutenção (IMHOFF, 2002). O uso de alternativas ecológicas, eficientes e economicamente viáveis no tratamento de esgotos tem aumentado, a fim de suprir a carência de saneamento básico.

Estudos têm demonstrado a eficiência do sistema *wetland* construído na remoção de diversos atributos poluentes do esgoto bruto. Tal benefício pode proporcionar diversas vantagens à situação atual de regiões sem esgotamento sanitário ou regiões com racionalização e escassez de água, possibilitando o reuso das águas recuperadas (PITALUGA *et al.*, 2015; QUELUZ, 2016).

Portanto, a pesquisa em questão se insere na área de Saneamento Básico, tendo como tema a avaliação do potencial de reuso do efluente tratado por sistema *wetland* construído. Para delinear o estudo, o presente trabalho está estruturado em quatro capítulos. O presente, Capítulo 1, trata sobre a introdução, abordando a justificativa e os objetivos para o desenvolvimento da pesquisa.

Na sequência, o Capítulo 2, traz a revisão de literatura, que começa com a definição dos tipos de esgotos e em seguida, aborda os assuntos relacionados ao reuso de águas residuais, caracterizando os padrões de qualidade destas. Posteriormente, se encerra o capítulo com a revisão sobre o sistema *wetland* construído, trazendo a classificação, os componentes e os mecanismos de tratamento dos efluentes sanitários pelo sistema. O Capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida para alcançar os objetivos desta pesquisa, sendo dividida por etapas de execução. O Capítulo 4 aborda os resultados e discussão referidos aos métodos adotados. Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações da avaliação do potencial de reuso do efluente tratado por sistema *wetland* construído.

1.1 Justificativa

Segundo o Atlas Esgotos (ANA, 2017), as áreas urbanas têm índices de cobertura insatisfatórios relativos ao esgotamento sanitário. Somente 61,40% da população urbana brasileira é atendida pelas redes coletoras de esgoto, destes, 42,60% dos esgotos são coletados e tratados e 18,80% não são favorecidos pelo tratamento. A

parcela restante de esgotos não coletados e não tratados representa 38,60%. Verifica-se que estes são destinados para fossas sépticas, lançamento em rede de águas pluviais, destinação direta no solo ou nos corpos d'água, conforme mostrado na Figura 1.

Os índices do esgotamento sanitário em zonas rurais são relativamente mais baixos comparados à zona urbana, em virtude da extensão e da distância entre as propriedades. Nessas localidades desprovidas de redes coletoras de esgoto são adotadas soluções individuais para coleta e descarte de efluentes sanitários, como fossas rudimentares e fossas sépticas (FUNASA, 2017).

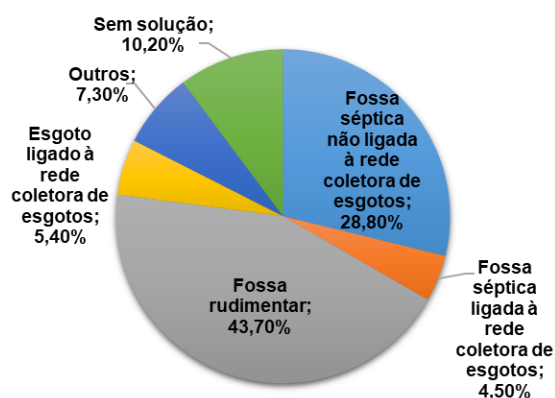
As fossas rudimentares, também chamadas de fossas negras, são estruturas que permitem a infiltração de esgoto sanitário no solo, sendo assim não são unidades de tratamento, podendo promover a contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Já, as fossas sépticas, quando executadas corretamente, evitam a contaminação dessas águas. Todavia, os efluentes provenientes dessas unidades não podem ser reciclados para fins não-potáveis (VALENTIM, 2003; COSTA; GUILHOTO, 2014). Na Figura 2 são apresentadas as soluções de coleta e tratamento de esgoto sanitário em zonas rurais.

Figura 1 Índices de cobertura urbana de esgotos no Brasil



Fonte: ANA (2017).

Figura 2 Esgotamento sanitário nas zonas rurais brasileiras



Fonte: FUNASA (2017).

Em Goiás, constituído de 246 municípios com uma população de aproximadamente 5,9 milhões, o índice de atendimento do esgotamento sanitário está ilustrado na Figura 3. A coleta e tratamento do esgoto sanitário atende 47,85% da região, e 52,15% do

Estado engloba as situações em que os efluentes são coletados e não tratados, não coletado e não tratado e solução individual (ANA, 2017).

Figura 3 Índices de atendimento do esgotamento sanitário em Goiás



Fonte: ANA (2017).

Diante dos grandes percentuais da inexistência de rede coletora e tratamento adequado dos efluentes sanitários, verifica-se que a qualidade da água das bacias hidrográficas tem sido prejudicada, em virtude do lançamento de esgotos. Essa prática causa impactos negativos na qualidade de vida da população, com a disseminação de doenças pela água e a eutrofização dos corpos hídricos, além de inviabilizar os múltiplos usos da água (ANA, 2017).

Juntamente com os problemas de descarte inadequado de efluentes sanitários domésticos, diversas regiões têm enfrentado graves crises hídricas e a racionalização de água potável, o que demonstra a necessidade do tratamento de águas residuais, a fim de possibilitar a sua reutilização. O reuso do efluente tratado promove economia de consumo de água em atividades que não requerem sua potabilidade, reduzindo os problemas de escassez hídrica, e atuando na diminuição dos impactos causados ao meio ambiente (TELLES; COSTA, 2010).

Como alternativa acessível à população e benéfica ao meio ambiente, tem-se os sistemas de tratamento de efluentes do tipo *wetlands* construídos, que são sistemas artificiais que imitam o que ocorre na natureza. Este sistema é constituído por substratos, plantas típicas de áreas semi ou alagadas, microrganismos e coluna d'água (VALENTIM, 2003; PITALUGA *et al.*, 2015).

Essa tecnologia pode ser aplicada no tratamento de águas residuais, a fim de possibilitar o reuso de efluentes tratados para fins não potáveis, como irrigação de plantas frutíferas, de jardins e parques, descargas sanitárias, lavagem de veículos, lavagem de calçadas e outras aplicações. Tal benefício pode proporcionar diversas vantagens à situação atual de regiões sem esgotamento sanitário e regiões com racionalização e escassez de água.

Em um mundo no qual as demandas por água doce aumentam de forma contínua, e onde os já limitados recursos hídricos sofrem cada vez mais a pressão pela sobre-exploração, pela poluição e pela mudança climática, negligenciar as oportunidades que decorrem de uma melhor gestão das águas residuais é simplesmente inconcebível no contexto de uma economia circular (UNESCO, 2017, p. 12).

Diante do exposto, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas científicas, com embasamento teórico e experimental, para a comprovação dos benefícios relacionados ao reuso de águas residuais através do sistema *wetland* construído. Portanto, este trabalho se justifica por avaliar o potencial de reuso das águas residuais tratadas por leito com plantas, verificando a possibilidade de aplicação destas águas recuperadas em fins não potáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem por objetivo geral a avaliação do potencial de reuso de efluentes tratados por sistema *wetland* construído de uma unidade universitária.

1.2.2 Objetivos específicos

Para a realização do objetivo geral foram definidos os objetivos específicos a serem alcançados ao final do trabalho:

- Retomar as atividades de pesquisa na Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgotos com Plantas, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás,

adotando novos arranjos e modificando o fluxograma das unidades de tratamento do sistema;

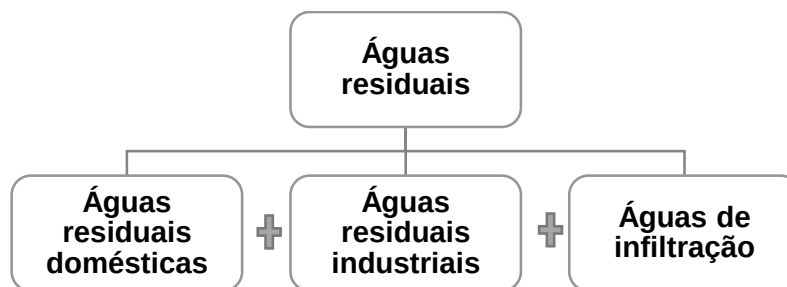
- Mensurar a contribuição quantitativa e caracterizar qualitativamente o afluente, da unidade universitária, e os efluentes do sistema;
- Comparar os resultados das análises dos efluentes tratados com os limites normativos para águas de reuso, determinando seu potencial de reuso.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Águas residuais

As águas residuais, também conhecidas como águas servidas, residuárias ou esgotos sanitários, são classificadas quanto à sua origem, a saber, em esgotos domésticos e esgotos industriais (ANA, 2005). A Norma NBR 9689 (ABNT, 1986) especifica que os esgotos sanitários são constituídos de águas residuais provenientes de atividades domésticas e industriais, águas de infiltração e águas pluviais parasitárias, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 Classificação das águas residuais



Fonte: Adaptado de ANA (2005).

As águas residuais domésticas e industriais são as principais fontes alimentadoras das estações de tratamento de esgotos (ETE). Por sua vez, o sistema de esgotamento ainda recebe as contribuições indevidas, oriundas da infiltração de águas do subsolo e águas pluviais de escoamento superficial que são lançadas nas tubulações das redes coletoras de esgoto por terceiros (TELLES; COSTA, 2010; NUVOLARI, 2011).

2.1.1 Águas residuais domésticas

De acordo com a ANA (2005) e FUNASA (2015), as águas residuais domésticas podem ser classificadas em águas negras e águas cinzas, provenientes de estabelecimentos residenciais e comerciais, de instituições públicas e privadas. Com base na origem, estas águas são conceituadas em:

- Águas negras: Parcela de efluentes domésticos oriundos de instalações sanitárias e da cozinha, sendo estes constituídos de dejetos humanos, como urina e fezes, e óleos e graxas, respectivamente;
- Águas cinzas: Parcela de águas provenientes de atividades domésticas, como uso de chuveiros, banheiras, lavatórios, lavagens de pisos e outros.

Gonçalves (2009) ainda distingue as águas residuais oriundas de mictórios e dispositivos coletores que separam a urina de dejetos humanos, como águas amarelas.

2.1.2 Águas residuais industriais

As águas residuais industriais abrangem os efluentes provenientes de processos de diversos ramos, como indústria de alimentos, matadouros, de metais, químicas, de cerâmica, água de refrigeração e de tanto outras, bem como uma parcela vinculada às instalações sanitárias comuns das indústrias (ABNT, 1986).

Quando o lançamento de efluentes destina-se à rede pública de esgoto, essas águas contaminadas devem ser submetidas a cuidados especiais para ter qualidade e quantidade aceitável pela legislação vigente. Caso os padrões de qualidade não atendam às diretrizes do órgão ambiental, estas águas residuais industriais devem ser tratadas preliminarmente para serem lançadas na rede pública (BRASIL, 2015).

2.1.3 Contribuições indevidas ao sistema de esgotamento sanitário

As vazões de infiltração são constituídas de águas do subsolo que percolam entre as juntas de tubulações, nas imperfeições das paredes dos condutos e pelas estruturas complementares do sistema, como poços de visita, estações elevatórias e outros. Enquanto a contribuição pluvial parasitária decorre da infiltração de águas de chuva nas redes coletoras de esgoto, além de práticas clandestinas relacionadas às ligações de tubulações prediais e interligação de galerias de águas pluviais ao sistema (TELLES; COSTA, 2010; NUVOLARI, 2011).

2.1.4 Composição das águas residuais

As águas residuais são constituídas, basicamente, de 99,87% de água de abastecimento usada no transporte do esgoto das unidades contribuintes, 0,04% de sólidos sedimentáveis, 0,02% de sólidos não sedimentáveis e 0,07% de sólidos dissolvidos, representando uma parcela de 0,13% de sólidos (SPERLING; 2005; NUVOLARI, 2011).

A composição do esgoto varia conforme a quantidade de água consumida por habitante ao longo do dia, assim como os hábitos da população, condições climáticas, situação social e econômica, e ainda pela contribuição da infiltração de águas pluviais ou do subsolo nas redes coletoras (IMHOFF, 2002; SPERLING, 2005). Os diversos processos de tratamento de efluentes sanitários podem ser justificados pela diversidade de sua composição, exigindo o emprego de processos físicos, químicos e biológicos, a depender da destinação final destes efluentes (IMHOFF, 2002; TELLES; COSTA, 2010).

Sperling (2005) explica que a avaliação da qualidade do esgoto bruto define o potencial da sua carga poluidora e as condições de tratamento dessas águas residuais, as quais podem ser definidas por meio de parâmetros físicos, químicos e biológicos. No Quadro 1 é representado as principais características físicas dos efluentes residuais domésticos.

Quadro 1 Características físicas das águas residuais domésticas	
Parâmetro físico	Descrição
Cor	- Esgoto fresco: Amarela-acinzentada ou branca-acinzentada; - Esgoto séptico: Cinza escura ou preta.
Odor	- Esgoto fresco: Cheiro relativamente desagradável, pois os poluentes ainda não estão em real decomposição; - Esgoto séptico: Odor fétido, em virtude do gás sulfídrico e outros poluentes. - Esgoto industrial: Odor característico
Temperatura	Acelera a decomposição da carga poluidora do esgoto, influenciando diretamente na atividade microbiana, solubilidade dos gases, velocidade das reações químicas e viscosidade.
Turbidez	Propriedade causada pela presença de sólidos suspensos no esgoto, promovendo a redução de sua transparência.

Fonte: Adaptado de Sperling (2005).

Quanto aos parâmetros biológicos, os microrganismos são fundamentais na degradação da matéria orgânica dos efluentes sanitários, além de serem responsáveis pela transmissão de doenças vinculadas à água. Nas águas residuais, os organismos patogênicos mais encontrados são as bactérias, vírus, protozoários e helmintos. Devido a diversidade desses organismos utiliza-se microrganismos indicadores, como as bactérias do tipo coliforme, as quais são organismos não patogênicos identificados em grande proporção nas fezes humanas e têm resistência superior aos organismos patogênicos (SPERLING, 2005).

Segundo Sperling (2005), ambos processos de remoção de organismos patogênicos e não patogênicos são considerados semelhantes, o que permite a utilização dos parâmetros indicadores de coliformes nas análises de qualidade da água. Além disso, as análises são economicamente baratas e rápidas. No Quadro 2 são retratados os principais indicadores de contaminação avaliados nas águas residuais domésticas

Quadro 2 Parâmetros biológicos das águas residuais domésticas	
Parâmetro biológico	Descrição
Coliformes totais (CT)	Bactérias indicadoras da eficiência do tratamento de água, este indicador é pouco avaliado em efluentes sanitários.
Coliformes termotolerantes	Bactérias indicadoras da presença de organismos provenientes de dejetos humanos e animais. • <i>Escherichia coli</i> (EC): Principal bactéria do grupo coliformes termotolerantes, indicando a contaminação fecal no esgoto.

Fonte: Adaptado de Sperling (2005).

No Quadro 3 estão apresentadas as principais características químicas das águas residuais domésticas.

Quadro 3**Características químicas das águas residuais domésticas**

Parâmetro químico	Classificação/Forma	Descrição
SÓLIDOS TOTAIS	Tamanho	- Sólidos em suspensão: Partículas orgânicas e inorgânicas retidas em filtros de papel com aberturas padronizadas. - Sólidos dissolvidos: Partículas orgânicas e inorgânicas que não são retidas em filtros de papel, abrangendo os sólidos coloidais.
	Características químicas	- Sólidos voláteis: Parcela de matéria orgânica dos sólidos em suspensão e dissolvidos. - Sólidos fixos: Parcela de matéria inorgânica dos sólidos em suspensão e dissolvidos.
	Sendimentabilidade	- Sólidos sedimentáveis: Partículas orgânicas e inorgânicas que se sedimentam em até 1 hora. - Sólidos não sedimentáveis: Partículas orgânicas e inorgânicas que não se sedimentam em até 1 hora.
MATÉRIA ORGÂNICA	Métodos de medição indireta	- Demanda bioquímica de oxigênio (DBO): Representa a quantidade de oxigênio consumido pelos microrganismos durante a oxidação bioquímica da matéria orgânica carbonácea. - Demanda química de oxigênio (DQO): É a quantidade de oxigênio requerida na oxidação química da matéria orgânica carbonácea.
	Métodos de medição direta	Carbono orgânico total (COT): Medida direta da degradação da matéria orgânica carbonácea.
NITROGÊNIO	Nitrogênio total	Representa a parcela constituída de nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato. - Nitrogênio orgânico: Nitrogênio na forma de proteínas, aminoácidos e ureia. - Amônia: Produto da primeira reação de decomposição do nitrogênio orgânico; - Nitrito: Produto intermediário da oxidação da amônia; - Nitrato: Produto da redução do nitrito, ou produto final da oxidação da amônia.
	Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	Representa a parcela constituída de nitrogênio orgânico e amônia.
FÓSFORO	Fósforo total	- Orgânico: Associado à matéria orgânica; - Inorgânico: Parcela representativa de detergentes e outros produtos químicos, compostos de polifosfatos e ortofosfatos.
pH		Denomina-se potencial hidrogeniônico, o qual representa a concentração de íons de hidrogênio no esgoto, caracterizando-o com características ácidas ou básicas
ALCALINIDADE	-	Corresponde à parcela de bicarbonato, carbonato e íons hidroxila, responsáveis pela neutralização de ácidos.
CLORETOS	-	Produtos vindos da água de abastecimento e das excretas humanas.
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	-	Medida da capacidade do líquido em conduzir corrente elétrica por meio de íons em solução.
ÓLEOS E GRAXAS	-	Parcela orgânica solúvel em hexanos, sendo substâncias provenientes de atividades domésticas na cozinha.

Fonte: Adaptado de Sperling (2005).

2.1.5 Riscos inerentes às águas residuais

A contaminação de corpos receptores afeta a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, gerando diversos problemas sociais e ambientais. Junto à poluição das bacias hidrográficas com elevados percentuais de carga orgânica e nutrientes, a falta de saneamento básico deixa os usuários vulneráveis às doenças que podem ser transmitidas pelo contato direto com as águas residuais, acarretando problemas de saúde pública. O município deve mitigar esses impactos por meio da coleta e tratamento adequado de esgoto sanitário, e também avaliar a capacidade de diluição dos corpos receptores (ANA, 2017).

De acordo com Sperling (2005), a poluição hídrica por águas residuais é consequência da descarga indevida e da falta de tratamento de substâncias poluidoras; estas são capazes de alterar o grau de pureza de cursos d'água, inviabilizando seu uso. Os principais problemas que envolvem a contaminação das águas são a excessiva carga de matéria orgânica, a presença de microrganismos patogênicos e nutrientes.

Antes do lançamento de efluentes, o meio aquático está condicionado a um estado de equilíbrio. Quando a carga poluidora é inserida ao corpo hídrico, ocorrem alterações no ecossistema que promovem a seleção de espécies resistentes ao novo meio. O retorno do ambiente modificado ao seu estado natural de equilíbrio depende do balanceamento das fontes de produção de oxigênio e consumo, bem como, da presença de nutrientes (IMHOFF, 2002).

Quando os efluentes sanitários são lançados sem o devido tratamento, os corpos receptores podem exceder sua capacidade de autodepuração e, tratando-se de cursos d'água, a quantidade de oxigênio dissolvido é reduzida. Em ambientes aquáticos, a presença de oxigênio dissolvido é essencial para a sobrevivência dos microrganismos responsáveis pelos processos de degradação (NUVOLARI, 2011).

De forma geral, no Quadro 4 são apresentados os prejuízos causados pelo lançamento de águas residuais em corpos hídricos e suas respectivas consequências.

Quadro 4

Riscos inerentes ao lançamento de águas residuais em recursos hídricos

Ameaças	Riscos
Matéria orgânica	Dependendo da composição do efluente lançado no corpo hídrico pode ocorrer a redução ou eliminação do oxigênio dissolvido presente na água. Quando tratado, sua composição deve estar adequada à capacidade de depuração do curso d'água.
Metais pesados	Determinadas concentrações desses compostos químicos na água promovem o desenvolvimento de toxicidade no meio, que resulta em diversos problemas aos seres animais e vegetais, sendo transferido ao longo da cadeia alimentar.
Microrganismos patogênicos	Seres responsáveis pela disseminação de doenças pela veiculação hídrica. Os principais grupos são bactérias, vírus e protozoários.
Nutrientes	O excesso dessas substâncias é responsável pelo aumento de eutrofização nos cursos hídricos.

Fonte: Nuvolari (2011).

2.2 Sistema *wetland* construído

As tecnologias sustentáveis de tratamento de águas residuais vêm ganhando relevância e importância no meio científico, dentre essas, os sistemas *wetlands* construídos, com a finalidade de melhorar a qualidade de efluentes e recursos hídricos por intermédio do controle da poluição. Esses sistemas podem ser aplicados para recuperação de águas municipais, residenciais e industriais, águas pluviais e de águas superficiais, além do tratamento de resíduos minerais e animais (KADLEC; WALLACE, 2008).

Os sistemas *wetlands* construídos, também denominados de sistemas alagados construídos (SACs), podem ser definidos como ecossistemas artificiais compostos de plantas aquáticas em substratos de materiais inertes, que operam com condições de controle impostas ao meio, com a finalidade de reduzir a quantidade de contaminantes em águas ou efluentes sanitários (VALENTIM, 2003; SALATI, 2006; POÇAS, 2015).

No Brasil, Salati e Rodrigues (2006) desenvolveram estudos sobre os sistemas *wetlands* construídos para recuperação dos recursos hídricos. O primeiro projeto foi realizado pela construção de um lago artificial nas proximidades do Rio Piracicamirim de carga poluidora elevada, em Piracicaba/SP. Verificou-se a despoluição do rio, por meio de aguapés, com a redução de 90% dos resíduos fenóis, detergentes, biocidas,

óleos e graxas. A partir desta, outras pesquisas têm sido realizadas para o aprimoramento do sistema no tratamento de efluentes industriais e domésticos, buscando a redução de custos.

Fora do Brasil, os estudos desenvolvidos por Kadlec e Wallace (2008) identificaram a aplicação desta tecnologia em vários continentes do mundo, citando vários países envolvidos nessa prática, tais como: Europa (Irlanda, Áustria, França, Alemanha e Dinamarca), América (Estados Unidos, Canadá, Peru, Colômbia, Honduras, Equador, Uruguai e Argentina), Oceania (Austrália e Nova Zelândia), Ásia (China, Japão, Nepal, Malásia e Índia) e África (Egito, Marrocos e África do Sul).

De acordo com Wetzel (1993), nas últimas décadas, as pesquisas inerentes ao tratamento de águas residuais com *wetlands* construídos têm demonstrado a eficiência na remoção de poluentes e nutrientes dessas águas, vinculado ao baixo custo de implantação e operação. Os processos físicos, químicos e biológicos envolvem condições naturais do meio, dependendo basicamente do tipo de efluente a ser recuperado, da finalidade do tratamento e das condições ambientais da região.

Os *wetlands* naturais são ecossistemas de alta produtividade biológica por serem constituídas de água em abundância, juntamente com as espécies animais típicas destes ambientes. Por necessitar de controle dos fluxos de entrada nesses ecossistemas, as terras úmidas naturais não adequadas para o tratamento de águas residuais, além de existir políticas conservacionistas e restritivas ao seu uso (CAMPOS, 1999).

Em razão desses fatores, os sistemas *wetlands* construídos assemelham-se aos ambientes naturais, tendo características semelhantes como a capacidade de purificação hídrica, adquirida pela transformação de poluentes em subprodutos inócuos, os quais podem ser reaproveitados, diferindo dos ecossistemas naturais somente pelas condições de controle impostas ao meio (KADLEC; WALLACE, 2008).

De acordo com Brix (1993) e Salati (2006), por se tratar de uma tecnologia sustentável, a qual se desenvolve em meio natural sob condições controláveis, a aplicação de *wetlands* construídos possui mais vantagens do que desvantagens. Entre as vantagens destes sistemas, comparados aos sistemas convencionais como as estações de tratamento de esgoto, estão relacionadas ao baixo custo de construção,

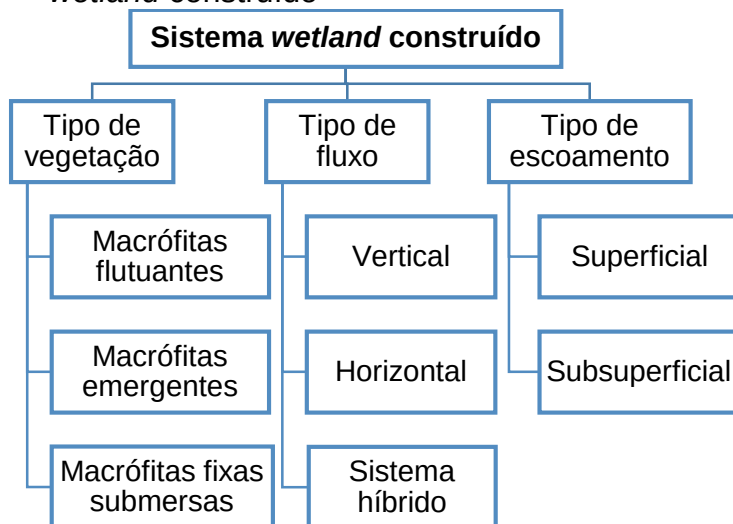
baixa demanda energética, boa eficiência na melhoria de qualidade da água e flexibilidade do sistema. Como desvantagens pode-se destacar a necessidade de áreas maiores para instalação da tecnologia e a ineficiência em regiões com baixas temperaturas.

Para o adequado funcionamento do sistema *wetland* construído deve-se implantar unidades de tratamento preliminar. Em pequenas comunidades, opta-se pelo uso de unidades mais simples de pré-tratamento, como tanques sépticos e filtros biológicos, capazes de remover sólidos sedimentáveis pelo processo de decantação, evitando problemas de colmatção precoce nos leitos com plantas (UN-HABITAT, 2008; PITALUGA *et al.*, 2015).

2.2.1 Classificação do sistema *wetland* construído

Conforme Kadlec e Wallace (2008), os sistemas podem ser classificados quanto ao tipo de vegetação ou à configuração de fluxo, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 Esquema representativo da classificação do sistema *wetland* construído



Fonte: Adaptado de Kadlec e Wallace (2008).

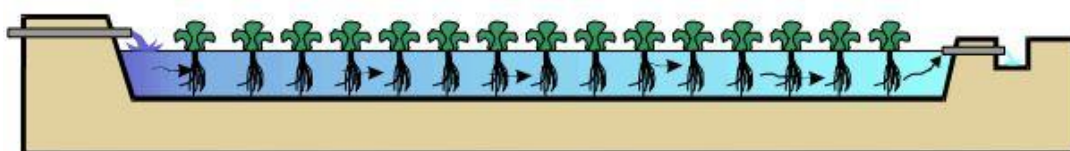
Além destas classificações, esses sistemas podem, ainda, ser classificados pelo tipo de efluente sanitário a ser tratado, tipo de substrato (brita, areia, solo e outros), tipo de tratamento (primário, secundário ou terciário), tipo de configuração das células (único estágio ou múltiplos estágios). A princípio, as categorias relacionadas ao fluxo

e à vegetação são usualmente as mais utilizadas para *wetlands* construídos na literatura científica (UN-HABITAT, 2008).

Em relação ao tipo de vegetação, os sistemas podem ser classificados em sistemas que utilizam macrófitas aquáticas flutuantes, macrófitas emergentes e macrófitas submersas.

- Macrófitas flutuantes: Plantas aquáticas com raízes ou não, cujas folhas ficam flutuando sobre a superfície da água (Figura 6). Estas são bastante utilizadas em canais longos, estreitos e rasos, podendo ser associadas a outras espécies no tratamento.

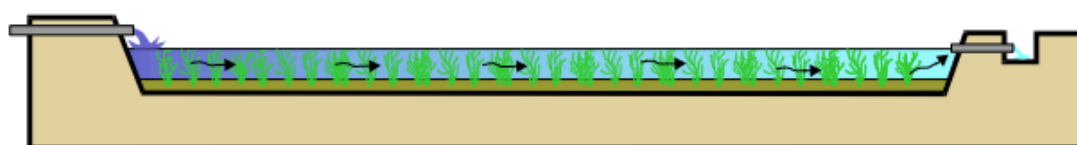
Figura 6 Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas flutuantes, com fluxo superficial



Fonte: Salati (2006).

- Macrófitas submersas: Plantas aquáticas que vivem completamente abaixo da água, sem exposição ao sol (Figura 7). Geralmente, são empregadas em canais estreitos e longos.

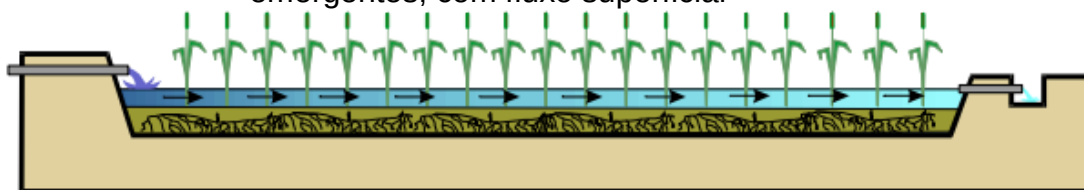
Figura 7 Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas submersas, com fluxo superficial



Fonte: Salati (2006).

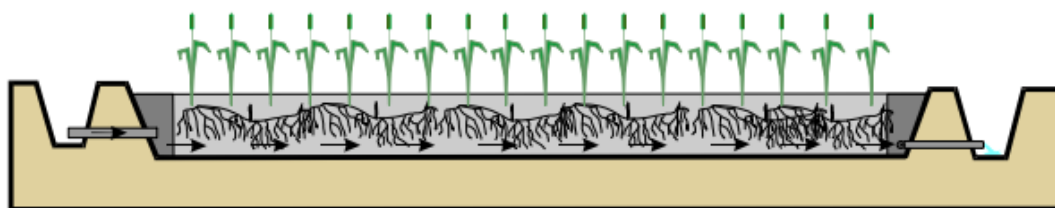
- Macrófitas emergentes: Plantas aquáticas enraizadas no substrato com parte do caule e folhas submergidos na água, variando as condições de escoamento, em superficial (Figura 8) e subsuperficial, do tipo horizontal (Figura 9) ou vertical (Figura 10), e destinadas a canais longos (VALENTIM, 2003; BRIX, 1993; SALATI, 2006).

Figura 8 Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas emergentes, com fluxo superficial



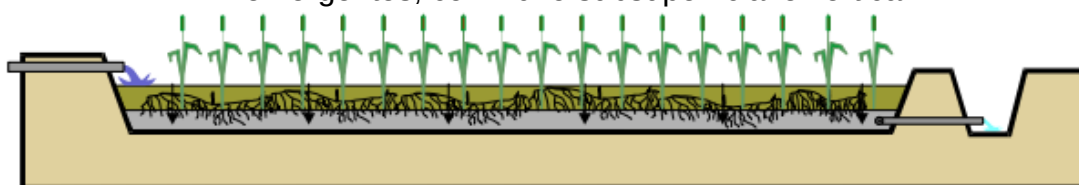
Fonte: Salati (2006).

Figura 9 Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas emergentes, com fluxo subsuperficial e horizontal



Fonte: Salati (2006).

Figura 10 Desenho esquemático de um canal com plantas aquáticas emergentes, com fluxo subsuperficial e vertical



Fonte: Salati (2006).

Complementando os sistemas citados, segundo *United Nations Human Settlements Programme* (2008), estes podem ser categorizados conforme a direção de escoamento:

- Fluxo horizontal: Com a entrada do efluente no sistema, sua movimentação horizontal ocorre lentamente pelos interstícios do substrato até atingir a saída. Durante esse processo, o efluente passa por zonas aeróbicas e anaeróbicas, as primeiras são predominantes nas raízes das plantas aquáticas. Graças às reações físicas, químicas e biológicas, promove-se a redução de poluentes orgânicos e boa remoção de nitratos, porém é limitado na remoção de outros nutrientes, como nitrogênio;

- Fluxo vertical: O efluente é alimentado intermitentemente pelo topo do sistema, percolando-se pelo substrato e vegetação e saindo pela base. Possui grande capacidade de transferência de oxigênio, permitindo uma melhor nitrificação, e boa remoção de carga orgânica e patogênicos. Estes sistemas ocupam áreas menores que os de fluxo horizontal;
- Sistema híbrido: Combinação dos fluxos horizontal e vertical no sistema.

De acordo com Salati (2006) e UN-HABITAT (2008), esta classificação pode-se subdividir em aos fluxos superficial e subsuperficial e têm as seguintes características:

- Fluxo superficial: Canais em que a superfície da água está exposta à atmosfera, possuindo uma barreira de solo, depositada ao fundo. Utiliza-se plantas aquáticas emergentes, submersas e flutuantes para compor este sistema.
- Fluxo subsuperficial: Canais preenchidos com material filtrante, brita ou areia, em que não há contato direto do fluido (água) com o ar. O desenvolvimento das raízes ocorre no meio suporte, sendo tipicamente utilizados as plantas aquáticas emergentes. Este tipo de escoamento pode ser horizontal ou vertical, sendo que este último pode ser descendente ou ascendente.

2.2.2 Componentes do sistema *wetland* construído

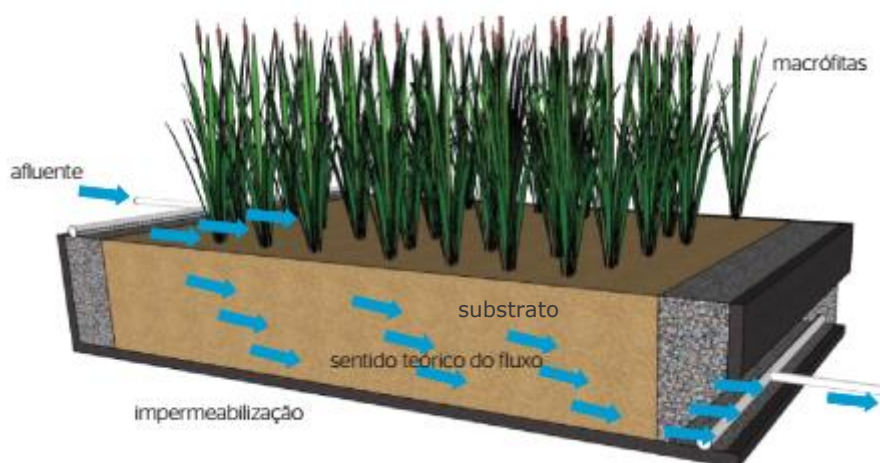
Basicamente, os sistemas *wetlands* construídos são constituídos de substrato (meio suporte), vegetação, microrganismos, meio líquido e unidades auxiliares, como dispositivos de entrada e saída, descritos por (SILVA, 2007; UN-HABITAT, 2008; CARVALHO; ANDREOLI, 2015):

- Substrato: Base suporte para o desenvolvimento das raízes das plantas e de microrganismos, promovendo os processos físicos, químicos e microbiológicos com os efluentes sanitários. Para tal, utiliza-se brita, cascalho, areia, solo e outros;
- Vegetação: Utiliza-se as macrófitas aquáticas por serem adaptáveis a ambientes aeróbicos e anóxicos, ocorrendo a interação do meio com os efluentes sanitários, e por consequência, a remoção de seus contaminantes;

- **Microrganismos:** Constituídos de bactérias, como grupo mais representativo, protozoários e micrometazoários, que formam um biofilme, responsável pela decomposição da matéria orgânica e reciclagem de nutrientes;
- **Meio líquido:** É um ambiente composto de águas, geralmente poluídas, que propicia o desenvolvimento de microrganismos e o crescimento das macrófitas, atuando diretamente na redução de cargas poluidoras;
- **Unidades auxiliares:** Dispositivos de controle do sistema, objetivando garantir a eficiência do tratamento, como dispositivos de entrada, saída e de drenagem de águas pluviais e outros.

A Figura 11 ilustra os componentes fundamentais na concepção de um sistema *wetland* construído.

Figura 11 Componentes de um sistema *wetland* construído



Fonte: Sezerino *et al.* (2015).

2.2.2.1 Meio suporte

As macrófitas aquáticas têm a capacidade de se desenvolver em uma grande diversidade de meios suportes. O substrato do sistema serve como base de sustentação para o crescimento das raízes, bem como, serve como meio suporte para a formação de biofilmes. Além disso, os interstícios do substrato funcionam como canais de escoamento e vazão, operando como um material filtrante das águas residuais (CAMPOS, 1999).

Na escolha do substrato deve-se atentar às suas características físicas, como uniformidade, porosidade e condutividade hidráulica do material, e a disponibilidade local destes recursos, influenciando diretamente no tratamento de remoção de poluentes e eficiência do próprio sistema, bem como, o custo (SILVA, 2007).

Segundo Sezerino (2006), os leitos com macrófitas são constituídos de brita, areia ou outro material inerte, quando aplicados para o tratamento de efluentes sanitários. No sistema subsuperficial de escoamento horizontal, recomenda-se utilizar o meio suporte constituído de brita, visto que o fluxo ocorre em distintas velocidades de percolação dos efluentes. Já, o substrato areia pode ser empregado, tanto no sistema subsuperficial de escoamento horizontal, quanto de escoamento vertical, entretanto reporta os problemas de colmatção precoce deste meio suporte.

Em experiências brasileiras sobre *wetlands* construídos de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal, a areia e a brita são os meios suportes mais aplicados por permitirem alta condutividade hidráulica ao efluente a ser tratado. Destes, a brita representa 64% de utilização, como material filtrante dos leitos com plantas (SEZERINO *et al.*, 2015).

2.2.2.2 Macrófitas

Macrófitas são plantas aquáticas que se desenvolvem em ambientes lênticos, com profundidades rasas, sendo capazes de sobreviver em ambiente com baixo nível de oxigênio. Estas atuam, principalmente, na remoção de nutrientes (amônia, fósforo e nitrogênio) dos efluentes sanitários (BRIX, 1993; SALATI, 2006; KADLEC e WALLACE; 2008).

O excesso de macrófitas aquáticas pode trazer sérios problemas aos ecossistemas de águas superficiais. Entretanto, em ambientes controláveis, essas plantas têm potencial reconhecido no tratamento de recursos hídricos e águas residuais. No sistema *wetland* construído, as plantas aquáticas assimilam os nutrientes e outras impurezas presentes nos efluentes, realizam os processos de transferência de oxigênio ao meio, inibem o crescimento de espécies vegetais indesejáveis por meio da sombra produzida pelas folhas, e seus rizomas e raízes dão suporte aos biofilmes de bactérias (CAMPOS, 1999).

Segundo Pômpeo (2017), as macrófitas aquáticas enraizadas, emergentes e submersas, absorvem naturalmente os nutrientes presentes no substrato, já as macrófitas aquáticas flutuantes removem os nutrientes da massa do líquido (água ou esgoto). No Quadro 5 são representadas as espécies dos tipos de macrófitas empregadas nos sistemas *wetlands* construídos.

Quadro 5 Espécies de macrófitas empregadas nos sistemas		
Macrófitas flutuantes	Macrófitas emergentes	Macrófitas submersas
<i>Eichhornia crassipes</i> (aguapé)	<i>Phragmites australis</i> (caniço)	<i>Lobelia Dortmanna</i>
	<i>Typha latifolia</i> (taboa)	<i>Elodea canadenses</i> , <i>Egeria densa</i> , <i>Elodea nuttalli</i> (elódeas)
<i>Lemna</i> , <i>Spirodela</i> , <i>Wolffia</i> (lentinha d'água)	<i>Scirpus lacustres</i> (bunho)	<i>Ceratophyllum demersum</i> (rabo de raposa)
		<i>Lobelia Dortmanna</i>

Fonte: Adaptado de Salati (2006).

Além destas plantas, há outras espécies sendo utilizadas nos sistemas, como exemplo, *Oryza sativa* (arroz) (SILVA *et al.*, 2015), *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty (capim Vertiver) (CARVALHO; ANDREOLI, 2015), *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo) (PITALUGA *et al.*, 2015; POÇAS, 2015), *Pennisetum purpurem* Schum (capim-elefante) e *Cynodon dactylon* (capim-Tifton) (MATOS *et al.*, 2012) e *Typha angustifolia* L. (taboa) (ALMEIDA *et al.*, 2007; POÇAS, 2015). Dentre essas, a taboa é uma das macrófitas mais empregadas nos sistemas *wetlands* construídos, correspondendo a 60% de uso, comparadas às demais espécies (SEZERINO *et al.*, 2015).

A *Typha latifolia* L. (Figura 12) pertence à família *Typhaceae*, constituída de dois gêneros *Typha* L. e *Sparganium* L. Destes, apenas o gênero *Typha* L. com três espécies do total de 15 espécies, podem ser encontradas no Brasil. Estas plantas são angiospermas monocotiledôneas que se adaptam em regiões temperadas, subtropicais e tropicais, ocorrendo em áreas brejosas e bordas de rios (Figura 13) (SOUZA; LORENZI, 2005).

As espécies *Typha* são popularmente conhecidas como taboa, cujas plantas são herbáceas e perenes, robustas, rizomatosas e paludosas; inflorescência em espigas

cilíndricas em troncos de 1 a 3 metros de altura. Possui folhas longas, lineares, largamente planas, com aproximadamente 8 a 25 mm de largura; rizomas produzidos na base das folhas com até 70 cm de comprimento; flores unissexuais contidas em duas espigas cilíndricas sobrepostas e unidas, sendo a parte inferior feminina e a superior, masculina (GRACE; HARRISON, 1985).

Figura 12 Taboa, *Typha latifolia* L.



Fonte: Souza; Lorenzi (2005).

Figura 13 *Typha latifolia* L. (habitat)



Fonte: Souza; Lorenzi (2005).

Diversos fatores influenciam na escolha da vegetação a ser implantada nos sistemas *wetlands* construídos, como a resistência e adaptação da planta a ambientes saturados de esgoto ou água, tipo de efluente a ser recuperado e eficiência do tratamento, tempo de vida da macrófita, velocidade de crescimento e origem das espécies, em virtude das condições climáticas locais (SEZERINO *et al.*, 2015).

No plantio de macrófitas, Pitaluga *et al.* (2015) recomendam que sejam fixadas oito mudas por metro quadrado do leito. Ainda, é importante que seja retirada uma quantidade maior de mudas que a necessária, para fins de replantio em substituição a plantas que morrerem.

2.2.3 Mecanismos de tratamento

O esgoto bruto, antes de ser destinado ao sistema de leito com plantas, deve ser submetido a tratamento preliminar, evitando danos ao sistema que podem ser

causados pelo entupimento da tubulação de entrada, colmatação do substrato, escoamento superficial de materiais sólidos, geração de odores e proliferação de vetores de doenças (CAMPOS, 1999).

O tratamento preliminar tem a função de remover sólidos grosseiros e suspensos, detritos minerais e, muitas vezes, óleos e graxas. Os tanques de equalização podem desempenhar estas funções, além de evitar sobrecargas de vazão no sistema. Em complementação, o tanque séptico é uma opção de tratamento primário que permite a sedimentação dos sólidos, não retidos anteriormente (TELLES; COSTA, 2010).

De acordo com Carvalho e Andreoli (2015), a água residual deve ser, no mínimo, efluente de tratamento primário. O tratamento de águas residuais por plantas está vinculado a ocorrência de interações complexas físicas, químicas e biológicas, as quais são asseguradas pela ação conjunta das plantas aquáticas, do substrato, dos microrganismos e do efluente a ser tratado.

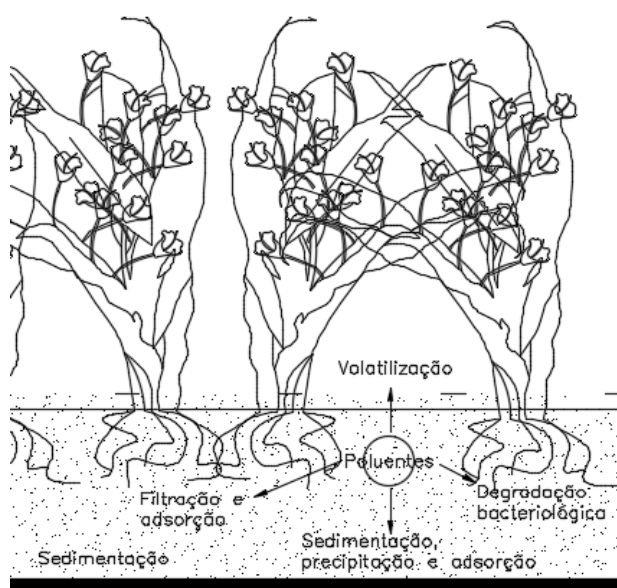
Com a entrada de efluente no sistema, os sólidos suspensos e sedimentáveis podem ser assimilados pelas raízes das macrófitas aquáticas e depositados ao fundo pela ação da gravidade. Os poluentes orgânicos, ou orgânicos refratários e metais pesados são absorvidos pela matéria orgânica contida no substrato ou pelas macrófitas. Os microrganismos são responsáveis por transformar os nutrientes em compostos simples, o mesmo ocorrendo para os poluentes biodegradáveis (UN-HABITAT, 2008).

Quando o esgoto pré-tratado é destinado ao sistema de leito com plantas aquáticas, os sólidos sedimentáveis e em suspensão são removidos pelos processos de filtração e sedimentação. Os leitos com plantas são predominantemente anóxicos, as macrófitas atuam na degradação da matéria orgânica pela transferência de oxigênio da atmosfera, às regiões próximas aos seus rizomas e raízes (CAMPOS, 1999).

A degradação dos poluentes de águas residuais envolve múltiplos processos, conforme a Figura 14. Por meio destes, podem ser removidos diversos contaminantes como fósforo, nitrogênio, metais e patogênicos. Em relação ao fósforo, o material é adsorvido e precipitado e posteriormente, absorvido pelas plantas. Os mecanismos de degradação do nitrogênio envolvem volatilização, amonificação, nitrificação/desnitrificação, absorção de plantas e adsorção (BRIX, 1993; UN-HABITAT, 2008).

Os processos de remoção de metais incluem sedimentação, filtração, adsorção, troca catiônica, absorção e reações de oxidação. Já, os patogênicos são removidos por sedimentação, filtração e adsorção da biomassa. No próprio sistema ocorre os processos de morte natural e predação destes organismos, além da liberação de toxinas das raízes das plantas que auxiliam na redução (BRIX, 1993; UN-HABITAT, 2008).

Figura 14 Mecanismos de remoção de poluentes nos leitos com plantas



Fonte: Adaptado de Pitaluga *et al.* (2015).

No Quadro 6 estão apresentados, resumidamente, os mecanismos de remoção de contaminantes em *wetland* construído, complementando os processos já citados.

Visando o melhor polimento do efluente, essa tecnologia de tratamento pode ser combinada a processos de tratamento terciário, como a macrofiltração, caracterizada pela passagem de esgoto no sentido ascendente e na direção perpendicular ao meio filtrante. Estes filtros podem ser constituídos de diversos materiais, como o carvão ativado, a areia, a brita e outros (TELLES; COSTA, 2010).

Quadro 6 Mecanismos de tratamento de águas residuais pelo sistema *wetland* construído

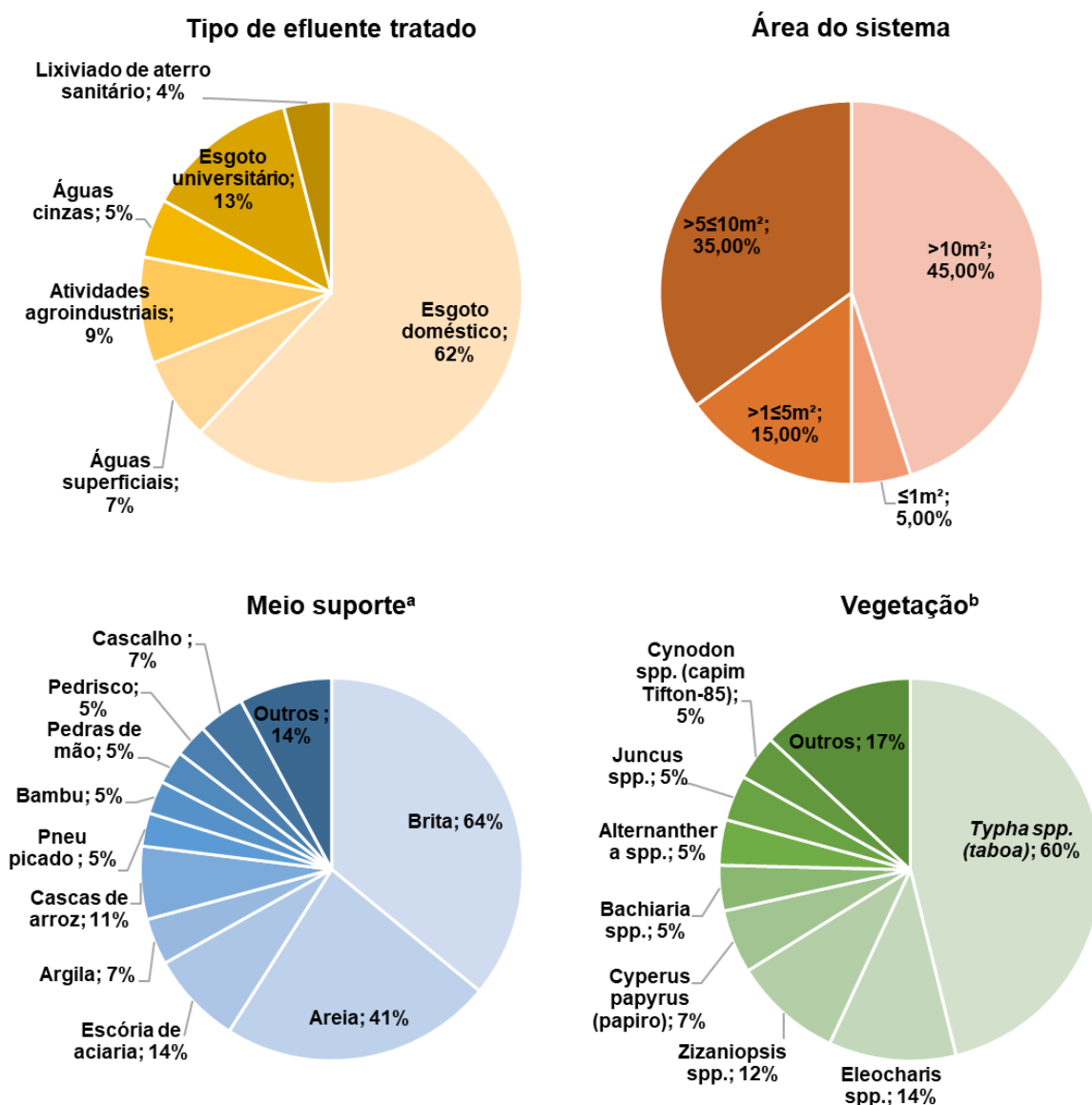
Mecanismo	Contaminante	Descrição
Físico		
• Sedimentação	P - Sólidos sedimentáveis S - Sólidos suspensos I - DBO, nitrogênio, fósforo, metais pesados, orgânicos refratários, bactérias, vírus	Sedimentação de sólidos e contaminantes.
• Filtração	S - Sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos	Sedimentação mecânica pela passagem do efluente pelo substrato e raízes.
• Adsorção	S - Sólidos suspensos	Força de atração entre as partículas.
Químico		
• Precipitação	P - Metais pesados, fósforo	Formação de co-precipitação com compostos insolúveis.
• Adsorção	P - Metais pesados, fósforo S - Orgânicos refratários	Adsorção no substrato e superfícies de plantas.
• Decomposição	S - Orgânicos refratários	Degradação de compostos menos estáveis por reações de oxidação e redução.
Biológico		
• Metabolismo microbiano	P - Sólidos suspensos, DBO, nitrogênio, metais pesados, orgânicos refratários	Retirada de sólidos por bactérias. Nitrificação / desnitrificação bacteriana. Oxidação de metais mediada por microrganismos.
• Metabolismo de plantas	S - Orgânicos refratários, bactérias, vírus	Remoção parcial dessas impurezas pelas plantas, sob condições adequadas.
• Decaimento natural	P - Bactérias e vírus	Redução natural ou organismos em ambiente inóspito.
P: Efeito primário; S: Efeito secundário; I: Efeito incidental (efeito ocorrendo acidentalmente pela remoção de outro contaminante).		

Fonte: Campos (1999).

2.2.4 Estudos experimentais

Tratando-se do interesse da pesquisa em questão, Sezerino *et al.* (2015) desenvolveram estudos sobre a aplicação dos sistemas de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal dos anos de 1998 a 2011, atentando-se aos elementos mais utilizados como tipo de vegetação, tipo de substrato, área do sistema e tempo de retenção hidráulica, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 Variação na composição dos *wetlands* construídos de fluxo horizontal (WCFH) de acordo com estudos publicados no Brasil até o ano de 2011



^aGráfico cujo somatório das porcentagens excede 100% se refere à utilização de variantes para o elemento avaliado, relatado em um mesmo estudo.

^bO somatório das porcentagens excede 100% devido à utilização de duas ou mais macrófitas em um mesmo estudo.

Fonte: Sezerino *et al.* (2015).

Pelo estudo desenvolvido por Sezerino *et al.* (2015), pode-se observar que o sistema *wetland* construído tem grande aplicação no tratamento de águas residuais domésticas (62%), com áreas de leitos menores que 10 m². Quanto aos componentes do sistema, a macrófita aquática mais utilizada é a taboa (*Typha spp.*) e o meio suporte para desenvolvimento das plantas, a brita. Estes componentes variam conforme a localidade de estudo e a finalidade de tratamento.

Complementando os leitos com plantas a outros processos de remoção de poluentes dos efluentes sanitários, Paterniani *et al.* (2011) indicam que o uso de filtro com camadas de areia assegura maior eficiência na remoção das concentrações de sólidos suspensos, cor, turbidez, coliformes totais e *Escherichia Coli*, verificado por estudo realizado em Campinas (SP).

Como apresentado por Sezerino *et al.* (2015), existe uma ampla diversidade dos sistemas *wetlands* construídos. A seguir, apresenta-se um levantamento de estudos experimentais referenciados, observando-se o tipo de efluente tratado, tipo de substrato e tipo de fluxo do sistema, tipo de vegetação implantada e os parâmetros analisados, assim como, a eficiência do sistema no tratamento dos efluentes.

As principais variáveis analisadas são demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal (N amoniacal), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrato, fosfatos, coliformes totais, coliformes termotolerantes, sólidos sedimentáveis, sólidos totais, sólidos suspensos, *Escherichia coli* e metais, como fósforo, cobre, sódio e outros.

O Quadro 7 apresenta diversas pesquisas sobre *wetlands* construídos no tratamento de águas residuais.

Quadro 7 Estudos experimentais sobre sistemas *wetlands* construídos no Brasil

Referência	Localidade / Coordenada	Tipo de efluente	Meio suporte – Fluxo	Vegetação	Parâmetros e eficiências de remoção	Objetivo do trabalho
ALMEIDA <i>et al.</i> , 2007	Goiânia - GO / 16°36' de latitude sul e 49°17' de longitude oeste	Esgoto primário doméstico (universitário)	Brita 1 - Fluxo subsuperficial vertical descendente	Taboa (<i>Typha angustifolia</i>),	DBO (91,81%); DQO (89,50%); N amoniacal (50,19%); Nitrato (50,45%); Fosfatos (72,00%); Coliformes totais (99,93%); Coliformes termotolerantes (99,97%)	Avaliar a eficiência de substratos e de espécies vegetais no tratamento de esgoto sanitário, num sistema do tipo zona de raízes, após decantação
				Lírio do brejo (<i>Hedychium coronarium</i>),	DBO (88,38%); DQO (89,39%); N amoniacal (53,46%); Nitrato (70,18%); Fosfatos (46,45%); Coliformes totais (99,58%); Coliformes termotolerantes (99,61%)	
				Conta-de-lágrima (<i>Coix lacryma-jobi</i>)	DBO (86,88%); DQO (87,91%); N amoniacal (19,82%); Nitrato (64,61%); Fosfatos (33,91%); Coliformes totais (99,60%); Coliformes termotolerantes (99,61%)	
				Capim Angola (<i>Urochloa mutica</i>)	DBO (85,02%); DQO (88,09%); N amoniacal (32,33%); Nitrato (85,69%); Fosfatos (59,13%); Coliformes totais (99,97%); Coliformes termotolerantes (99,96%)	
CARVALHO; ANDREOLI, 2015	Não há informação	Esgoto de caminhões limpa-fossa	Areia média, brita # 0 e brita 1 - Fluxo subsuperficial horizontal	Capim Vertiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>)	DBO (89,54%); N amoniacal (48,98%); Fósforo total (90,69%); Sólidos sedimentáveis (99,88%); Sólidos totais (67,86%); Fosfatos (72,00%); Coliformes totais (99,84%); Óleos e graxas (95,29%); <i>Escherichia coli</i> (99,93%)	Avaliar a eficiência do SAC no tratamento de resíduos de fossas e tanques sépticos (RFTS)

Quadro 7 (Continuação)Estudos experimentais sobre sistemas *wetlands* construídos no Brasil

Referência	Localidade / Coordenada	Tipo de efluente	Meio suporte – Fluxo	Vegetação	Parâmetros e eficiências de remoção	Objetivo do trabalho
MENDONÇA <i>et al.</i> , 2015	Juiz de Fora - MG / 21°40'45" de latitude sul e 43°26'31" de longitude oeste	Esgoto industrial (laticínio)	Brita # 0 – Fluxo subsuperficial horizontal	Taboa (<i>Typha dominguensis</i>)	DBO (90,4%)	Avaliar a influência de substratos e espécies vegetais, sobre a eficiência na remoção de DBO e regulação de pH, em SACs
				Lírio do brejo (<i>Hedychium coronarium</i>)	DBO (89,4%)	
PITALUGA <i>et al.</i> , 2015	Goiânia - GO / 16°40'39" de latitude sul e 49°14'28" de longitude oeste	Esgoto doméstico (universitário)	Areia – Fluxo subsuperficial horizontal	Lírio do brejo	DBO (96,40%); DQO (88,40%); N amoniacal (58,20%); NTK (46,30%); Fosfatos (93,90%); Coliformes totais (99,59%); Sólidos totais (49,20%); Sólidos totais fixos (26,10%); Sólidos suspensos (86,20%); Óleos e graxas (100%)	Avaliar a eficiência e o comportamento de três substratos no tratamento de esgoto sanitário, num sistema do tipo zona de raízes
			Brita # 0 – Fluxo subsuperficial horizontal		DBO (94,40%); DQO (87,30%); N amoniacal (58,30%); NTK (49,00%); Fosfatos (62,40%); Coliformes totais (99,62%); Sólidos totais (55,40%); Sólidos totais fixos (41,20%); Sólidos suspensos (94,70%); Óleos e graxas (100%)	
			Brita 1 – Fluxo subsuperficial horizontal		DBO (94,20%); DQO (87,40%); N amoniacal (59,50%); NTK (59,20%); Fosfatos (61,00%); Coliformes totais (98,89%); Sólidos totais (55,00%); Sólidos totais fixos (39,60%); Sólidos suspensos (96,00%); Óleos e graxas (100%)	

Quadro 7 (Continuação)Estudos experimentais sobre sistemas *wetlands* construídos no Brasil

Referência	Localidade / Coordenada	Tipo de efluente	Meio suporte – Fluxo	Vegetação	Parâmetros e eficiências de remoção	Objetivo do trabalho
FIA <i>et al.</i> , 2017	Viçosa – MG / Não há informação	Esgoto industrial (suinocultura)	Brita 2 – Fluxo subsuperficial horizontal	Taboa (<i>Typha latifolia</i>)	DBO (83%); DQO (79%); Sólidos suspensos totais (84%); NTK (37%); Fósforo (74%); Potássio (66%); Sódio (24%); Cálcio (52%); Magnésio (68%); Cobre (97%); Zinco (84%)	Avaliar a influência da vegetação em SACs na remoção de matéria orgânica e de macro e micronutrientes das águas residuárias da suinocultura
				Capim tifton-85 (<i>Cynodon spp.</i>)	DBO (86%); DQO (80%); Sólidos suspensos totais (86%); ; NTK (40%); Fósforo (73%); Potássio (67%); Sódio (20%); Cálcio (43%); Magnésio (67%); Cobre (96%); Zinco (81%)	
COSTA <i>et al.</i> , 2018	Belo Horizonte – MG / 19°53'46.78" de latitude sul e 43°52'40.81" de longitude oeste	Esgoto sanitário (ETE)	Pedras de mão -Fluxo subsuperficial horizontal	Taboa (<i>Typha latifolia</i>)	DBO (69%); DQO (72%); SST (87%); N amoniacal (3%); NTK (3%)	Avaliar o desempenho na remoção de matéria orgânica, sólidos e nitrogênio de esgoto sanitário oriundo de um reator UASB em um sistema alagado construído, com uma unidade plantada (<i>Typha latifolia</i>), em cerca de quatro anos de operação

2.3 Reuso de águas residuais

Em razão da escassez hídrica e da poluição das bacias hidrográficas, a reutilização de águas residuais vem se tornando uma opção para suprir as necessidades de demanda, proporcionando também a preservação ambiental e proteção à saúde pública. A prática do tratamento de águas residuais destinadas ao reuso é comum em países desenvolvidos, enquanto nos países em desenvolvimento evolui lentamente devido à falta de leis e incentivos governamentais sobre as tecnologias sustentáveis (MANCUSO; SANTOS, 2003; UN-HABITAT, 2008).

As tentativas de desvios e de captações de água de cursos d'água distantes não são ideais para minimizar o estresse hídrico, causado pelo déficit de precipitações em algumas regiões brasileiras. Atualmente, as tecnologias de tratamento de efluentes sanitários são capazes de produzir água potável segura e adequada aos padrões de potabilidade, evitando a reversão de bacias e problemas ambientais futuros (HESPANHOL, 2015).

Segundo Hespanhol (2015), há diversos aspectos positivos que podem ser destacados quanto ao reuso de águas, como a diminuição da poluição dos corpos receptores, a disponibilidade de efluentes tratados com qualidade aceitável, a promoção, a longo prazo, de uma fonte viável de abastecimento de água, o suprimento de água nos períodos de seca, o incentivo à população para conservação da água e para adoção de práticas de reuso desta.

Segundo a Resolução nº 54 (CNRH, 2006), do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), o reuso de água é uma prática de racionamento e conservação dos recursos hídricos, motivada pela escassez hídrica em diversas regiões brasileiras, tanto em qualidade quanto em quantidade, possibilitando a diminuição de descarga de efluentes sanitários em corpos hídricos, sem o devido tratamento.

De acordo com Telles e Costa (2010), as práticas de reuso de água tendem a aumentar por se tratar de uma técnica segura e acessível, sendo reconhecida como sustentável. Pesquisas recentes comprovam a importância do reuso de águas, Smith *et al.* (2018) apontam que a recuperação de águas residuais requer gastos menores de energia do que os processos de dessalinização de águas e transferência de água

para outras localidades, tornando-se a chave para amenizar os problemas de escassez de água das cidades chinesas.

Na Resolução nº 54 (CNRH, 2006), o reuso direto não potável de água está compreendido em cinco modalidades: reuso para fins urbanos, para fins agrícolas e florestais, para fins ambientais, para fins industriais e na aquicultura. Além disso, Mancuso e Santos (2003) atribuem outras formas de classificação, o Quadro 8 apresenta a sistematização dessas categorias de águas residuais reutilizadas para fins potáveis ou não potáveis.

Quadro 8 Tipos de reuso de águas residuais, classificação do uso e definição		
Categoria	Uso	Definição
Reuso potável	Direto	O efluente é recuperado através de tratamento avançado e retorna diretamente ao sistema de abastecimento público.
	Indireto	Após tratamento, o efluente é lançado em corpos hídricos receptores para autodepuração, através da diluição, purificação e tratamento naturais, e finalmente usado no abastecimento público..
Reuso não potável	Para fins agrícolas	A reutilização é destinada a irrigação de plantas alimentícias (árvores frutíferas, cereais e outros), plantas não alimentícias (pastagens e forrações) e dessedentação de animais.
	Para fins industriais	As águas recuperadas podem ser utilizadas em sistemas de refrigeração, águas de processo, em caldeiras e outros.
	Para fins urbanos	O reuso de água restringe a rega de áreas verdes, plantas ornamentais, campos de esportes, parques e enchimento de lagoas ornamentais.
	Manutenção de vazões	As águas recuperadas são usadas para manter a vazão de cursos hídricos para diluição de cargas poluidoras, permitindo a manutenção dessas vazões em períodos de estiagem.
	Aquicultura	Reuso de águas para produção de peixes e animais aquáticos.
	Recarga de aquíferos subterrâneos	Recarga artificial direta ou indireta de águas recuperadas, a fim de controlar seu nível de rebaixamento.

Fonte: Adaptado de Mancuso e Santos (2003) e ANA (2005).

Na Norma NBR 13969 (ABNT, 1997), o reuso local de efluente tratado é denominado como a reutilização dessa água recuperada em diversas finalidades, exceto para consumo de água potável. O efluente é tratado por sistemas convencionais, como

tratamento aeróbio, filtração, cloração, desinfecção e outros. Especifica-se que o reuso requer um planejamento seguro e racional, a fim de reduzir os custos do sistema. Dentre as medidas a serem definidas é necessário identificar o tipo de aplicação do efluente tratado, o volume de esgoto a ser reutilizado e o grau de tratamento, conforme a qualidade do efluente a ser tratado.

Segundo a Norma NBR 13969 (ABNT, 1997), as águas residuais tratadas são categorizadas de forma sucinta, nas seguintes classes:

- Classe 1: Reutilização de água para lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes;
- Classe 2: Reutilização de água para lavagem de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes;
- Classe 3: Reuso de água nas descargas dos vasos sanitários;
- Classe 4: Reutilização de água nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos por meio de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual (ABNT, 1997).

Em 2005, a Agência Nacional de Águas (ANA), em parceria com Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP), Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo (SindusCon-SP) e outras instituições, produziram um manual sobre “Conservação e reuso de água em edificações”, que estabelece exigências mínimas de uso de águas recuperadas para fins não potáveis em edificações (ANA, 2005).

De acordo com a ANA (2005), as águas cinzas podem ser tratadas e utilizadas na construção civil. A classificação do reuso destas águas é sintetizado em:

- Classe 1: Reutilização de água para lavagem de pisos e fins ornamentais, descarga de bacias sanitárias, lavagem de roupas e veículos. Nesta classe, a qualidade da água possui padrões mais restritivos por envolver atividades em que há contato humano direto com a água, necessitando de grau de transparência, ausência de odor, cor, espuma ou quaisquer componentes flutuantes;

- Classe 2: Reutilização de água nos processos construtivos da obra, como lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação de solo e controle de poeira;
- Classe 3: Reutilização de água para irrigação de áreas verdes e rega de jardins. Nesta classe, a concentração de contaminantes químicos e biológicos deve ser controlada por envolver diversas atividades antrópicas;
- Classe 4: Reutilização de água no resfriamento de equipamentos de ar condicionado (torres de resfriamento).

2.3.1 Padrões de qualidade da água de reuso

Normas técnicas que tratam de padrões de qualidade do efluente tratado para reuso ainda não são uma realidade brasileira. Não há normalização sobre esse tema, basicamente tem-se a Norma NBR 13969 (ABNT, 1997), “Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação”, que estabelece que os efluentes domésticos podem ser reaproveitados para atividades de água não potável.

Sucintamente, o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) trata sobre diretrizes relacionados ao saneamento que valorizam a utilização de alternativas adequadas para disposição de efluentes sanitários, tendo como objetivo, a preservação dos corpos hídricos e o reuso das águas residuais (BRASIL, 2007). Já, a Resolução nº 54 (CNRH, 2006), do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água, e dá outras providências.

Os critérios de qualidade da água estão diretamente relacionados à sua aplicação final, do mesmo modo que é assumido para água de reuso (TELLES; COSTA, 2010). A Norma NBR 13969 (ABNT, 1997) estabelece parâmetros para o uso de águas residuais tratadas para fins não potáveis com base na sua respectiva classificação, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros básicos para águas de reuso

Classificação	Parâmetros	Concentrações
Classe 1	Turbidez	<5,0 UT
	Coliformes termotolerantes	<200NMP/100mL
	Sólidos dissolvidos totais	<200mg/L
	pH	Entre 6,0 e 8,0
	Cloro residual	Entre 0,5 e 1,5 mg/L
Classe 2	Turbidez	<5,0 UT
	Coliformes termotolerantes	<500NMP/100mL
	Cloro residual	>0,5 mg/L
Classe 3	Turbidez	<10,0 UT
	Coliformes termotolerantes	<500NMP/100mL
Classe 4	Coliformes termotolerantes	<500NMP/100mL
	Oxigênio dissolvido	>2,0mg/L

Fonte: ABNT (1997).

Os parâmetros das classes das águas de reuso compreendidos pela ANA (2005) são mais restritivos que as exigências mínimas da Norma NBR 13969 (ABNT, 1997), como apresentado nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, descritas pelas suas respectivas classes.

Tabela 2 Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 1

Classificação	Parâmetros	Concentrações
Classe 1	Coliformes termotolerantes	Não detectáveis
	pH	Entre 6,0 e 9,0
	Cor	≤ 10,0 UH
	Turbidez	≤ 2,0 UT
	Odor e aparência	Não desagradáveis
	Óleos e graxas	≤ 1,0 mg/L
	DBO	≤ 10,0 mg/L
	Compostos orgânicos voláteis	Ausentes
	Nitrato	< 10,0 mg/L
	Nitrogênio amoniacal	≤ 20,0 mg/L
	Nitrito	≤ 1,0 mg/L
	Fósforo total	≤ 0,1 mg/L
	Sólidos suspensos totais (SST)	≤ 5,0 mg/L
	Sólidos dissolvidos totais (SDT)	≤ 500,0 mg/L

Fonte: ANA (2005).

Tabela 3 Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 2

Classificação	Parâmetros	Concentrações
Classe 2	Coliformes termotolerantes	≤ 10000 NMP/100 mL
	pH	Entre 6,0 e 9,0
	Odor e aparência	Não desagradáveis
	Óleos e graxas	≤ 1,0 mg/L
	DBO	≤ 30,0 mg/L
	Compostos orgânicos voláteis	Ausentes
	Sólidos suspensos totais (SST)	30,0 mg/L

Fonte: ANA (2005).

Tabela 4 Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 3

Parâmetros		Concentrações	
pH		Entre 6,0 e 9,0	
Salinidade		0,7 < EC (dS/m) < 3,0 450 < SDT (mg/L)	
Toxicidade por íons específicos	Para irrigação superficial	Sódio (SAR)	Entre 3,0 e 9,0
		Cloretos	< 350 mg/L
		Cloro residual	Máxima de 1 mg/L
	Para irrigação com aspersores	Sódio (SAR)	≥ 3,0
		Cloretos	< 100 mg/L
		Cloro residual	< 1,0 mg/L
Boro	Irrigação de culturas alimentícias	< 0,7 mg/L	
	Regas de jardim e similares	< 0,3 mg/L	
Nitrogênio total		5 – 30 mg/L	
DBO		< 20 mg/L	
Sólidos suspensos totais (SST)		< 20 mg/L	
Turbidez		< 5 UT	
Cor aparente		< 30 UH	
Coliformes termotolerantes		≤ 200 NMP/100 mL	

Fonte: ANA (2005).

Tabela 5 Parâmetros básicos para águas de reuso Classe 4

Variável	Sem recirculação	Com recirculação
Sílica	50 mg/L	50 mg/L
Alumínio	SR	0,1 mg/L
Ferro	-	0,5 mg/L
Manganês	-	0,5 mg/L
Amônia	-	1,0 mg/L
Sólidos dissolvidos totais	1000 mg/L	500 mg/L
Cloretos	600 mg/L	500 mg/L
Dureza	850 mg/L	650 mg/L
Alcalinidade	500 mg/L	350 mg/L
Sólidos em suspensão totais	5000 mg/L	100 mg/L
pH	5,0 – 8,3	6,8 – 7,2
Coliformes totais	SR	2,2 NMP/100 mL
Bicarbonato	600 mg/L	24 mg/L
Sulfato	680 mg/L	200 mg/L
Fósforo	SR	1,0 mg/L
Cálcio	200 mg/L	50 mg/L
Magnésio	SR	30 mg/L
Oxigênio dissolvido	Presente	SR
DQO	75 mg/L	75 mg/L

Fonte: ANA (2005).

2.3.2 Reuso para fins não potáveis

A utilização de águas recuperadas para fins não potáveis envolve riscos menores comparados à reutilização em fins potáveis, mas quando a água de reuso é distribuída em locais não controlados, de contato direto com a população, é requerido grau elevado de tratamento. Em áreas controladas, o grau de tratamento das águas residuais é inferior ao de áreas não controladas (TELLES; COSTA, 2010).

Segundo Nuvolari (2011), o grau de tratamento do efluente depende da especificidade do reuso e da qualidade da água requerida à sua aplicação. Entre as modalidades de reuso para fins não potáveis, o reaproveitamento em atividades agrícolas, industriais, urbanas e domésticas trazem grandes benefícios para suprir o consumo de água potável, por se tratar de áreas que demandam volume significativo de água para desenvolvimento de suas atividades comuns.

2.3.2.1 Reuso agrícola

O uso de água na área agrícola pode chegar a 80% em alguns países, sendo a principal consumidora de recursos hídricos. Perante a isso, a prática do reuso na irrigação de lavouras tem grande importância como fonte alternativa de água, destacando-se diversas vantagens técnicas e econômicas como racionalização do uso de água bruta, controle da poluição e impactos ambientais, reciclagem de nutrientes, economia de fertilizantes, conservação do solo, aumento da área cultivada e da produção agrícola (TELLES; COSTA, 2010).

2.3.2.2 Reuso industrial

Na indústria, a água tem papel importante nos processos industriais, seja na sua utilização como matéria-prima, ou como fluido de transporte, como fonte de calor e outras aplicações. Após sua utilização, o esgoto produzido pode ter grande carga de poluentes, exigindo medidas de tratamento antes de ser destinado à rede pública. As particularidades dos processos industriais definem a composição final das águas residuais, onde a escolha do tipo de tratamento depende da qualidade da água para finalidade de uso desta (NUVOLARI, 2011).

De acordo com Mancuso e Santos (2003), dependendo das unidades de produção de certas indústrias, como torres de resfriamento, as empresas têm optado pelo tratamento e reutilização de águas residuais em áreas operacionais, visando a redução de custos com o consumo de água potável e por consequência, a promoção da preservação das reservas hídricas. As possibilidades viáveis do reuso industrial podem ser aplicadas em torres de resfriamento, caldeiras, lavagem de peças e equipamentos, irrigação de áreas verdes das partes comuns e processos industriais.

2.3.2.3 Reuso urbano

Face à diversidade do uso de águas recuperadas no setor urbano, as principais práticas de reuso são (MANCUSO; SANTOS, 2003):

- Irrigação de locais públicos, como parques e praças, áreas verdes para recreação, jardins de escolas e universidades, gramados, árvores e arbustos decorativos;
- Lavagem de equipamentos urbanos, como trens e ônibus;
- Controle de poeira em vias não pavimentadas e em obras de terra;
- Construção civil;
- Sistemas decorativos aquáticos, como fontes e chafarizes, lagos artificiais, espelhos e quedas d'água.

2.3.2.4 Reuso doméstico

Em atividades domésticas, a geração de águas residuais é elevada pelos inúmeros banhos, água utilizada nas descargas de bacias sanitárias, lavagem de roupas na máquina de lavar e limpeza de utensílios na pia da cozinha, caracterizados como consumo interno. Além destes, o consumo externo compreende as atividades de rega de áreas verdes, lavagem de áreas externas e limpeza de veículos e piscinas. O tratamento destas permite sua reutilização nestas mesmas atividades, contribuindo para conservação e redução do consumo de água, tornando-se uma medida economicamente viável e ambientalmente correta (GONÇALVES, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de estudo

Esta pesquisa foi conduzida no sistema *wetland* construído, na Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgotos com Plantas - EPTEP, da Escola de Engenharia (EE), localizada no Câmpus I, da Universidade Federal de Goiás (UFG), região Leste da cidade de Goiânia-GO (Figura 16).

Figura 16 Mapa de localização do sistema *wetland* construído



Fonte: GOOGLE MAPS (2018).

A Escola de Engenharia oferece 5 cursos de graduação, os quais são Engenharia Ambiental e Sanitária, Engenharia Civil, Engenharia da Computação, Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, além de cursos de pós-graduação e especialização.

Por meio de entrevistas *in loco* nas coordenações da Escola, pode-se verificar que a instituição conta com efetivos 1.881 alunos, 117 professores, 46 técnicos, 9 colaboradores da limpeza, 43 colaboradores da segurança e 10 colaboradores da lanchonete. Deste modo, totalizando-se 2.106 pessoas distribuídas entre os turnos matutino, vespertino e noturno.

O sistema *wetland* construído recebe contribuição de efluente bruto de banheiros e laboratórios de análises físico-químicas e biológicas das edificações mais antigas da Escola, como apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 Unidades contribuintes de efluente bruto para o sistema *wetland* construído

Bloco	Descrição	Unidades de contribuição
Bloco A	Administração / Laboratório de Águas	• Banheiros • Laboratório
Bloco C	Laboratório de Geotecnia/ Laboratório de Hidráulica	• Banheiros • Laboratório
Bloco D	Laboratório Pireneus / Laboratório de Pesquisa e Ensino de Metrologia e Microscopia / Laboratório de Robótica	• Banheiros • Laboratórios
Bloco E	San-rural	• Banheiros
Bloco G	Laboratório de Estruturas	• Banheiros • Laboratórios
Bloco H	Laboratório de Materiais de Construção / Laboratório de Hidráulica / Laboratório de corrosão / Auditório Prof. Biolkino Pereira / Laboratórios da Engenharia Elétrica	• Banheiros • Laboratórios

Fonte: Própria, 2018.

3.1.1 Estação experimental de tratamento de esgotos

Esta estação experimental foi concebida durante o desenvolvimento de pesquisa científica realizada por Pitaluga *et al.* (2015). O sistema se encontrava desativado e era constituído de duas unidades de pré-tratamento, sendo um tanque séptico e um filtro anaeróbio, seguidos por três unidades independentes de leito com plantas.

O sistema *wetland* construído supracitado opera por escoamento subsuperficial de fluxo horizontal, recebendo os efluentes sanitários das unidades de contribuição

desviados da rede principal de esgoto, através de um sistema *by-pass*. Estas águas residuais eram transportadas às unidades de pré-tratamento.

Posteriormente, o líquido era distribuído em três bombonas plásticas (cada unidade com capacidade útil de 143 L), responsáveis por abastecer cada leito de tratamento. Por fim, o efluente tratado nos leitos com plantas era destinado a um reservatório enterrado (capacidade de 5.000 L), caso fosse extrapolada a capacidade deste, o efluente retornava à rede coletora da concessionária local.

A Figura 17 ilustra as condições antecedentes à avaliação e reativação do sistema *wetland* construído.

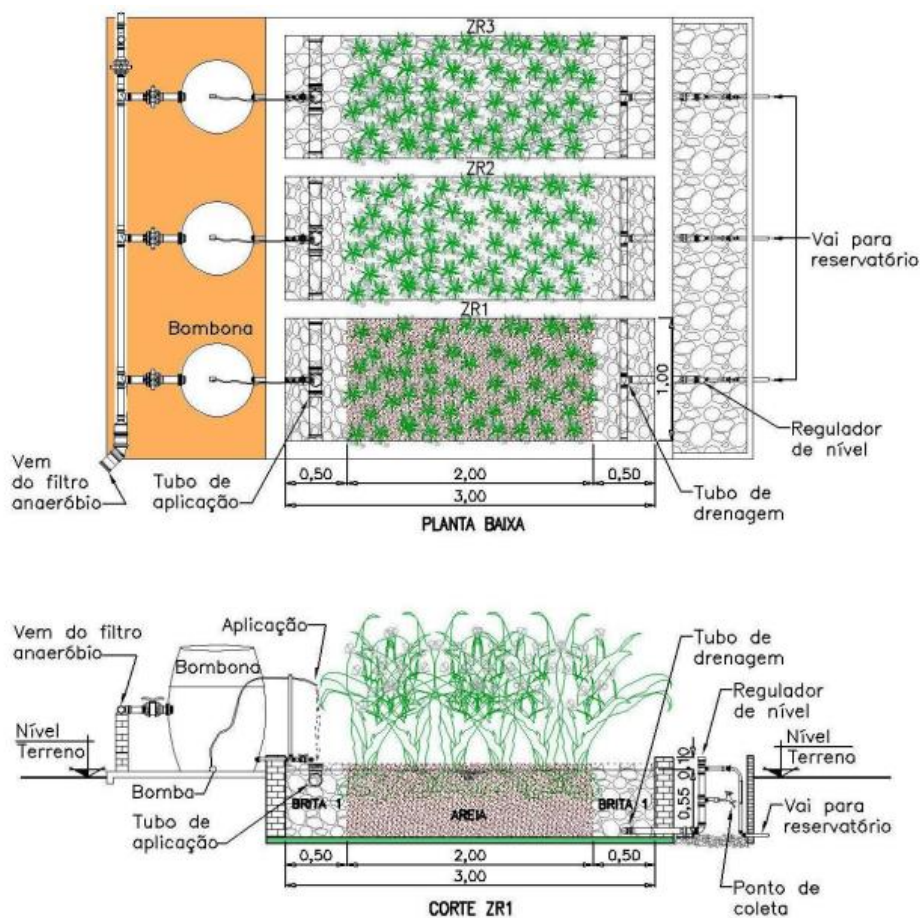
Figura 17 Condições antecedentes à avaliação e reativação do sistema



Fonte: Própria (2018).

A Figura 18 detalha a planta baixa e corte longitudinal do sistema *wetland* construído supracitado, utilizado no desenvolvimento de pesquisas científicas.

Figura 18 Planta baixa e corte longitudinal do sistema *wetland* construído



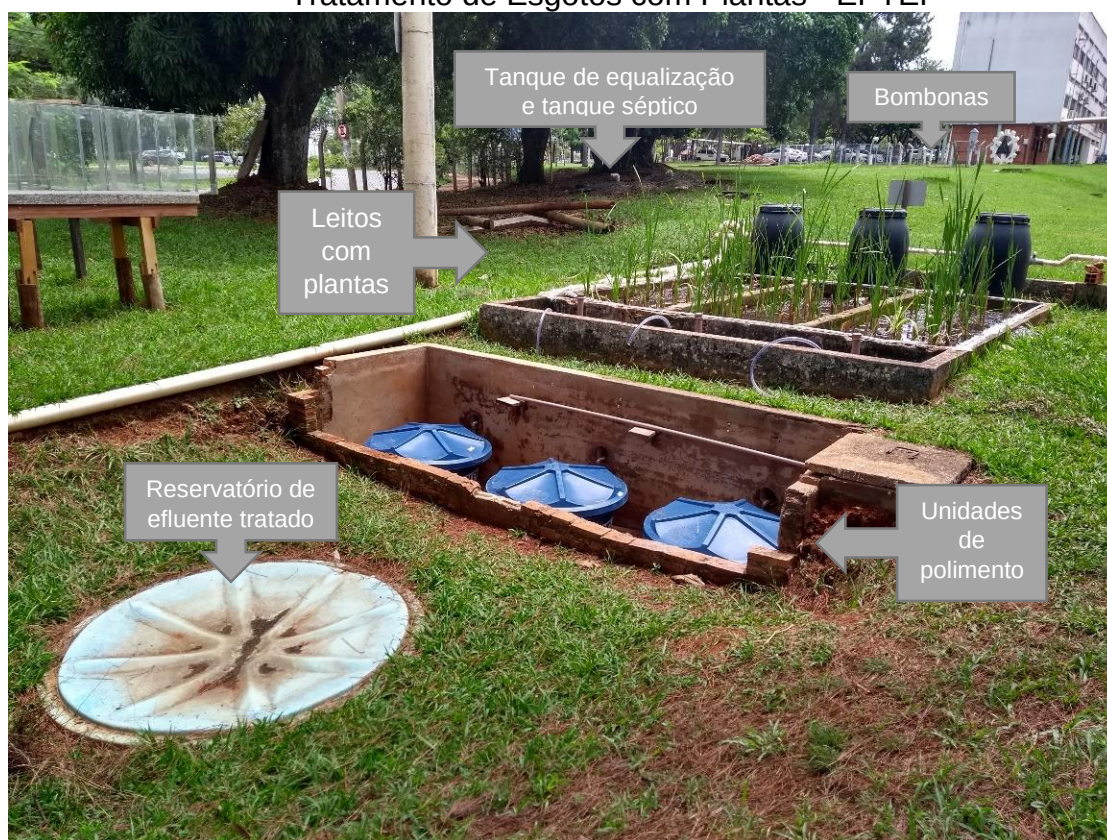
Fonte: Pitaluga *et al.* (2015).

Partindo da premissa de manter as unidades experimentais de estudo em funcionamento foram realizadas avaliações e atividades de reativação do sistema *wetland* construído.

3.2 Avaliação e reativação do sistema

Para reiniciar as atividades de pesquisa no sistema, avaliaram-se as condições dos componentes da estação experimental de tratamento de efluentes. Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos na pesquisa adotou-se um novo arranjo para as unidades existentes e a inserção de novas unidades de tratamento no sistema, conforme ilustra a Figura 19.

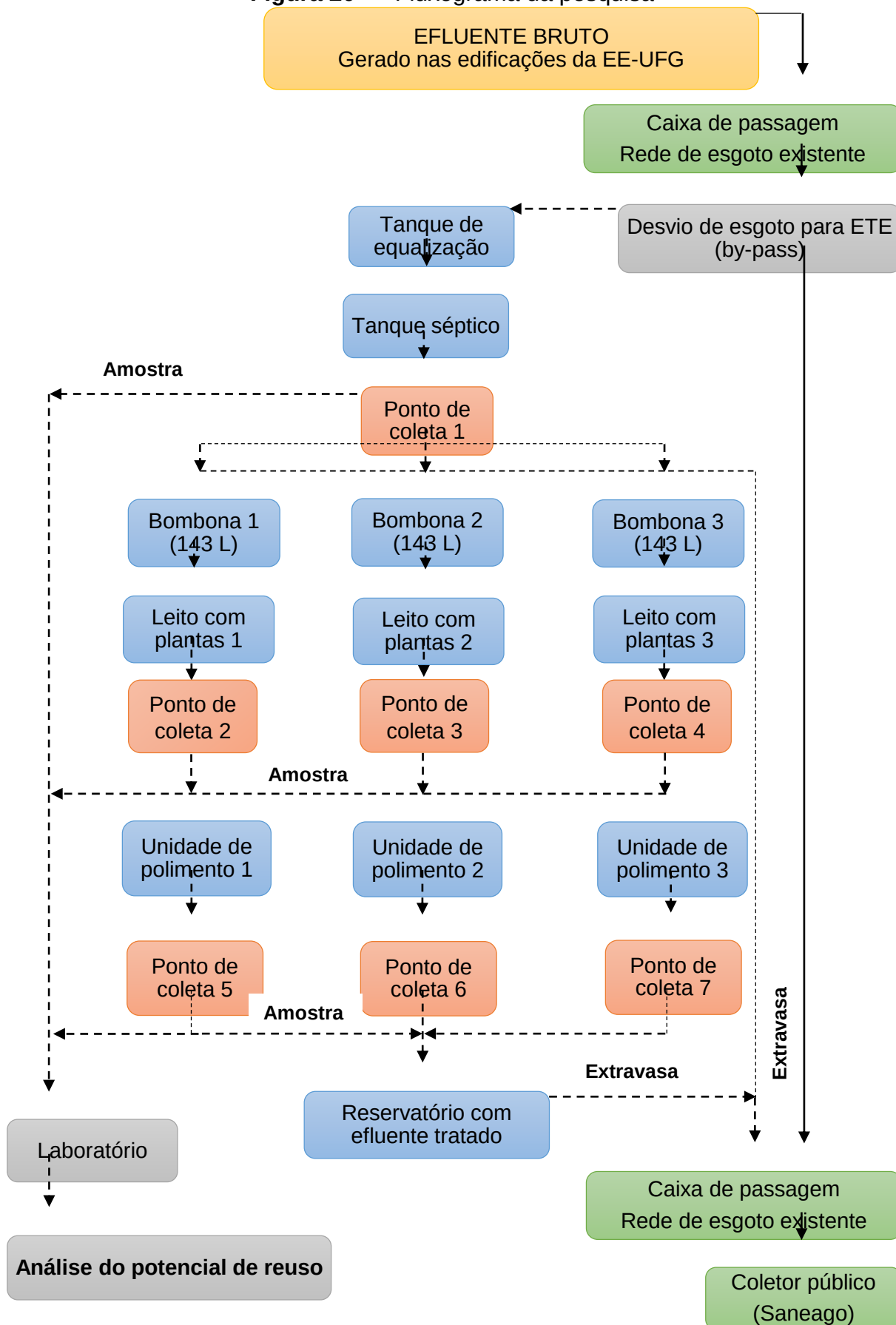
Figura 19 Novo arranjo das unidades da Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgotos com Plantas - EPTEP



Fonte: Própria (2018).

O efluente bruto é direcionado ao sistema *wetland* construído na caixa de passagem do sistema de desvio de esgoto. Assim, o efluente é encaminhado para o tanque de equalização e, em seguida, ao tanque séptico. As bombonas recebem efluentes individualmente, desaguando-os nos leitos com plantas. Por sua vez, o efluente tratado é lançado nas três unidades, independentes, de polimento. Por fim, o efluente é destinado a um reservatório final, cujo volume extravasado retorna à rede pública de esgoto.

As alterações realizadas no sistema *wetland* construído da unidade universitária são elucidadas na Figura 20, a qual representa o fluxograma da pesquisa.

Figura 20 Fluxograma da pesquisa

Fonte: Própria, 2018.

A Tabela 6 apresenta as dimensões destas unidades que compõem o sistema *wetland* construído.

Tabela 6 Dimensões das unidades da estação de tratamento de efluentes				
Unidade (Quantidade)	Dimensões (m)			Volume útil (m³)
	Diâmetro superior	Diâmetro inferior	Profundidade útil	
Tanque séptico (1)	2,60	2,00	2,00	8,00
Tanque de equalização (1)	2,60	2,00	2,00	8,00
Reservatório de efluente tratado (1)	1,50	1,50	1,40	2,50
Unidade de polimento (3)	0,87	0,61	0,53	0,15
Unidade	Largura	Comprimento	Profundidade útil	Volume útil (m³)
Leitos de tratamento (3)	1,00	3,00	0,55	1,65

Fonte: Própria, 2018.

3.2.1 Alimentação do sistema: Efluente bruto

Ao acionar o *by-pass* para desviar o efluente ao sistema, foi constatado que este não chegava ao sistema *wetland* construído. Assim, com o apoio da Secretária de Infraestrutura, identificou-se que a tubulação da rede de esgoto da estação havia sido alterada em um poço de visita anterior à caixa de passagem do *by-pass*, em que a tubulação estava acima da cota de saída do efluente bruto.

Para solucionar este problema, a tubulação de esgoto da rede principal foi isolada provisoriamente para que o efluente bruto fosse conduzido ao tanque de equalização, por gravidade (Figura 21). Após o desvio, teve-se necessidade de substituir algumas conexões que apresentavam vazamentos, localizadas antes das bombonas do sistema *wetland* construído.

Figura 21 Caixa de passagem para o desvio de efluente bruto pelo *by-pass*



Fonte: Própria (2018).

3.2.2 Unidades anteriores ao sistema *wetland* construído

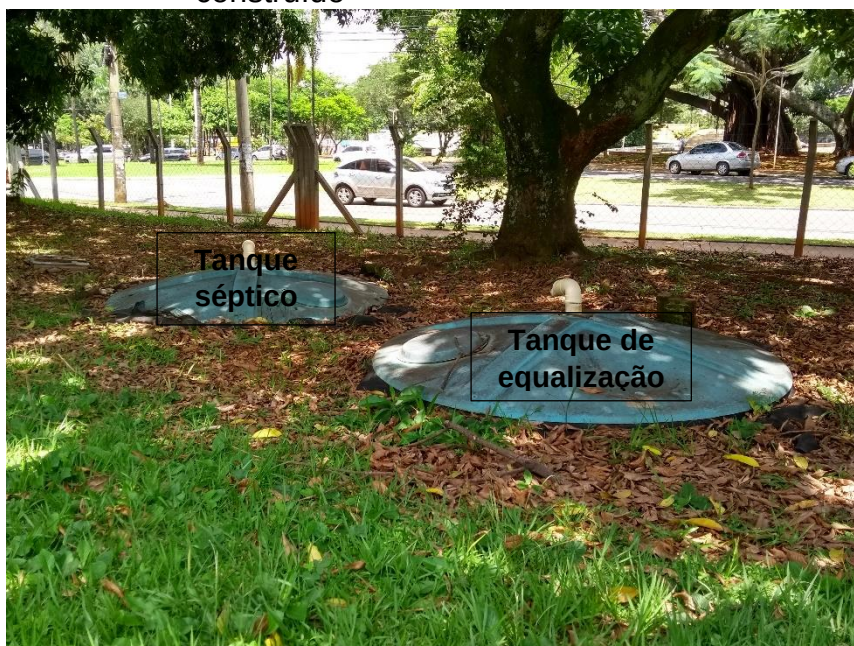
Definiu-se por utilizar o tanque séptico como um tanque de equalização, devido ao sistema ter oscilações diárias de vazão. Isto ocorre por se tratar de uma unidade universitária com aulas distribuídas de segunda a sábado, em diferentes turnos, ministradas em salas de aula e laboratórios de ensino e pesquisa.

Estabeleceu-se ainda por adaptar o filtro biológico para operar como um tanque séptico. Para tal, retirou-se os meios filtrantes e as tubulações avulsas que estavam dentro da unidade filtrante.

Portanto, o afluente direcionado ao sistema é encaminhado ao tanque de equalização, cuja função é equalizar as contribuições dos laboratórios e banheiros, realizando sua homogeneização, antes de ir para o tanque séptico. Como unidade de pré-tratamento tem-se o tanque séptico, de fluxo ascendente, cujo afluente advém do tanque de equalização.

A Figura 22 ilustra as unidades anteriores ao sistema *wetland* construído, o tanque de equalização e o tanque séptico.

Figura 22 Unidades anteriores ao sistema *wetland* construído



Fonte: Própria (2018).

3.2.3 Leito com plantas

Em virtude da desativação do sistema, realizou-se a limpeza dos três leitos com remoção do substrato e lavagem com água e vassoura (Figura 23). Após esta limpeza, foi realizado o levantamento das tubulações e conexões existentes no sistema, verificando-se a necessidade de substituição devido ao seu ressecamento (Figuras 24 e 25).

Figura 23 Remoção do substrato dos leitos de tratamento



Fonte: Própria (2018).

Figura 24 Substituição dos reguladores de nível



Fonte: Própria (2018).

Figura 25 Instalação dos reguladores de nível



Fonte: Própria (2018).

3.2.3.1 Meio suporte (filtrante) dos leitos

Pelos estudos realizados por Pitaluga *et al.* (2015), o substrato brita tem eficiência na remoção de sólidos totais, sólidos suspensos e coliformes termotolerantes. Apesar do substrato areia ter eficiência na redução de DBO e fósforo total, o leito com plantas torna-se susceptível a sofrer colmatagem. Portanto, precedeu-se pela escolha da brita como substrato do sistema *wetland* construído. Este agregado graúdo foi adquirido de uma empresa fornecedora de brita, sendo escolhida a brita # 0.

Os leitos foram preenchidos, a partir do fundo, com brita # 0, cuja composição granulométrica foi realizada conforme a Norma NBR NM 248:2003. Para a disposição do material realizou-se o preenchimento manualmente com o uso de pás e carrinho de mão (Figura 26). Previu-se uma borda livre de 15 cm em cada leito para evitar qualquer tipo de transbordamento de efluente.

Figura 26 Preenchimento dos leitos com brita # 0



Fonte: Própria (2018).

3.2.3.2 Macrófitas dos leitos

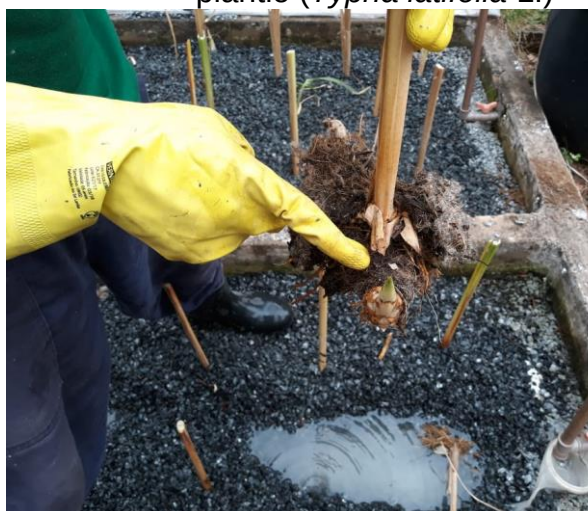
A escolha da espécie *Typha latifolia* L. foi fundamentada nos estudos experimentais que comprovam a eficiência desta planta no tratamento de efluentes. Para compor a vegetação do sistema, as mudas de taboa (Figura 27) foram coletadas em habitat natural (Figura 28) e, imediatamente, transplantadas para os leitos. As atividades de coleta e plantio foram realizadas no mesmo dia. Para tanto, antes do plantio, saturou-se os leitos com água oriunda do sistema público de abastecimento, utilizando-se uma mangueira.

Figura 27 Taboa no ambiente natural (local de coleta)



Fonte: Própria (2018).

Figura 28 Muda de taboa utilizada no plantio (*Typha latifolia* L.)

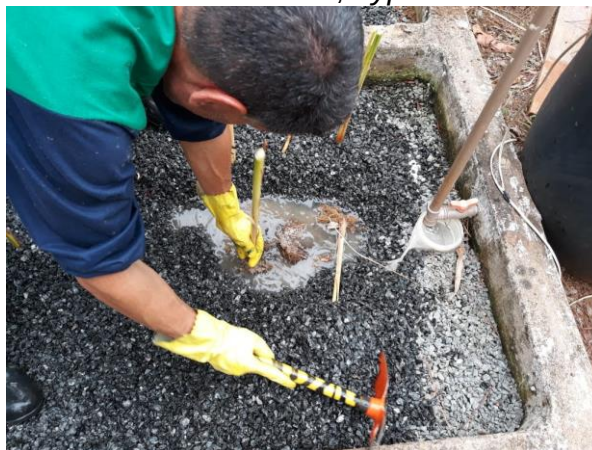


Fonte: Própria (2018).

No plantio, adotou-se a abertura de covas de 10 cm de profundidade e a distribuição de três fileiras de taboas, cada fileira com total de 10 mudas, totalizando 30 macrófitas por leito, atendendo a quantidade mínima especificada por Pitaluga *et al.* (2015). Durante o pegamento, as mudas foram mantidas sob condições de saturação permanente do meio com água.

Entretanto, no primeiro plantio ocorreu a falta de água ao sistema devido a subtração da mangueira, e, por consequência, a mortandade das plantas. Procedeu-se então, pela retirada das mudas para a realização do segundo plantio. O segundo plantio foi realizado, adotando-se as mesmas práticas adotadas no primeiro plantio. Contudo, teve-se problemas na segunda coleta pela retirada de mudas de espécie não identificada, sendo necessário um terceiro plantio (Figuras 29 e 30).

Figura 29 Último plantio de taboa, *Typha latifolia* L.



Fonte: Própria (2018).

Figura 30 Distribuição das mudas de taboa no plantio



Fonte: Própria (2018).

Durante o período de saturação (Figura 31), o sistema foi notificado pela Prefeitura de Goiânia como um local com foco de mosquito da dengue. Assim, realizou-se o cobrimento das mudas com tela, sendo retirada após o crescimento das plantas até a altura da tela. Depois de 30 (trinta) dias do plantio das mudas, realizou-se a descarga de água dos leitos nos reguladores de nível (Figura 32) e a liberação de efluente bruto ao sistema.

Figura 31 Saturação dos leitos durante o pegamento das plantas



Fonte: Própria (2018).

Figura 32 Descarga de água dos leitos



Fonte: Própria (2018).

3.2.4 Unidades de polimento

Entre as alterações previstas no arranjo do sistema, instalaram-se três filtros lentos (cada unidade com capacidade de 150 L), de fluxo ascendente. Cada filtro foi preenchido com um tipo de meio filtrante, a fim de verificar seu efeito no polimento do efluente. Para isto, foram instaladas três caixas d'água de polietileno após os leitos com plantas, as quais foram preenchidas com brita # 0 peneirada, areia fina lavada; ou, solo areno-argiloso peneirado.

O agregado graúdo foi o mesmo material utilizado no preenchimento dos leitos. Já, a areia foi adquirida de uma loja de materiais de construção, enquanto o solo foi retirado de um local próximo ao Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, Câmpus I da UFG. Estes materiais foram caracterizados pelos ensaios de granulometria do agregado graúdo, agregado miúdo (NBR NM 248:2003) e granulometria por peneiramento e sedimentação (NBR 7181:2016), respectivamente.

Após cada unidade de polimento, foram instalados pontos individuais de coleta para a realização de análises qualitativas do efluente tratado. Durante as coletas, verificou-se o carreamento de partículas de areia e solo areno-argiloso na saída dos filtros (Figura 33). Definiu-se por incluir uma camada de brita sobre o material desses dois filtros (Figura 34), a fim de amenizar o impacto direto das partículas de chuva e conter o solo superficial, evitando seu arraste.

Figura 33 Unidades de polimento preenchidas com os substratos



Fonte: Própria (2018).

Figura 34 Acréscimo de uma camada de brita sobre os filtros de areia e solo



Fonte: Própria (2018).

3.3 Caracterização do afluente e efluentes do sistema

Após trinta dias da aplicação de afluente bruto no sistema, realizaram-se três coletas de amostras simples em sete pontos definidos (Figuras 35 e 36), conforme o Quadro 10, nos dias 13, 21 e 28 de novembro. Para cada ponto foram coletados três frascos: dois frascos de 1000 mL e 300 mL, respectivamente, para análises físico-químicas e outro frasco de 300 mL para análises microbiológicas.

Quadro 10 Pontos de coleta das amostras do sistema *wetland* construído

Ponto de coleta	Tipo de amostra	Local de coleta
P1	Afluente advindo das unidades anteriores ao sistema	Nas bombonas
P2	Efluente tratado	Após o leito 1
P3	Efluente tratado	Após o leito 2
P4	Efluente tratado	Após o leito 3
P5	Efluente tratado	Após o filtro de brita (Efluente do leito 1)
P6	Efluente tratado	Após o filtro de areia (Efluente do leito 2)
P7	Efluente tratado	Após o filtro de solo arenoso (Efluente do leito 3)

^a Vide as Figuras 35 e 36.

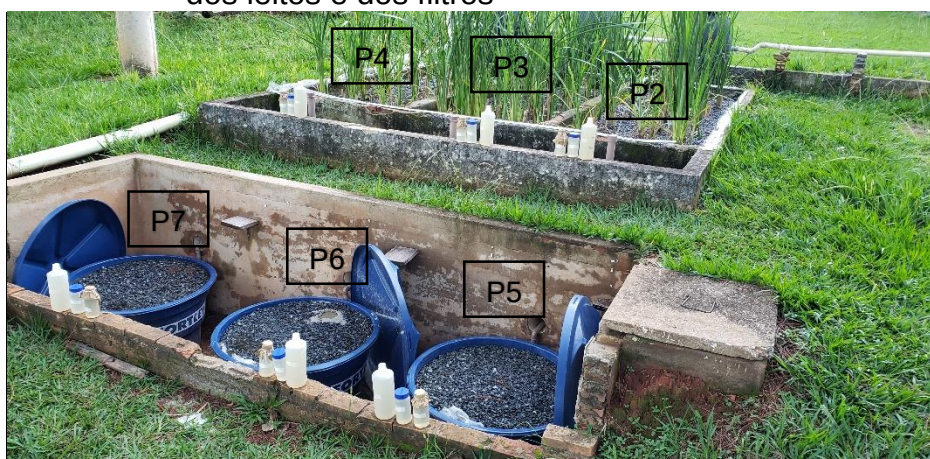
Fonte: Própria, 2018.

Figura 35 Ponto de coleta das amostras de afluente do sistema



Fonte: Própria (2018).

Figura 36 Pontos de coleta das amostras dos efluente tratados dos leitos e dos filtros



Fonte: Própria (2018).

Os dados das variáveis meteorológicas, durante o período de coleta de amostras, foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia, Estação Automática 83423, latitude -16.66 e longitude -49.25.

3.3.1 Caracterização quantitativa do afluente

Durante a caracterização quantitativa do afluente no sistema, pôde-se observar que a vazão do sistema varia consideravelmente durante o dia, com picos maiores durante os intervalos de aula. Com a finalidade de evitar problemas de afloramento e ausência de vazão no sistema, procedeu-se por controlar a vazão nos registros antecedentes às bombonas.

3.3.2 Caracterização qualitativa do afluente e dos efluentes tratados

Para caracterização qualitativa, analisaram-se as amostras de afluente e efluentes no laboratório de Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Goiás (IFG), Câmpus Goiânia, com base nos métodos descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WPCF, 2017), concomitante com as rotinas laboratoriais, avaliando-se alguns parâmetros de reuso de águas residuais referenciados pela ANA (2005).

O Quadro 11 apresenta os procedimentos simplificados das análises físicas, químicas e biológicas das amostras de efluentes bruto e tratado, bem como os equipamentos e reagentes utilizados. Os demais parâmetros propostos na pesquisa não foram executados, em virtude da ausência de equipamentos e reagentes específicos a estas análises. Além disso, analisaram-se outros parâmetros importantes para caracterização de efluentes, como condutividade elétrica e DQO.

Utilizou-se a Equação 1 para estimar a eficiência de remoção da carga poluidora de determinado parâmetro, conforme sugerido por Almeida e Ucker (2011).

$$E_f = 100 \frac{(C_0 Q_0 - C_e Q_e)}{C_0 Q_0} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo que E_f (%) representa a eficiência percentual de remoção da carga poluidora de determinado parâmetro; C_0 , a concentração do afluente do parâmetro; C_e , a concentração do efluente do parâmetro; Q_0 , vazão do afluente do parâmetro; e, Q_e , a vazão do efluente do parâmetro.

Ressalta-se que as vazões do afluente e dos efluentes não foram mensuradas, assim como a perda de água por evapotranspiração dos leitos e filtros, devido ao tempo gasto até a reativação do sistema. Portanto, aferiu-se a eficiência de remoção da carga poluidora dos parâmetros com base nas concentrações do afluente e dos efluentes do sistema.

Quadro 11

Procedimentos simplificados das análises físicas, químicas e biológicas

Parâmetro	Método
Parâmetro Físico	
Cor aparente	Transferência de 10 mL da amostra para uma cubeta, realizando-se a leitura do parâmetro no equipamento Spectroquant® Move 100, após calibração do equipamento, com resultado em PtCO. • Outras unidades: 1 PtCO = 1 uH; • Observação: Preparação do branco para zerar o equipamento; Este parâmetro foi também analisado no equipamento Spectrodirect (Lovibond).
Turbidez	Transferência de 10 mL da amostra para uma cubeta, realizando-se a leitura do parâmetro no equipamento Spectroquant® Move 100, após calibração do equipamento, com resultado em FAU; • Outras unidades: 1 FAU = 1 uT; • Observação: Preparação do branco para zerar o equipamento; Este parâmetro foi também analisado no equipamento Spectrodirect (Lovibond).
Temperatura	Parâmetro aferido pela imersão do termômetro e sonda do condutímetro na amostra, após calibração do equipamento, com resultado em °C.
Parâmetro químico	
Sólidos suspensos totais	Transferência de 10 mL da amostra para uma cubeta, realizando-se a leitura do parâmetro no equipamento Spectroquant® Move 100, após calibração do equipamento, com resultado em mg/L. • Observação: Preparação do branco para zerar o equipamento Este parâmetro foi também analisado no equipamento Spectrodirect (Lovibond).
Sólidos dissolvidos totais	Parâmetro aferido pela imersão da sonda do condutímetro na amostra, após calibração do equipamento, com resultado em mg/L.
Condutividade elétrica	Parâmetro aferido pela imersão da sonda do condutímetro na amostra, após calibração do equipamento, com resultado em $\mu\text{S}/\text{cm}$.
Demanda Química de Oxigênio	• Transferência de 1 mL da amostra para um tubo de ensaio, adicionando-se 1 mL de solução digestora de dicromato de potássio/sulfato de mercúrio ($\text{HgSO}_4/\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) - faixa baixa e 2 mL de solução de ácido sulfúrico/sulfato de prata ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Ag}_2\text{SO}_4$); • Homogeneização da amostra no agitador; • Colocação dos tubos no termoreator (DQO MD100 COD, Lovibond) a 150°C durante 2 horas; • Após o resfriamento dos tubos, procede-se a leitura no equipamento Spectrodirect (Lovibond), após calibração do equipamento, com resultado em mg/L. • Observação: Preparação do branco para zerar o equipamento.

Quadro 11 (Continuação) Procedimentos simplificados das análises físicas, químicas e biológicas

Parâmetro	Método
Oxigênio dissolvido	Parâmetro aferido pela imersão da sonda, modelo SO-400, conectada ao oxímetro, modelo PH-1500, após calibração do equipamento.
pH	Parâmetro aferido pela imersão da sonda do pHmetro na amostra.
Dureza	- Transferência de 50 mL da amostra para um erlenmeyer, adicionando-se 1 mL de solução tampão pH10 e 0,05 g de negro de eriocromo T; - Titulação com solução de EDTA 0,01 mol/L até a mudança da cor vermelho para azul; - Cálculo da dureza: $\frac{mg}{L} \text{ de } CaCO_3 = \frac{1000 \cdot (mL \text{ da amostra})}{50}$
Alcalinidade	- Transferência de 100 mL da amostra para um erlenmeyer, adicionando-se 3 gotas de fenolftaleína, não havendo a indicação de cor, inclui-se 3 gotas de solução indicadora metilorange; - Titulação com solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,02 mol/L até mudança da cor vermelho para amarelo; $\frac{mg}{L} \text{ de } CO_2 \text{ livre} = 10 \cdot (mL \text{ da amostra})$
Cloretos	- Transferência de 100 mL da amostra para um erlenmeyer, adicionando-se 1 mL 1 mL da solução indicadora de cromato de potássio (K₂CrO₄); - Titulação com solução padrão de nitrato de prata 0,0141 N até a mudança de amarelo para vermelho; - Cálculo de cloreto: $\frac{mg}{L} \text{ de } Cl^- = \frac{(A - B) \cdot (0,0141) \cdot 35,46}{mL \text{ da amostra}},$ <i>em que A é o volume do titulante na amostra; e B, volume gasto no branco</i>
Parâmetro biológico	
<u>Teste presuntivo</u>	
Coliformes totais	- Bateria contendo 9 tubos de ensaio distribuídos de 3 em 3: Nos primeiros 3 tubos (caldo lactosado de concentração dupla), transfere-se 10 mL de amostra em cada tubo (Diluição 1:1) por meio de pipeta esterilizada; nos 6 tubos restantes (caldo lactosado de concentração simples), inocula-se nos 3 primeiros tubos, 1 mL da amostra (Diluição 1:10) e nos últimos 3 tubos, inocula-se 0,1 mL da amostra, em cada tubo (Diluição 1:100); - Incubação a 35 ± 0,5° C durante 24/48 horas; - Caso haja a formação do gás dentro do tubo de Durham, o teste é positivo. Caso não, teste é considerado negativo.

Quadro 11 (Continuação) Procedimentos simplificados das análises físicas, químicas e biológicas

Parâmetro	Método
	<u>Teste confirmativo</u>
Coliformes totais	- Realização da repicagem dos tubos positivos do teste presuntivo, nas 3 diluições 1:1, 1:10; 1:100, em meio de cultura verde brilhante bile a 2%, transferindo através de uma alça de platina previamente flambada e fria; - Incubação a $35 \pm 0,5^\circ \text{C}$ durante 24/48 horas; - Caso haja a formação do gás dentro do tubo de Durham, o teste é positivo. Caso não, teste é considerado negativo; - Determinação do Número Mais Provável (NMP) por Tabela (Anexo A) e estimado pela equação: $\frac{NMP}{100\text{mL}} = NMP \text{ correspondente ao código} \cdot \frac{10}{\text{Maior volume inoculado}}$
Coliformes termotolerantes	- Toma-se os tubos positivos do teste presuntivo em meio de cultura EC nas 3 diluições 1:1, 1:10; 1:100, transferindo através de uma alça de platina previamente flambada e fria; - Agitação em banho de água durante 30 minutos; - Incubação em banho-maria a $44,5 \pm 0,2^\circ \text{C}$ durante 24 ± 2 horas - Caso haja a formação de bolha, confirma-se a presença de coliformes de origem fecal; - Determinação do NMP por Tabela (Anexo A) e estimado pela equação: $\frac{NMP}{100\text{mL}} = NMP \text{ correspondente ao código} \cdot \frac{10}{\text{Maior volume inoculado}}$

Fonte: Adaptado de Brasil (2015).

3.4 Análise do potencial de reuso do efluente tratado

De posse dos resultados das análises qualitativas avaliou-se o potencial de reuso dos efluentes tratados para fins não potáveis, por meio das orientações da ANA (2005) e outras revisões literárias pertinentes ao tema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação e reativação do sistema

O sistema *wetland* construído encontra-se em funcionamento, mas há problemas de controle de vazão de entrada do afluente bruto. O sistema em questão ainda não está estabilizado, visto que as taboas não atingiram a vida adulta. Costa (2004) informa que, as macrófitas necessitam, em média de, 60 a 90 dias para atingir a idade ideal. A Figura 37 ilustra as condições atuais do sistema *wetland* construído.

Figura 37 Condições atuais do sistema *wetland* construído



Fonte: Própria (2018).

4.2 Caracterização dos materiais dos leitos e dos filtros

Quanto à caracterização dos materiais utilizados nos leitos e nas unidades de polimento, os Apêndices A, B e C apresentam os resultados obtidos nos ensaios de peneiramento das amostras de brita e areia, e no ensaio de peneiramento e sedimentação do solo.

O Apêndice A refere-se aos resultados do ensaio da amostra de brita. Pôde-se verificar que o substrato dos leitos tem dimensão máxima característica (DMC) de 12,5 mm. Pela curva granulométrica da amostra, comparada às curvas das britas 0 e 1 especificadas na Norma NBR 7211 (ABNT, 2009), observa-se que o agregado graúdo é classificado como brita # 0. Adotando-se a classificação comercial de agregados (OLIVEIRA, 2014), verifica-se que o valor da DMC está compreendido entre os limites da brita # 0.

Já, o Apêndice B aponta os resultados do ensaio da amostra de areia. O agregado miúdo pode ser classificado comercialmente pelo módulo de finura. O valor do módulo de finura de 1,45 está compreendido entre a faixa de areia muito fina, fora da zona inferior utilizável para concreto, conforme a especificação da Norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

O Apêndice C apresenta a análise granulométrica da amostra de solo, a qual é constituída de .45,06% de areia, 43,23 % de argila e 11,62% de silte. Pinto (2006) explica que os solos são classificados pelo nome da fração granulométrica mais predominante, seguida pelas seguintes frações. Portanto, o material utilizado para preenchimento de um filtro trata-se de um solo areno-argiloso.

4.3 Leito com plantas

Antes de destinar afluente bruto ao sistema foi verificada a quantidade de mudas que nasceram em cada leito. No primeiro leito brotaram 24 mudas, enquanto que no segundo leito, foram 31 mudas e no terceiro, 24 mudas. Atendendo a quantidade de 8 mudas por metro quadrado (PITALUGA *et al.*, 2015), optou-se por não fazer o replantio das mudas que morreram.

Até o presente momento, há plantas brotando (Figura 38) e iniciou-se o processo de floração de uma planta no sistema (Figura 39).

Figura 38 Mudas brotando no sistema



Fonte: Própria (2018).

Figura 39 Floração de uma taboa, *Typha latifolia* L.



Fonte: Própria (2018).

4.4 Caracterização do afluente e efluentes do sistema

4.4.1 Variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas verificadas no período de coleta e as médias semanais estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 Variáveis meteorológicas dos dias de coleta

Data da coleta	Precipitação (mm)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura compensada média (°C)	Umidade Relativa Média (%)
13/11/2018	0,00	33,70	25,80	70,75
21/11/2018	29,60	28,60	23,98	73,50
28/11/2018	0,00	33,20	26,98	50,25

Fonte: Estação Automática 83423 - Instituto Nacional de Meteorologia, 2018.

Tabela 8 Variáveis meteorológicas semanais das coletas

Semana da coleta	Precipitação (mm)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura compensada média (°C)	Umidade Relativa Média (%)
11/11/2018 - 17/11/2018	3,26	31,50	24,73	66,64
18/11/2018 - 24/11/2018	10,90	29,61	24,33	75,39
25/11/2018 - 01/12/2018	2,19	30,36	24,91	66,29

Fonte: Estação Automática 83423 - Instituto Nacional de Meteorologia, 2018.

A maior temperatura máxima diária (33,70°C) foi observada na primeira coleta e a menor, na segunda coleta (28,60°C), ocorrendo similarmente para suas respectivas variações semanais. Verifica-se que na terceira coleta (26,98°C), a temperatura compensada média foi maior que a primeira coleta (25,80°C), seguida pela segunda coleta (23,98°C), isto também ocorreu para as semanas destas coletas.

Nos dias da primeira e da terceira coletas não ocorreram precipitações, mas observa-se baixas valores de precipitação (3,26 e 2,19 mm) nessas semanas, comparados à semana da segunda coleta (10,90 mm). Já, na segunda coleta verificou-se a ocorrência de precipitação no dia.

Quanto à umidade relativa média, constata-se que a primeira (66,64%) e terceira semana (66,29%) tiveram valores menores que a segunda semana (75,39%). Do mesmo modo, as variações diárias de umidade ocorreram conforme as variações semanais.

Diante do exposto, as variáveis climáticas estão em conformidade com as características inerentes ao clima tropical com estação seca no inverno, conforme a classificação de Köppen-Geiger, do município de Goiânia. Em que a estação úmida inicia-se em outubro com término em abril, e a estação seca compreende o período de maio a setembro (CARDOSO *et al.*, 2014). Portanto, as coletas foram realizadas na estação úmida, com precipitações do mês de novembro.

4.4.2 Caracterização quantitativa

Devido ao tempo transcorrido para reativação do sistema, não foi possível quantificar a vazão afluente, assim como as perdas de água dos leitos com plantas e dos filtros por evapotranspiração. Tais aferições serão realizadas no seguimento da pesquisa. Cabe destacar que há necessidade de instalação de uma bomba em cada bombona antecedente ao leito com plantas, para regularização do volume de afluente no sistema, em virtude das oscilações diárias de vazão.

4.4.3 Caracterização qualitativa

As coletas de amostras foram realizadas nos horários das 07h00 às 8h30, em ambos os dias. Os resultados da composição do afluente do sistema estão dispostos na Tabela 9, com a comparação entre faixas de valores referenciados para o esgoto doméstico bruto (METCALF; EDDY, 2016; SPERLING, 2005).

Tabela 9 Composição do afluente do sistema *wetland* construído coletado nas bombonas e valores de referência

Parâmetros	Unidade	Efluente bruto do sistema				Faixa de valores	
		1 ^a análise	2 ^a análise	3 ^a análise	Valor médio	Metcalf & Eddy (2016)	Sperling (2005)
SST	mg/L	55,0	168,0	253,0	158,7	130 a 389	200 a 450
SDT	mg/L	839,8	927,1	857,5	874,8	374 a 1121	500 a 900
DQO	mg/L	60,2	64,4	43,9	56,2	339 a 1016	450 a 800
Cloretos	mg/L	148,5	128,5	134,0	137,0	39 a 118	20 a 50
pH	-	- ^a	7,6	7,8	7,7	6,0 a 9,0	6,7 a 7,5
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	595,0	565,0	583,0	581,0	-	110 a 170
Coliformes totais	NMP/100mL	>11000	>11000	>11000	>1,1.10⁴	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁵ -10 ⁸ -
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	11000	350	350	3,9.10⁴	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁹

^a Valor desprezado devido à descalibração do equipamento.

O valor médio de entrada de DQO no sistema foi de 56,2 mg/L, cujo resultado está bem inferior aos limites referenciados de 339 a 1016 mg/L (METCALF; EDDY, 2016) e 450 a 800 mg/L (SPERLING, 2005). Pitaluga *et al.* (2015) obteve valor médio para DQO de 965 mg/L, constatando que o esgoto da unidade universitária era predominantemente doméstico. Acredita-se que essa discrepância entre os valores de DQO pode estar associada ao efeito do pré-tratamento sobre a DQO do afluente bruto, visto que o tanque séptico tem remoção média de matéria orgânica.

Os valores médios de alcalinidade e cloretos, de 581,0 mg/L e 137,0 mg/L, respectivamente, estão acima dos limites estabelecidos por MetDalf e Eddy (2016) e Sperling (2005). Assim como na DQO, pode-se fundamentar essa grande variabilidade de resultados, em virtude do descarte de resíduos químicos provenientes dos laboratórios.

Os parâmetros químicos de sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais apresentaram valores compatíveis com os limites referenciados (METCALF; EDDY, 2016; SPERLING, 2005), bem como, os parâmetros biológicos de coliformes totais e termotolerantes.

Diante disso, pode-se concluir que as variações de alguns parâmetros foram influenciadas pelas características do esgoto da unidade universitária, diferente do esgoto doméstico urbano.

Os resultados das análises laboratoriais de caracterização do afluente (P1) e efluentes tratados pelos leitos (P2, P3, P4) e pelos filtros (P5, P6 e P7) nos seus respectivos dias de coleta, estão apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 Composições física, química e biológica das amostras de afluente e efluentes tratados do sistema *wetland* construído, no dia 13/11/2018

Ponto de coleta	Parâmetro físico				Parâmetro químico								Parâmetro biológico	
	Cor aparente (PtCO)	Turbidez (FAU)	Temp. (°C)	SST ^a (mg/L)	SDT ^a (mg/L)	CE ^a (μS/cm)	DQO (mg/L)	OD (mg/L)	pH	Dureza (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Coliformes totais (NMP/100 mL)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)
P1	456,0	> 100,0	25,4	55,0	839,8	1657,0	60,2	8,5	8,9	114,0	595,0	148,5	> 11000	11000
P2	73,0	16,0	25,4	2,0	663,8	1326,0	56,0	8,4	8,4	140,0	425,0	111,0	150	150
P3	113,0	22,0	25,3	5,0	713,6	1421,0	65,0	8,3	8,6	114,0	469,0	121,0	200	200
P4	152,0	32,0	25,4	7,0	811,5	1593,0	61,1	8,2	8,5	132,0	530,0	134,5	350	350
P5	105,0	23,0	25,3	13,0	673,1	1298,0	55,6	8,1	8,6	160,0	425,0	106,5	74	74
P6	> 500,0	> 100,0	25,0	97,0	383,4	771,0	10,3	8,2	8,4	256,0	130,0	88,5	> 11000	2100
P7	339,0	82,0	24,9	43,0	796,7	1589,0	34,1	8,2	8,6	132,0	542,0	114,5	> 11000	11000

^aSST: Sólidos suspensos totais; SDT; sólidos dissolvidos totais; CE: condutividade elétrica

Fonte: Própria, 2018.

Tabela 11 Composições física, química e biológica das amostras de afluente e efluentes tratados do sistema *wetland* construído, no dia 21/11/2018

Ponto de coleta	Parâmetro físico				Parâmetro químico								Parâmetro biológico	
	Cor aparente (PtCO)	Turbidez (FAU)	Temp. (°C)	SST ^a (mg/L)	SDT ^a (mg/L)	CE ^a (μS/cm)	DQO (mg/L)	OD (mg/L)	pH	Dureza (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Coliformes totais (NMP/100 mL)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)
P1	> 1000,0	> 100,0	22,4	168,0	927,1	1748,0	64,4	8,5	7,6	110,0	565,0	128,5	> 11000	2100
P2	416,0	25,0	22,1	> 750,0	724,9	1493,0	60,1	8,6	7,6	168,0	478,0	98,5	11000	350
P3	510,0	32,0	22,2	> 750,0	778,3	1551,0	63,7	8,6	7,6	140,0	490,0	113,0	1200	300
P4	451,0	31,0	22,3	> 750,0	755,4	1503,0	60,3	8,6	7,4	170,0	487,0	101,0	1200	200
P5	402,0	23,0	21,9	> 750,0	638,7	1283,0	65,1	8,7	7,4	120,0	425,0	98,5	11000	200
P6	454,0	33,0	21,5	> 750,0	689,9	1373,0	64,4	8,7	7,6	140,0	421,0	104,5	> 11000	4600
P7	512,0	30,0	21,7	41,0	715,4	1425,0	66,2	8,7	7,6	132,0	481,0	100,0	> 11000	> 11000

^aSST: Sólidos suspensos totais; SDT; sólidos dissolvidos totais; CE: condutividade elétrica

Fonte: Própria, 2018.

Tabela 12 Composições física, química e biológica das amostras de afluentes e efluentes tratados do sistema *wetland* construído, no dia 24/11/2018

Ponto de coleta	Parâmetro físico				Parâmetro químico								Parâmetro biológico	
	Cor aparente (PtCO)	Turbidez (FAU)	Temp. (°C)	SST ^a (mg/L)	SDT ^a (mg/L)	CE ^a (µS/cm)	DQO (mg/L)	OD (mg/L)	pH	Dureza (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Coliformes totais (NMP/100 mL)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)
P1	>1000,0	>100,0	24,0	253,0	857,5	1785,0	43,9	8,1	7,8	114,0	583,0	134,0	350	350
P2	578,0	33,0	23,9	73,0	790,7	1581,0	39,9	8,4	7,6	118,0	549,0	115,0	> 11000	2100
P3	421,0	24,0	23,9	42,0	724,3	1488,0	46,2	8,3	7,6	118,0	475,0	100,0	> 11000	11000
P4	499,0	30,0	23,8	51,0	725,8	1482,0	45,4	8,0	7,6	120,0	488,0	62,5	2900	2900
P5	570,0	33,0	23,8	60,0	792,1	1624,0	49,5	8,1	7,7	122,0	539,0	72,5	> 11000	11000
P6	512,0	32,0	23,8	52,0	737,7	1465,0	43,6	8,2	7,8	120,0	481,0	63,0	2900	> 11000
P7	430,0	22,0	23,8	51,0	720,0	1383,0	50,5	8,4	7,5	174,0	431,0	57,0	350	2100

^aSST: Sólidos suspensos totais; SDT; sólidos dissolvidos totais; CE: condutividade elétrica

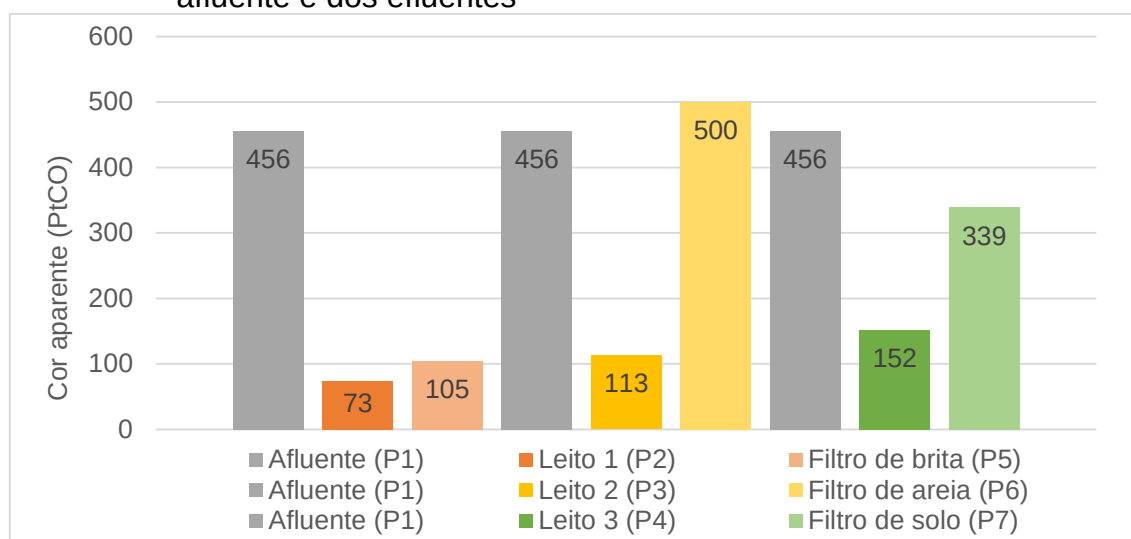
Fonte: Própria, 2018.

4.4.3.1 Cor aparente

As Figuras 40, 41 e 42 representam as variações dos resultados de cor aparente nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Com base na primeira análise (Figura 40), obteve-se as eficiências de remoção de 84,0%, 75,2% e 66,7% do parâmetro cor aparente do afluente para os efluentes dos leitos com plantas, leito 1 (P2), leito 2 (P3) e leito 3 (P4), respectivamente. Entretanto, os efluentes dos filtros de brita (P5), areia (P6) e solo (P7), tiveram um aumento dos valores de cor aparente comparados aos efluentes dos seus respectivos filtros, havendo eficiência negativa de remoção.

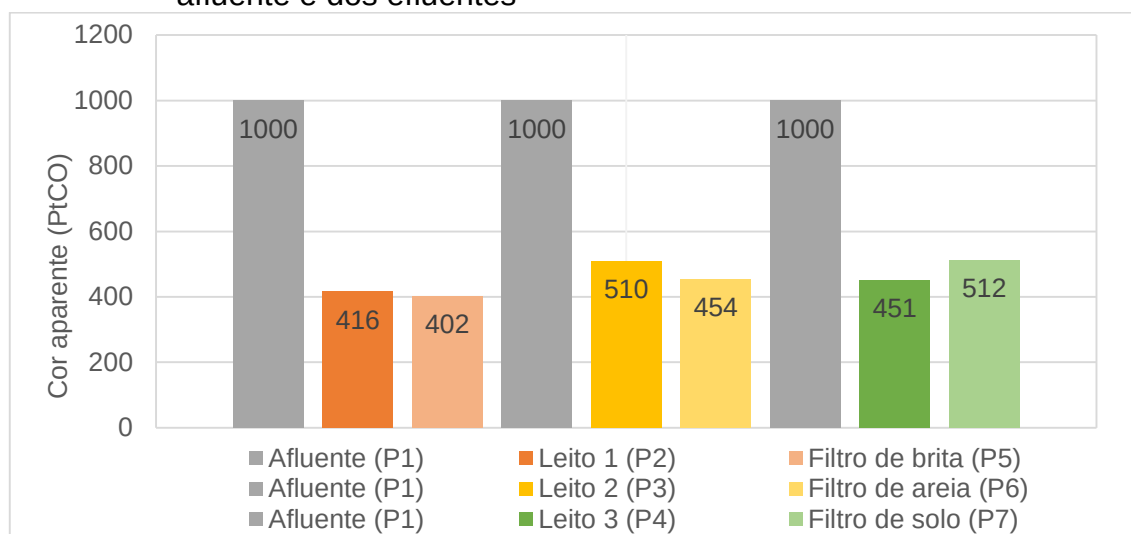
Figura 40 Variações dos resultados de cor aparente na primeira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Na segunda análise (Figura 41), as eficiências de remoção de cor aparente foram 58,4%, 49,0% e 54,9% nos pontos de coleta P2, P3 e P4, respectivamente, dos leitos. Nos filtros de brita (P5) e areia (P6) obteve-se uma redução complementar de 3,4% e 11,0% na cor aparente, mas o filtro de solo (P4) foi ineficiente na remoção desta.

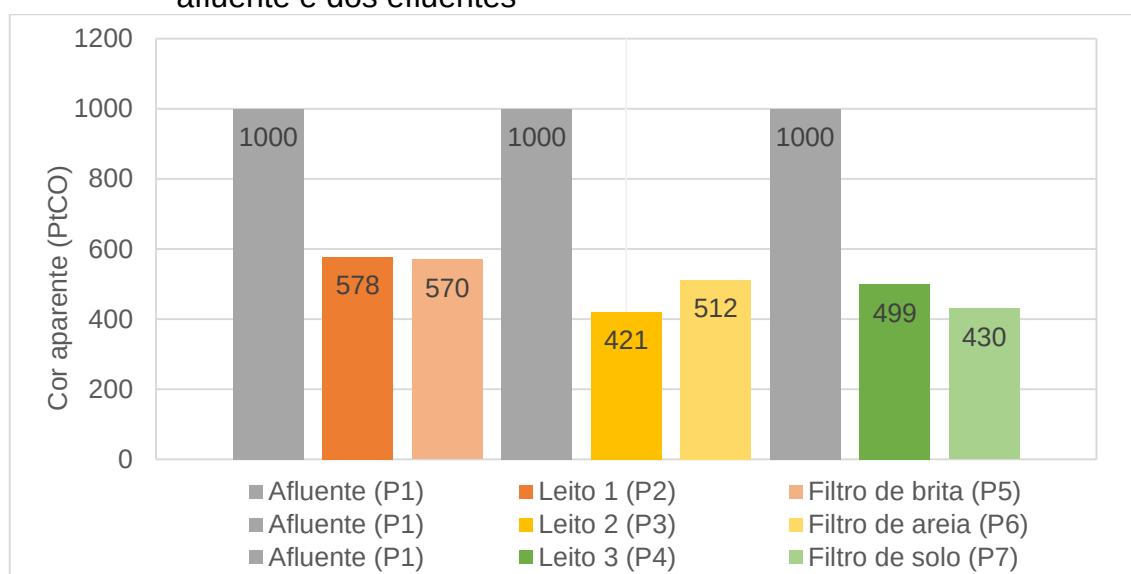
Figura 41 Variações dos resultados de cor aparente na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Em relação a terceira análise (Figura 42), as eficiências de remoção da cor aparente foram de 42,2%, 57,9% e 50,1%, após os leitos 1 (P2), 2 (P3) e 3 (P4), respectivamente. Complementando-se a remoção de 1,4% e 13,8% de cor aparente nos filtros de brita (P5) e solo (P7), contrário a segunda análise, onde não se obteve eficiência no filtro de areia (P6). Neste caso, ocorreu o problema supracitado na coleta da amostra deste filtro.

Figura 42 Variações dos resultados de cor aparente na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Portanto, o sistema *wetland* construído apresentou capacidade de remoção do parâmetro cor aparente nos efluentes provenientes dos leitos com plantas. Todavia, os filtros (P5, P6 e P7) resultaram em eficiências negativa e positiva de remoção nas análises de cor aparente.

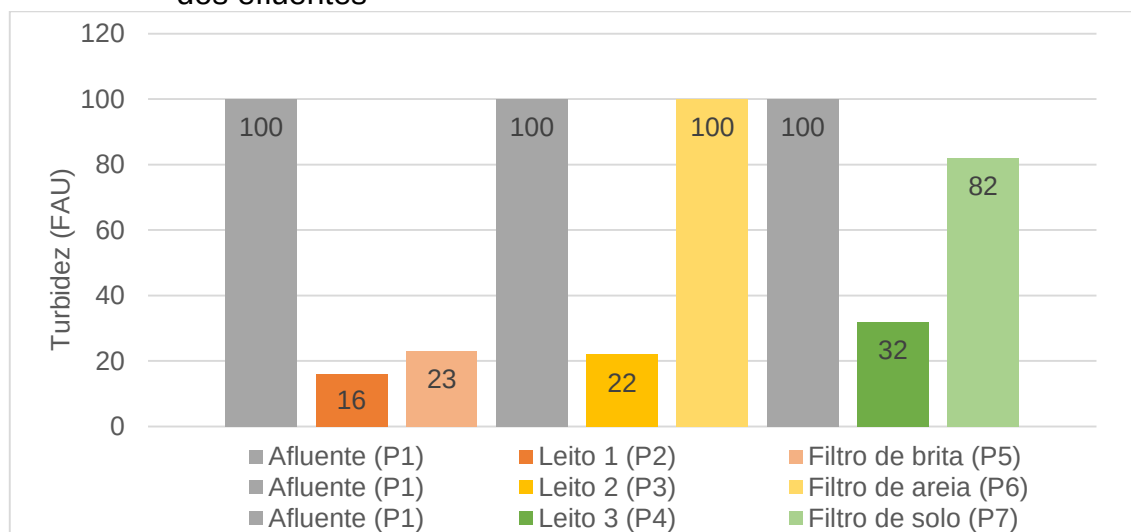
Devido a discrepância entre os valores da primeira com as demais análises, pôde-se observar a ocorrência de alguma adversidade nesse parâmetro, aferido pelo Spectrodirect (Lovibond). Para tanto, precedeu-se a realização das demais análises no equipamento Spectroquant® Move 100.

4.4.3.2 Turbidez

As Figuras 43, 44 e 45 apresentam as variações dos resultados de turbidez nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Na primeira análise (Figura 43) obteve-se as eficiências de redução de 84,0%, 78,0% e 68,0% da turbidez do afluente para os efluentes dos leitos com plantas, P2, P3 e P4, respectivamente. Entretanto, os efluentes dos filtros de brita (P5), areia (P6) e solo (P7) contribuíram com o aumento nos valores de turbidez em relação aos efluentes dos seus respectivos filtros, prejudicando a melhoria da eficiência de remoção deste parâmetro.

Figura 43 Variações dos resultados de turbidez na primeira análise do afluente e dos efluentes

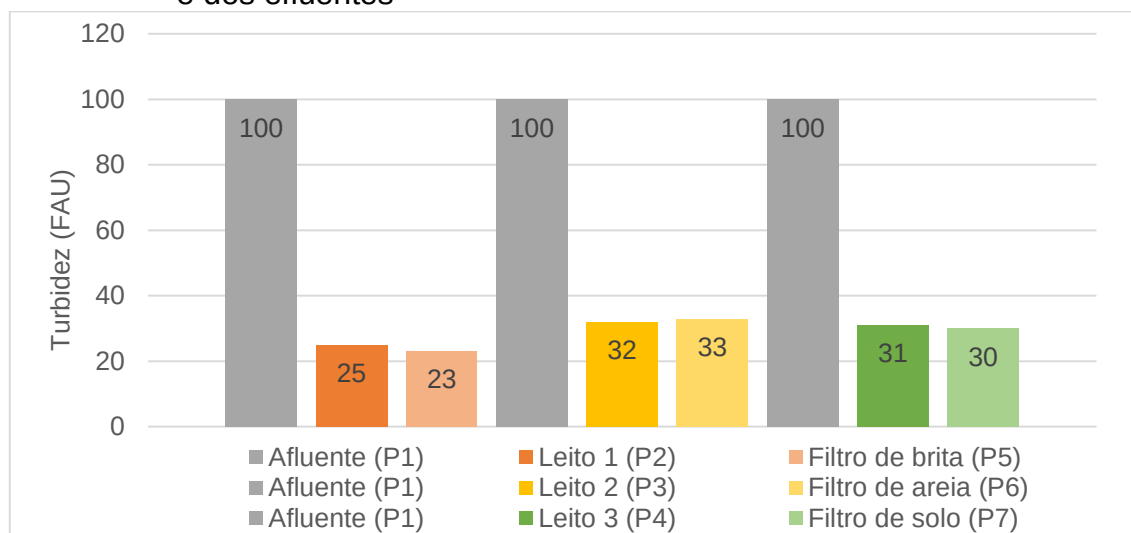


Fonte: Própria, 2018.

Conforme a Figura 43, verifica-se que os filtros de areia (P6) e solo (P7) resultaram em uma eficiência negativa de remoção, em virtude do carreamento de partículas destes substratos na saída dos filtros durante a primeira coleta. Após a detecção desse problema foi adicionado uma camada de brita sobre esses materiais, assim como uma tela na saída dos filtros.

Na segunda análise (Figura 44), as eficiências de remoção da turbidez foram de 75,0%, 68,0% e 69,0%, para os efluentes dos leitos, P2, P3 e P4, respectivamente. Acrescentando-se a remoção de 8,0% e 3,2% nos filtros de brita (P5) e solo (P7), com exceção do filtro de areia (P6) que resultou em uma eficiência negativa.

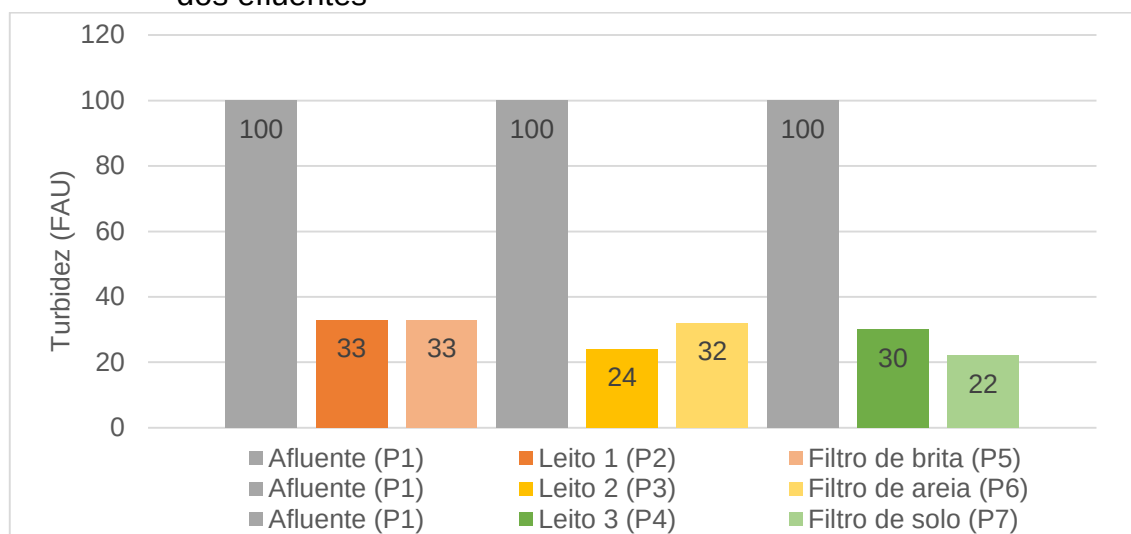
Figura 44 Variações dos resultados de turbidez na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Conforme a terceira análise (Figura 45), houve eficiências de remoção de 67,0%, 76,0% e 70,0% nos pontos de coleta P2, P3 e P4, respectivamente, dos leitos. Somente o filtro de solo (P7) foi eficiente para complementar a redução deste parâmetro, contribuindo com a remoção de 26,7 %.

Figura 45 Variações dos resultados de turbidez na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

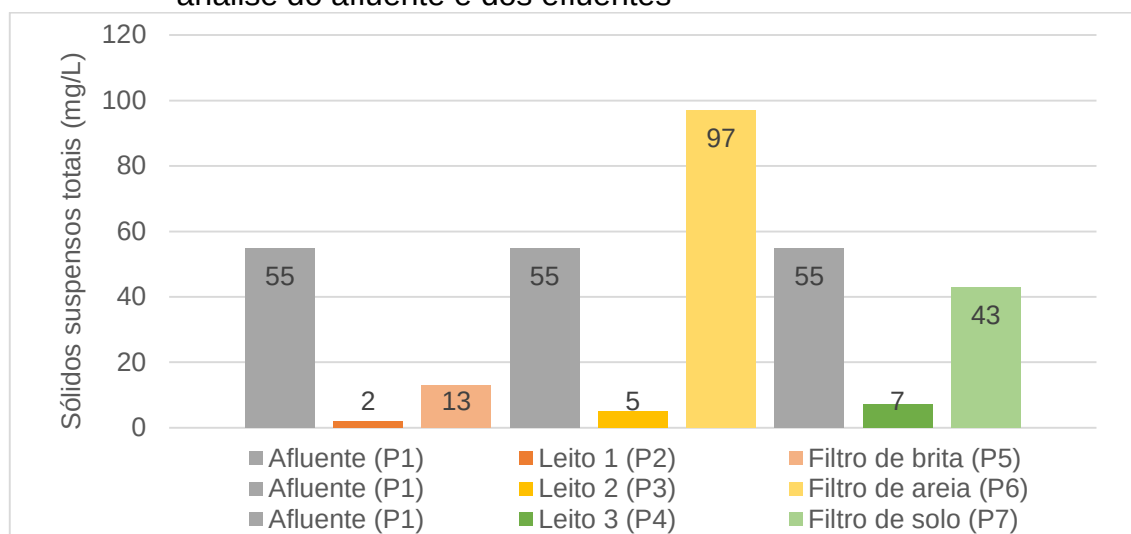
Face ao exposto, pode-se observar que o sistema tem capacidade de reduzir a turbidez do afluente (P1) de um valor maior que 100,0 FAU para uma faixa média de 20,0 a 30,0 FAU após os leitos com plantas (P2, P3 e P4). Contudo, os filtros (P5, P6 e P7) contribuíram variavelmente com redução da carga poluidora, tanto eficiência negativa como positiva, nas análises de turbidez.

4.4.3.3 Sólidos suspensos totais

As Figuras 46, 47 e 48 mostram as variações dos resultados de sólidos suspensos totais nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentadas na Tabela 10, 11 e 12.

Na primeira análise (Figura 46), observa-se que os efluentes dos leitos P2, P3 e P4 tiveram redução de sólidos suspensos totais em relação ao afluente, com remoção de 96,4%, 90,9% e 87,3%, respectivamente. No entanto, não houve acréscimo na eficiência de remoção deste parâmetro nos efluentes oriundos dos filtros.

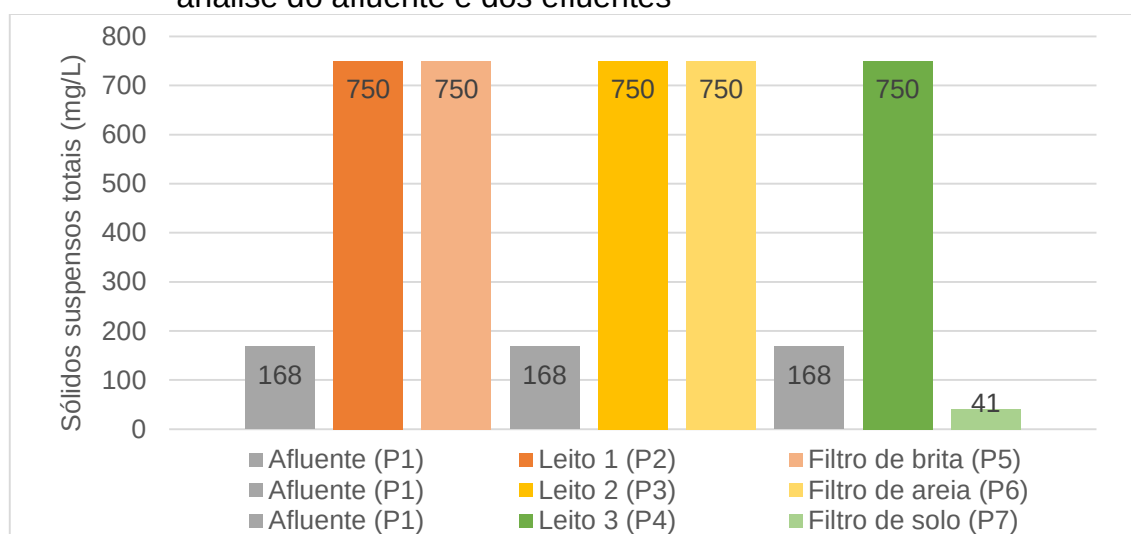
Figura 46 Variações dos resultados de sólidos suspensos totais na primeira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Na segunda análise (Figura 47), verifica-se uma alteração significativa dos resultados, sem nenhuma eficiência de remoção nos leitos e filtros, com exceção do efluente do filtro de solo (P7) que contribuiu em 94,5%. Cabe ressaltar que, quando o equipamento atinge faixas elevadas de leitura, pode-se obter resultados acima do limite estabelecido no próprio aparelho. Além disso, acredita-se as precipitações ocorridas no dia e na semana da coleta influenciaram nos valores elevados de SST.

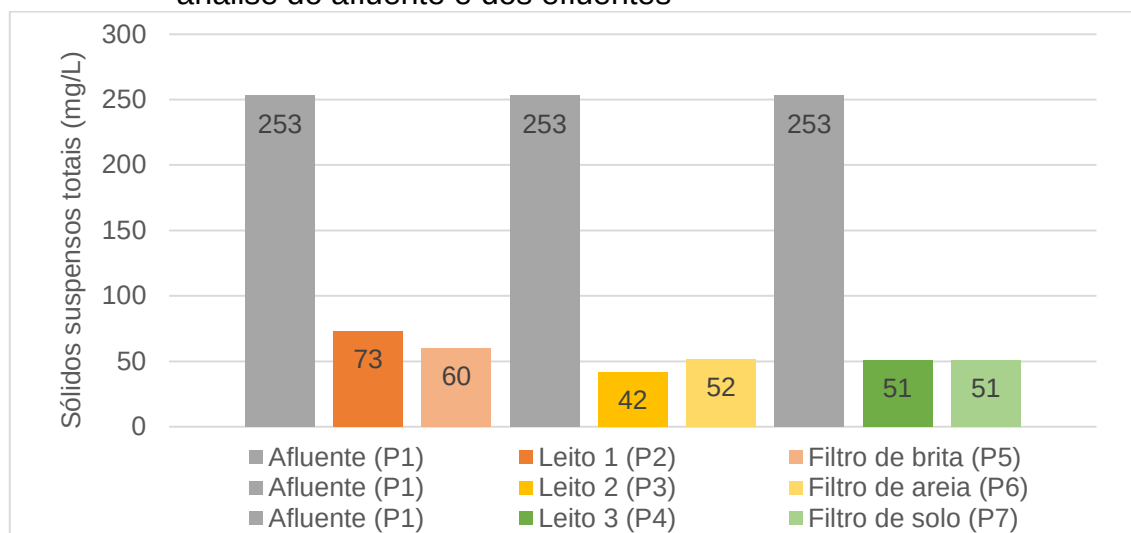
Figura 47 Variações dos resultados de sólidos suspensos totais na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Na terceira análise (Figura 48) obteve-se as eficiências de remoção de 71,1%, 83,4% e 79,8% de SST do afluente para os efluentes dos leitos com plantas, P2, P3 e P4, respectivamente. Apenas o filtro de brita (P5) foi eficiente para complementar a redução deste parâmetro, contribuindo com a remoção de 17,8%.

Figura 48 Variações dos resultados de sólidos suspensos totais na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Fia *et al.* (2017), utilizando o SAC de escoamento subsuperficial horizontal, cultivado com *Typha latifolia* L. e como substrato brita, monitorado por 120 dias, verificou a eficiência média de 84% na remoção de SST. Já, Costa *et al.* (2018), usando um sistema composto de reator UASB seguido de um SAC de escoamento horizontal subsuperficial, vegetado com *Typha latifolia* L, com monitoramento por quatro anos, obteve resultados de eficiência de remoção de 87% de SST.

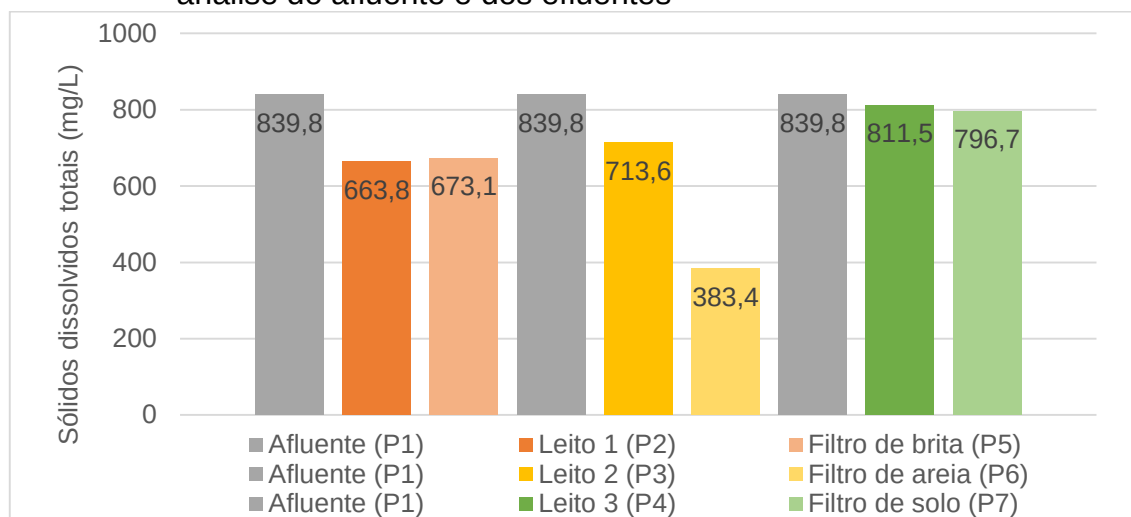
Assim, pode-se concluir que os leitos com plantas *Typha latifolia* L. estão sendo eficientes na remoção de SST, com possíveis alterações devido as precipitações. Somente, os filtros de brita e solo mostraram-se eficientes na remoção complementar de SST, mas tal comportamento não foi mantido em todas análises.

4.4.3.4 Sólidos dissolvidos totais

As Figuras 49, 50 e 51 representam as variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Na primeira análise (Figura 49), obteve-se as eficiências de redução de 21,0%, 15,0% e 3,4% de sólidos dissolvidos totais do afluente para os efluentes dos leitos com plantas, P2, P3 e P4, respectivamente. Ocorrendo uma remoção complementar de 46,3% e 1,8% nos filtros de areia (P6) e solo (P7), respectivamente.

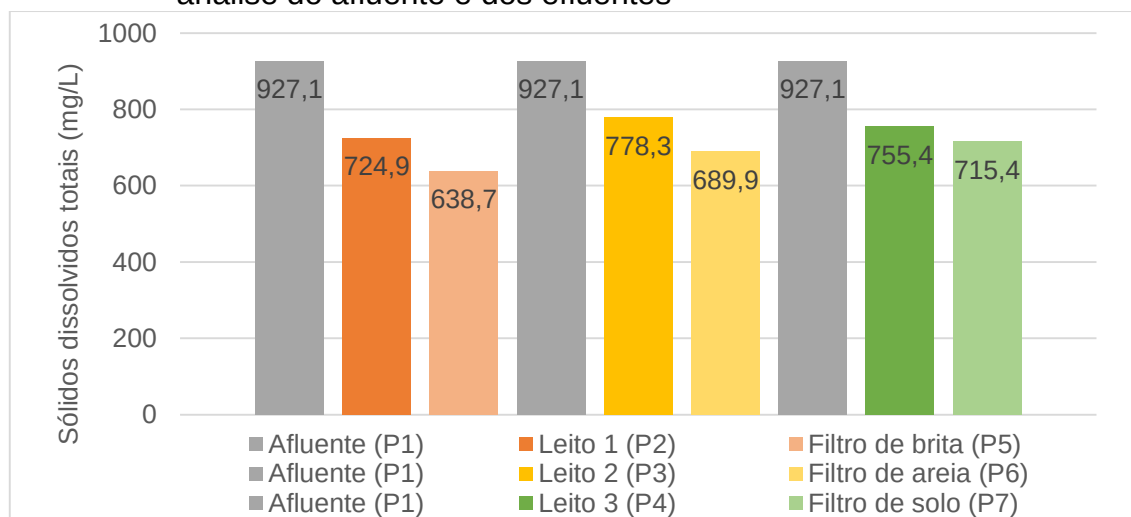
Figura 49 Variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais na primeira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Na segunda análise (Figura 50) verifica-se uma baixa redução progressiva de SDT com as eficiências de 21,8%, 16,1% e 18,5% nos leitos, P2, P3, P4, respectivamente. Complementando-se a remoção de 11,9%, 11,4% e 5,4% de SDT nos filtros de brita (P5), areia (P6) e solo (P7).

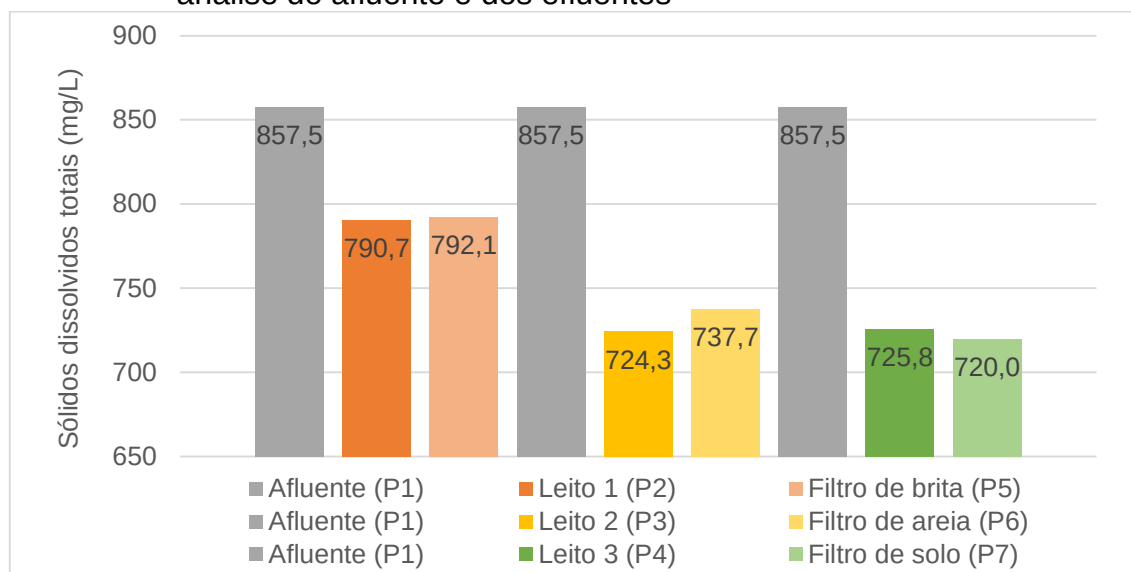
Figura 50 Variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Observa-se que na terceira análise (Figura 51), houve eficiência de remoção de 7,8%, 15,5% e 15,4% de SDT após os leitos, P2, P3 e P4, respectivamente. Somente o filtro de solo (P7), apresentou redução em 0,8% de SDT no efluente oriundo do leito 3 (P4). Os demais filtros foram ineficientes na remoção de sólidos dissolvidos totais.

Figura 51 Variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Portanto, pode-se constatar uma baixa remoção de sólidos dissolvidos totais nos efluentes provenientes dos leitos com plantas. Presume-se que os valores reduzidos de eficiência estão relacionados a baixa atuação dos mecanismos de tratamento do sistema *wetland* construído, para sólidos dissolvidos totais.

Quanto à remoção complementar, o filtro de solo apresentou-se eficiência positiva em todas as análises. Entretanto, os filtros de brita e areia demonstraram eficiência positiva e negativa na remoção de SDT.

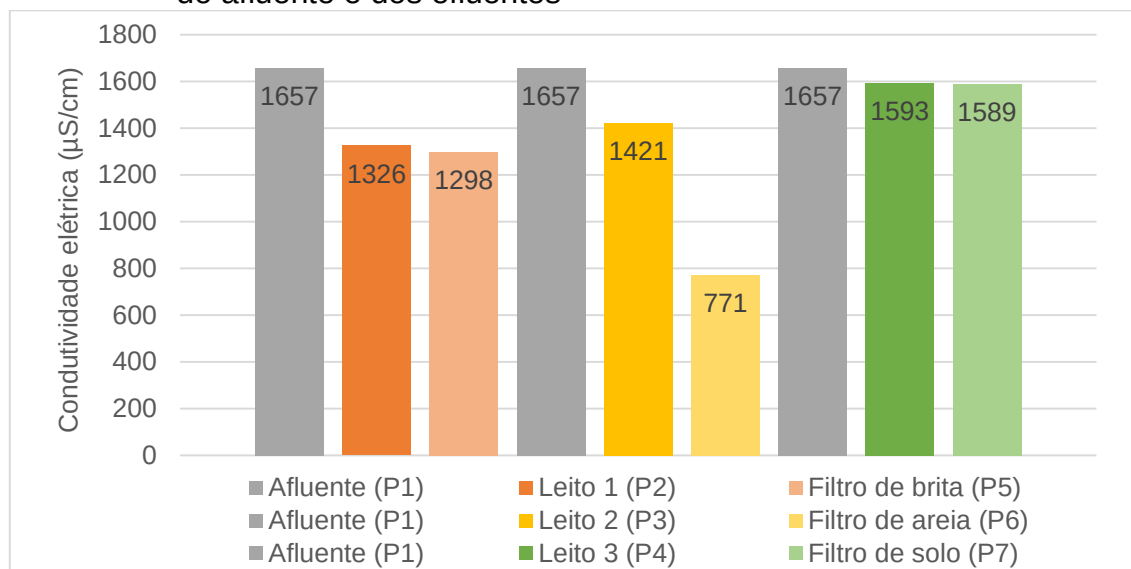
4.4.3.5 Condutividade elétrica

As Figuras 52, 53 e 54 apresentam as variações dos resultados de condutividade elétrica nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Metcalf e Eddy (2016) explica que a condutividade está relacionada a quantidade de íons na solução. Quanto maior a condutividade, maior a concentração de íons no meio. Observa-se que as variações dos resultados de sólidos dissolvidos totais (Figuras 49, 50 e 51) são similares aos resultados de condutividade elétrica (Figuras 52, 53 e 54), comprovando-se uma relação entre esses parâmetros.

Na primeira análise (Figura 52) obteve-se a redução de 20,0%, 14,2% e 3,9% da condutividade elétrica do afluente bruto para os efluentes dos leitos com plantas, P2, P3 e P4, respectivamente. Os filtros de brita (P5), areia (P6) e solo (P7) diminuíram progressivamente os valores de condutividade de 2,1%, 45,7% e 1,8%, respectivamente. Acredita-se que o excesso de partículas suspensas na amostra do filtro de areia tenha interferido no valor elevado de redução da condutividade elétrica.

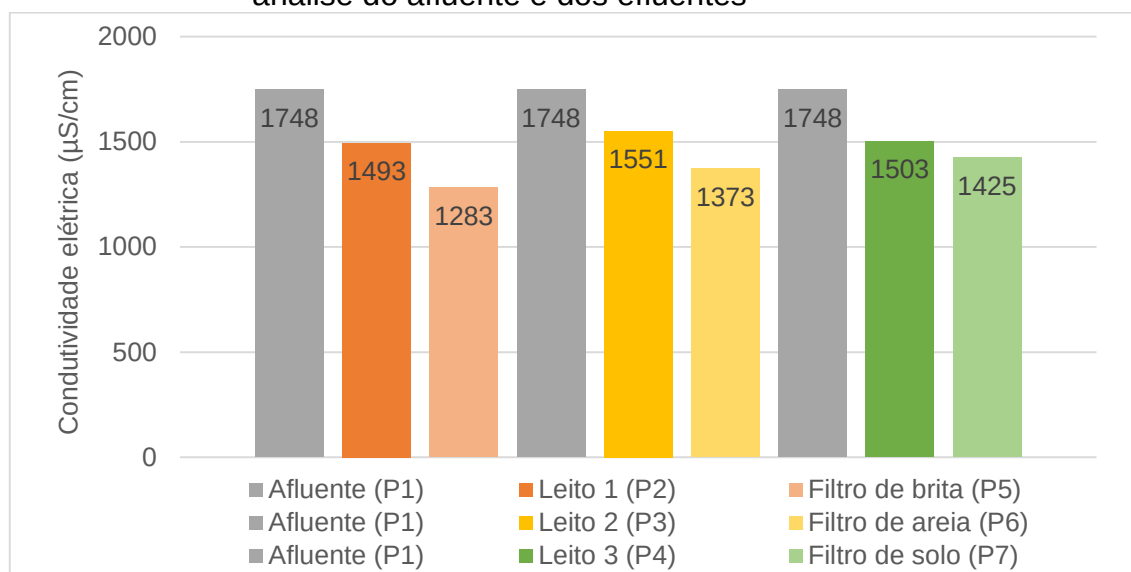
Figura 52 Variações dos resultados de condutividade elétrica na primeira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

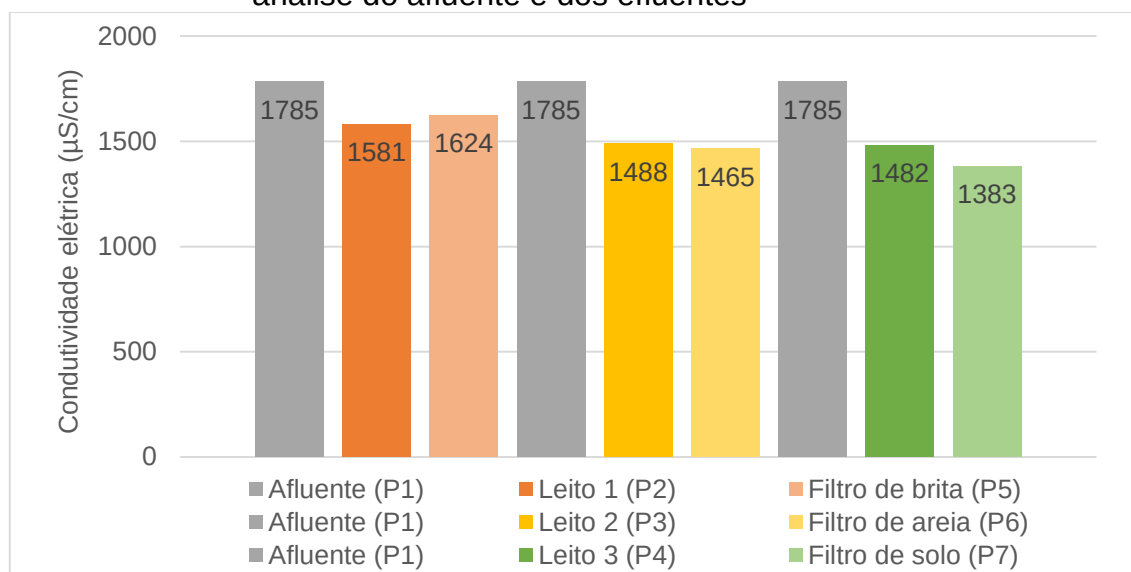
Na segunda análise (Figura 53), as eficiências de redução foram 14,6%, 11,3% e 14,0% nos pontos de coleta P2, P3 e P4, respectivamente, dos leitos. Nos filtros de brita (P5), areia (P6) e solo (P7), obteve-se uma redução complementar de 14,1%, 11,5% e 5,2% na condutividade elétrica. Já, na terceira análise (Figura 54), reduziu-se em 11,4%, 16,6% e 17,0% após os leitos P2, P3 e P4, respectivamente. Acrescentando-se uma diminuição de 1,5% e 6,7% dos filtros de areia (P6) e solo (P7), enquanto que o filtro de brita (P5) elevou o valor de condutividade elétrica do efluente.

Figura 53 Variações dos resultados de condutividade elétrica na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Figura 54 Variações dos resultados de condutividade elétrica na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

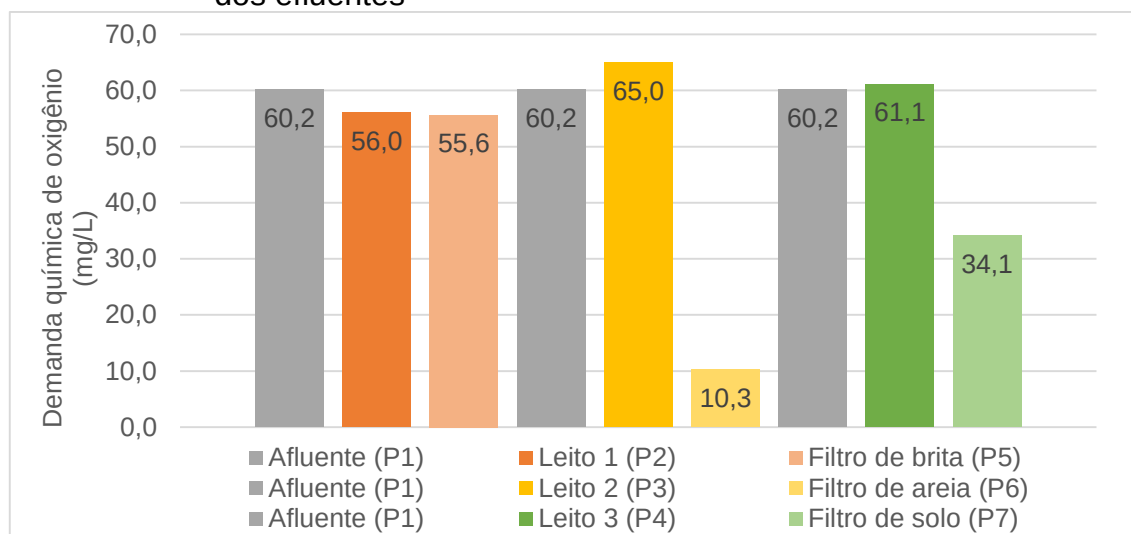
Nos leitos com plantas, espera-se que a condutividade elétrica seja aumentada em virtude da degradação da matéria orgânica, cujo processo libera íons a solução e juntamente com as perdas de água por evapotranspiração. Isto proporciona ao meio, um aumento na concentração de íons no líquido presente nos leitos (FIA *et al.*, 2017). Pelas análises, pode-se verificar que houve a diminuição dos valores de condutividade elétrica nos leitos em relação ao afluente. Ademais, os filtros contribuíram positivamente na redução deste parâmetro nos efluentes finais.

4.4.3.6 Demanda química de oxigênio

As Figura 55, 56 e 57 apresentam as variações dos resultados de demanda química de oxigênio nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Na primeira análise (Figura 55), apenas o efluente do leito 1 (P2) resultou em 7,0% de eficiência na remoção de DQO. Quanto aos filtros, verifica-se as reduções desse parâmetro de 0,7% no filtro de brita (P5), 84,2% no filtro de areia (P6) e 44,2% no filtro de solo (P7). No entanto, acredita-se que pode ter ocorrido interferência na amostra devido ao carreamento de partículas nestes pontos de coleta. Tal problema foi solucionado após a primeira análise.

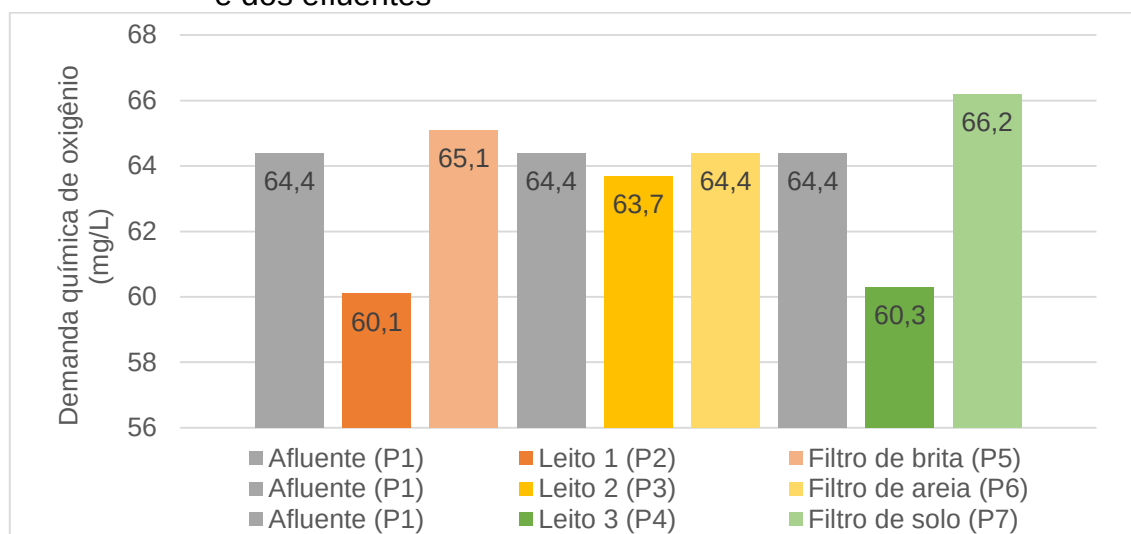
Figura 55 Variações dos resultados de DQO na primeira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

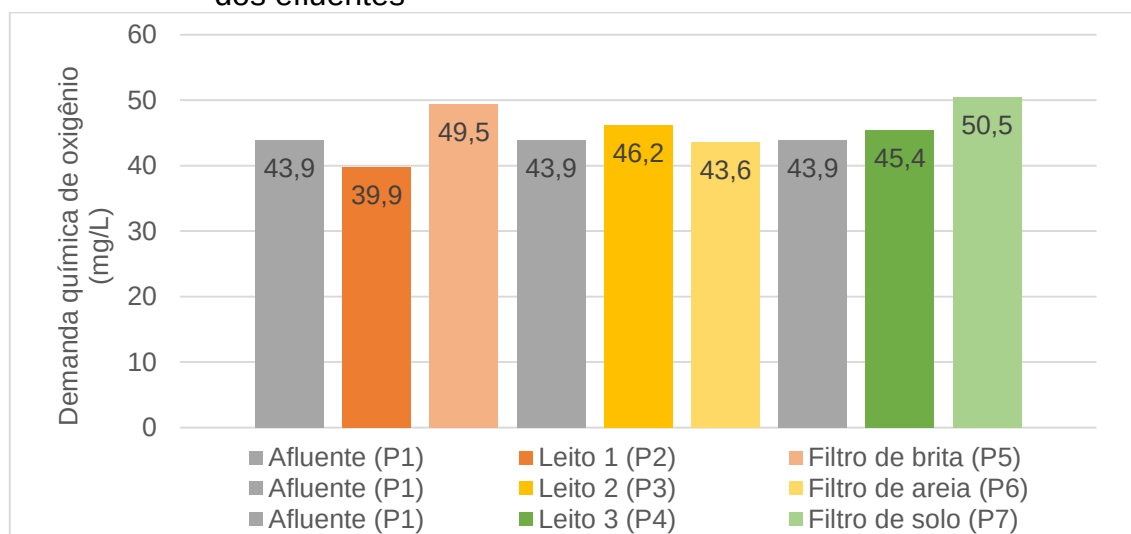
Os resultados da segunda análise (Figura 56) apresentaram-se com índices de remoção de 6,7%, 1,1% e 6,4% de DQO dos efluentes dos leitos P1, P2 e P3, respectivamente. Contudo, não houve acréscimo na eficiência de remoção deste parâmetro nos efluentes oriundos dos filtros. Já, na terceira análise (Figura 57), somente o efluente do leito 1 (P2) resultou em 9,2% de eficiência na remoção de matéria orgânica, assim como, o efluente do filtro de areia (P6) com redução de 5,6% de DQO.

Figura 56 Variações dos resultados de DQO na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Figura 57 Variações dos resultados de DQO na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Como as plantas ainda não atingiram a idade ideal e o sistema está em fase de estabilização, pode-se constatar que há variações distintas na remoção da matéria orgânica, ou sem nenhuma remoção. Concomitante a isso, a baixa condutividade elétrica dos leitos justifica os baixos valores de redução da matéria orgânica, visto que esse parâmetro tende a aumentar com a degradação do material orgânico presente no afluente.

Estudos desenvolvidos por Fia *et al.* (2017), após um mês de implantação do sistema, monitorado por 120 dias, verificaram a eficiência média de 79% na remoção de DQO.

Enquanto que, Costa *et al.* (2018), com sistema monitorado por quatro anos, obteve resultados de eficiência de remoção de 72% de DQO.

O oxigênio é essencial para respiração dos microorganismos responsáveis pela decomposição aeróbia da matéria orgânica (METCALF; EDDY, 2016). Para tanto, verifica-se que os valores de oxigênio dissolvido nos leitos e filtros variaram na faixa de 8,0 a 8,7 mg/L, com temperaturas acima de 21°C. Portanto, constata-se que o sistema está propício a degradação da matéria orgânica por ter oxigênio disponível no meio.

4.4.3.7 Potencial hidrogeniônico (pH)

Conforme os resultados das análises (Tabelas 10, 11 e 12), os valores de pH na saída dos leitos e filtros variaram na faixa de 7,4 a 8,6. Sperling (2005) relata que o pH do esgoto tende a ser ácido na faixa de 6,7 a 7,5, entretanto Metcalf e Eddy (2016) explicam que o pH pode variar de 6,0 a 9,0. Assim, pode-se verificar que o sistema está em condições ideais para sobrevivência de microorganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica.

Ressalta-se a discrepância dos valores da primeira análise com as demais, em virtude do uso de um equipamento antigo sem calibração para aferição do pH das amostras. Nas análises subsequentes realizou-se a medição deste parâmetro em outro equipamento.

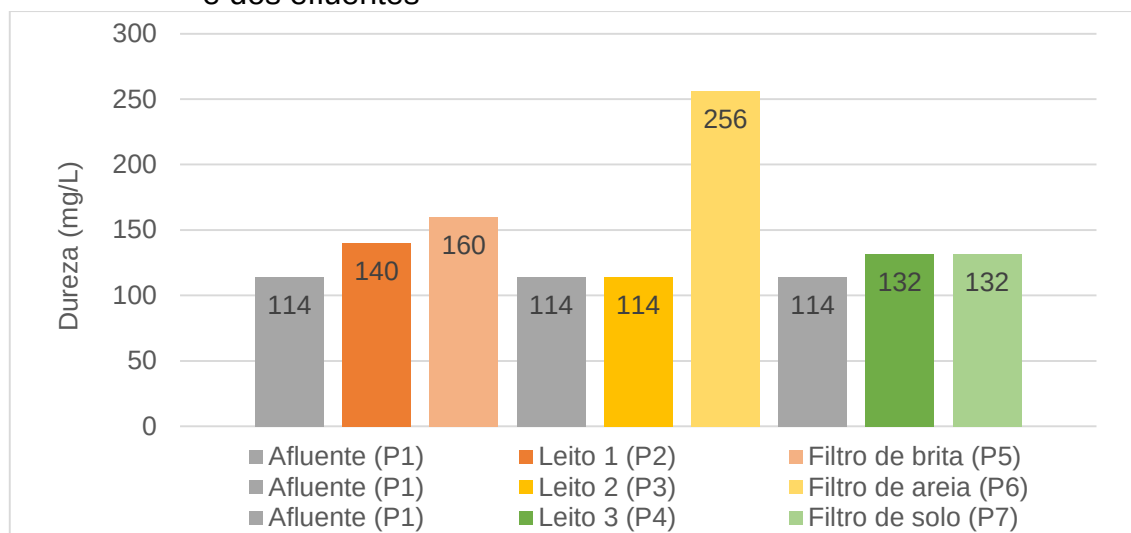
4.4.3.8 Dureza e alcalinidade

As Figura 58, 59 e 60 apresentam as variações dos resultados de dureza nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), tratadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Na primeira análise (Figura 58), os valores de dureza do afluente (P1) aumentaram após os leitos com plantas (P2, P3 e P4), assim como, nos filtros de brita (P5) e areia (P6), sem alteração no filtro de solo (P7) correspondente ao leito 2 (P4). Presume-se

que o aumento ocorreu pela concentração de cátions multimetálicos no meio, o que pode ser observado pelos elevados valores de alcalinidade.

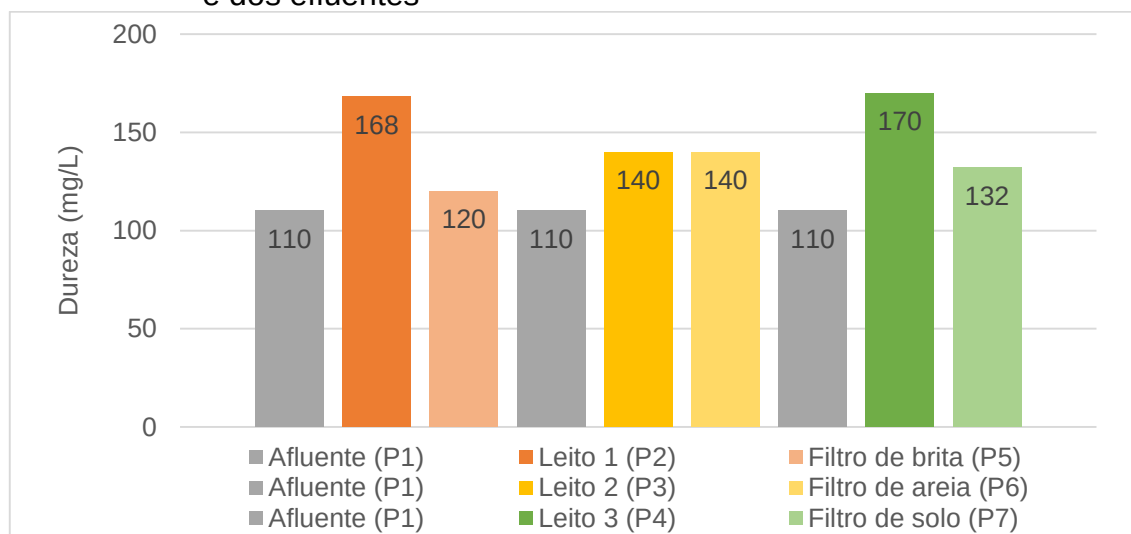
Figura 58 Variações dos resultados de dureza na primeira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Na segunda análise (Figura 59), obteve-se o aumento nos valores da dureza nos leitos com plantas (P2, P3 e P4) em relação ao afluente (P1). Entretanto, os valores reduziram em 28,6% no filtro de brita (P5) e 22,4% no filtro de solo (P7), sem alteração no filtro de areia (P6) relativo ao leito 2 (P3).

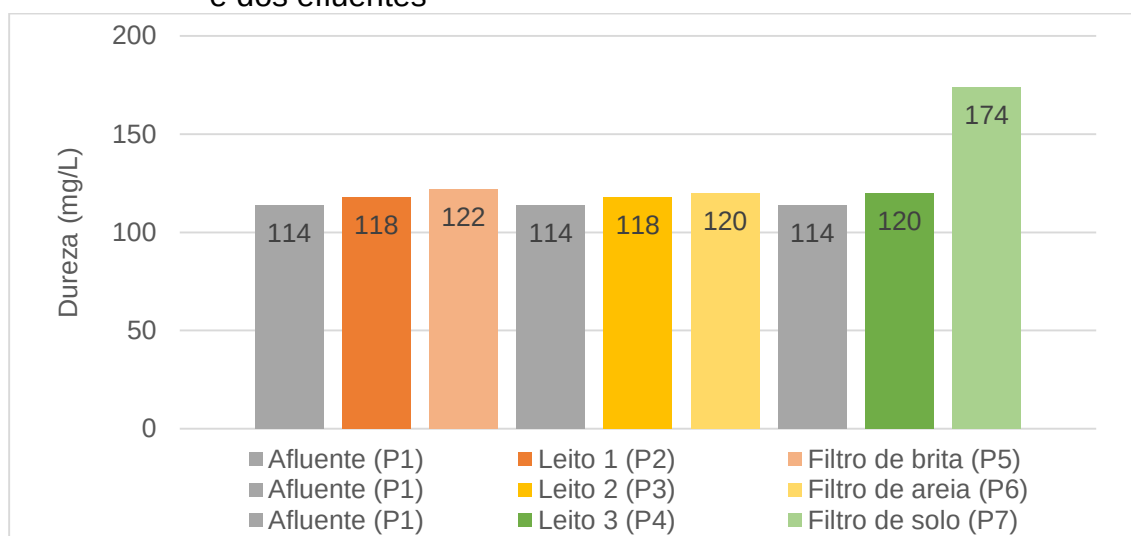
Figura 59 Variações dos resultados de dureza na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Quanto à terceira análise (Figura 60), resultou no aumento dos valores de dureza nos leitos com plantas (P2, P3 e P4) comparados ao afluente (P1). Nos efluentes dos filtros (P5, P6 e P7) houve um acréscimo de dureza conforme seu correspondente leito com plantas.

Figura 60 Variações dos resultados de dureza na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Sperling (2005) aponta que a dureza não é importante para o caráter sanitário. Levando em consideração, o reuso de água em unidades condensadoras, a dureza deve ser adequada para que não ocorra incrustações nas tubulações.

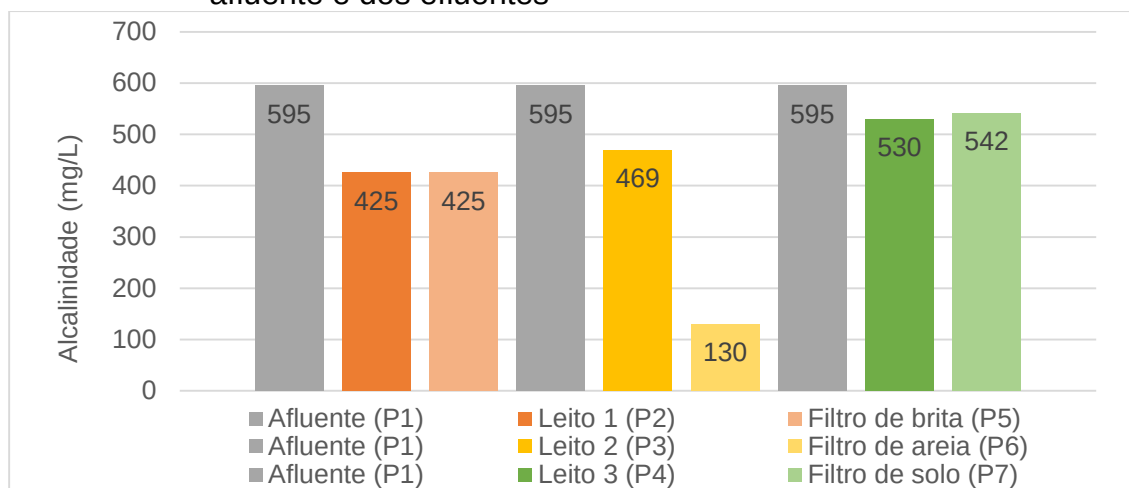
As Figuras 61, 62 e 63 mostram as variações dos resultados de alcalinidade nas análises das amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Segundo Metcalf e Eddy (2016), a alcalinidade é uma característica importante no efluente, visto que é necessária uma quantidade adequada para que ocorra a nitrificação completa, um dos processos responsáveis pela remoção de nitrogênio.

Na primeira análise (Figura 61), obteve-se a redução de 28,6%, 21,2% e 10,9% de alcalinidade do afluente para os efluentes dos leitos com plantas, P2, P3 e P4, respectivamente. Entretanto, os efluentes dos filtros de brita (P5) e solo (P7) não complementaram na eficiência, com exceção do filtro de areia (P6) que acrescentou

72,3%. Acredita-se que houve alguma interferência nessa amostra, visto que nas demais análises não se observam o mesmo comportamento.

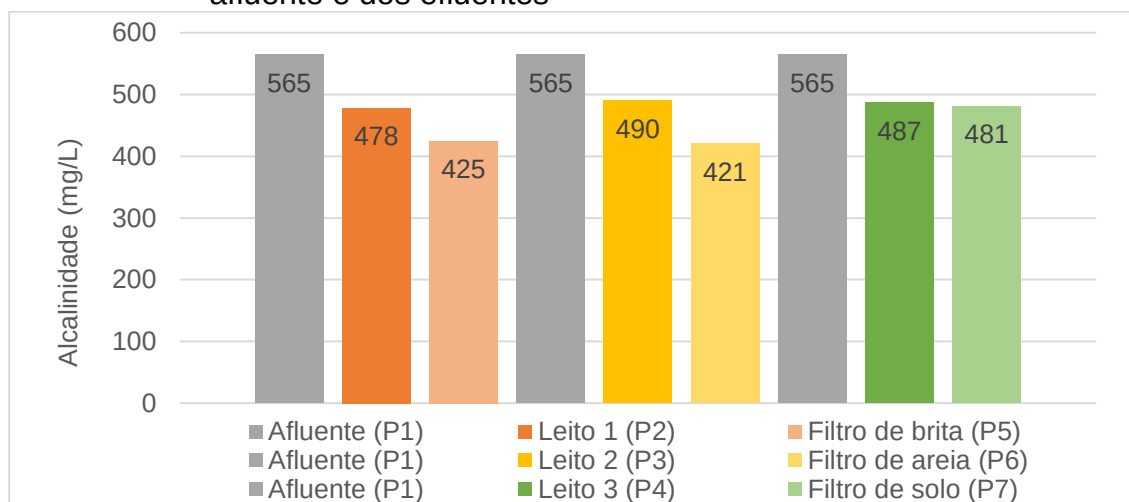
Figura 61 Variações dos resultados de alcalinidade na primeira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

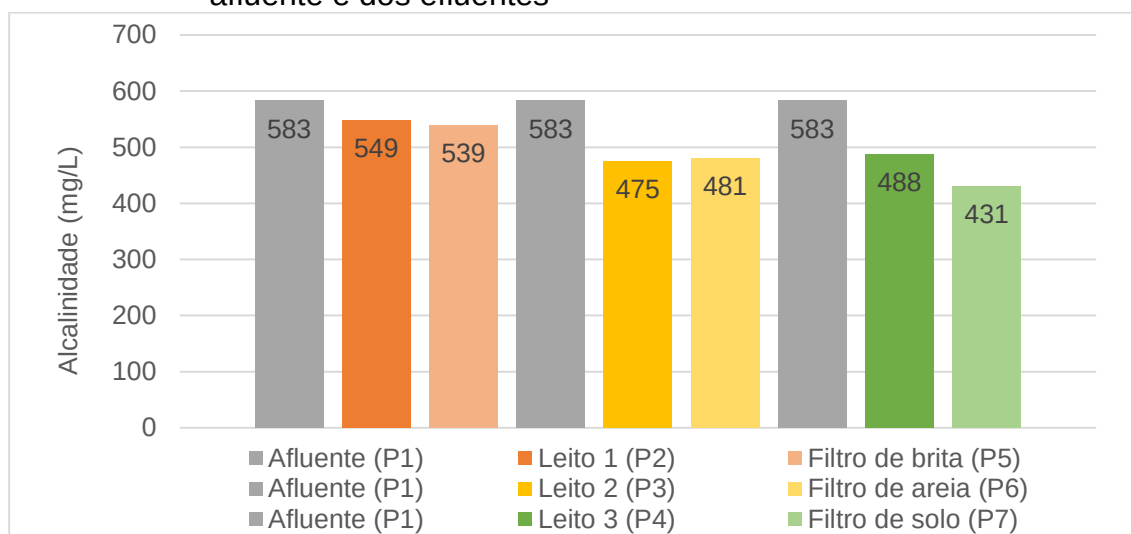
Na segunda análise (Figura 62), a alcalinidade do afluente bruto foi diminuída a 15,4%, 13,3% e 13,8% nos pontos de coleta P2, P3 e P4, respectivamente, dos leitos. Nos filtros de brita (P5), areia (P6) e solo (P7) obteve-se uma redução complementar progressiva de 11,1%, 14,1% e 1,2% na alcalinidade. Já, na terceira análise (Figura 63) reduziram-se em 5,8%, 18,5% e 16,3% nos leitos, P2, P3 e P4, respectivamente. Acrescentando-se uma remoção de 1,8% do filtro de brita (P5) e 11,7% do filtro de solo (P7), sem redução no filtro de areia (P6).

Figura 62 Variações dos resultados de alcalinidade na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Figura 63 Variações dos resultados de alcalinidade na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Diante disso, pode-se constatar que o sistema *wetland* construído tem reduzido a alcalinidade do meio.

4.4.3.9 Cloretos

Metcalf e Eddy (2016) aponta que o cloreto pode afetar as aplicações do reuso final do efluente tratado. As Figuras 64, 65 e 66 retratam os resultados de cloretos das análises nas amostras de afluente (P1) e efluentes (P2, P3, P4, P5, P6 e P7), apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

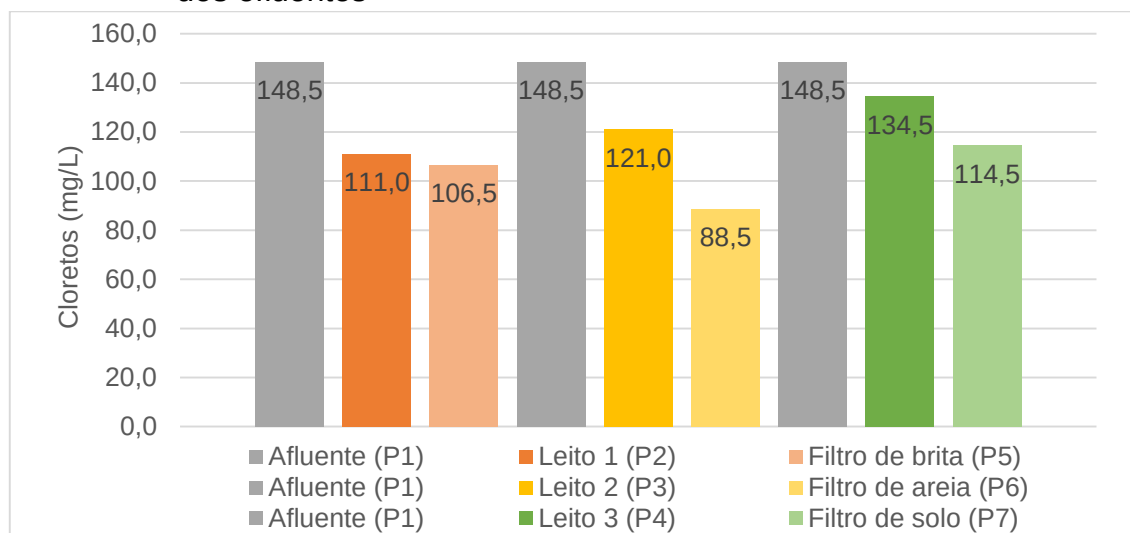
Verifica-se que na primeira análise (Figura 64), a concentração de cloretos do afluente bruto foi reduzida a 25,3% no primeiro leito, 18,5% no segundo e no terceiro, 9,4%. Nos efluentes dos filtros houve a eficiência de remoção de 4,1%, 26,9% e 14,9% para brita (P5), areia (P6) e solo (P7).

Já, na segunda análise (Figura 65) observa-se uma redução de cloretos com as eficiências de 23,3%, 12,1% e 21,4% nos leitos, P2, P3, P4, respectivamente. Complementando-se por uma baixa remoção de 7,2% e 1,0% de cloretos nos filtros de areia (P6) e solo (P7).

Na terceira análise (Figura 66), as eficiências de remoção dos efluentes dos leitos foram de 14,2%, 25,4% e 53,4%, para P2, P3 e P4, respectivamente. Nos efluentes

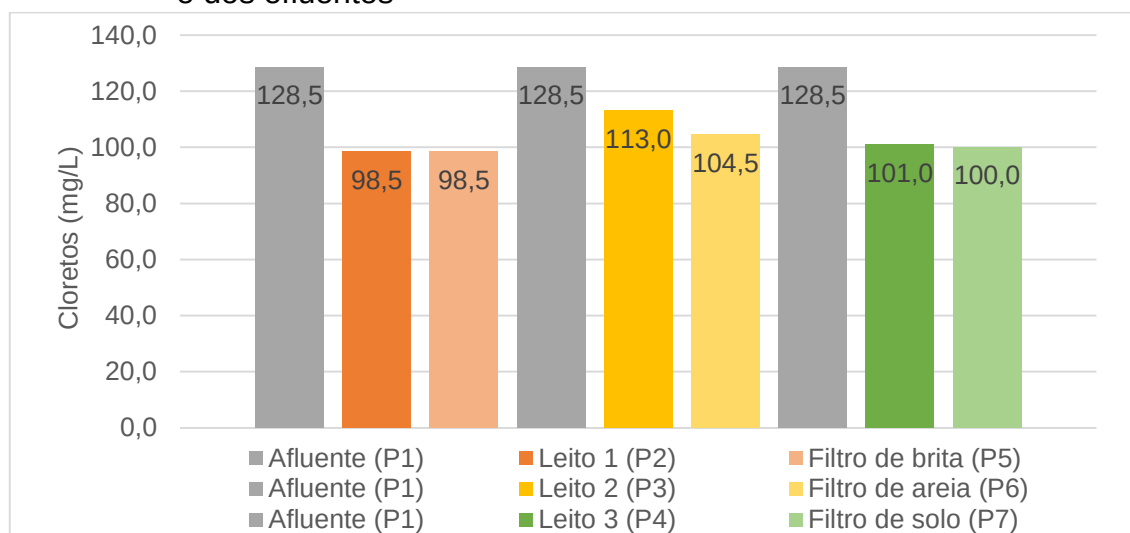
dos filtros houveram as reduções complementares de 37,0%, tanto no filtro de brita (P5) quanto no filtro de areia (P6), e de 8,8% no filtro de solo (P7).

Figura 64 Variações dos resultados de cloretos na primeira análise do afluente e dos efluentes



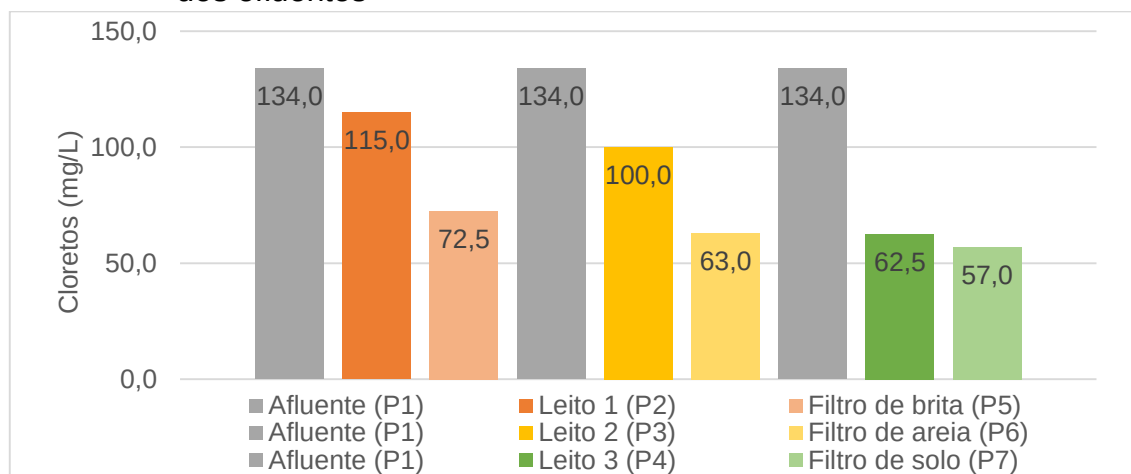
Fonte: Própria, 2018.

Figura 65 Variações dos resultados de cloretos na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Figura 66 Variações dos resultados de cloretos na terceira análise do afluente e dos efluentes



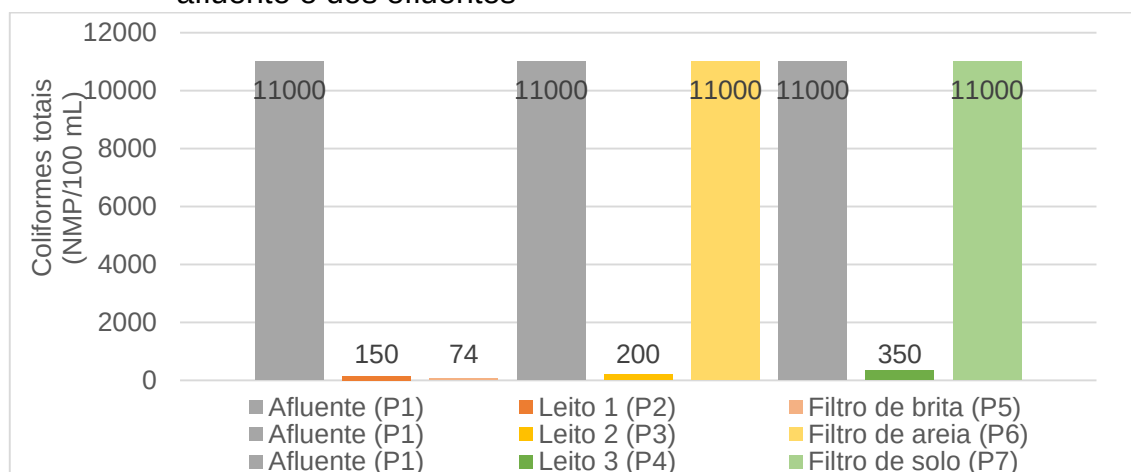
Fonte: Própria, 2018.

Ante o exposto, pode-se observar que o sistema *wetland* construído tem reduzido a concentração de cloretos no meio.

4.4.3.10 Coliformes totais e termotolerantes

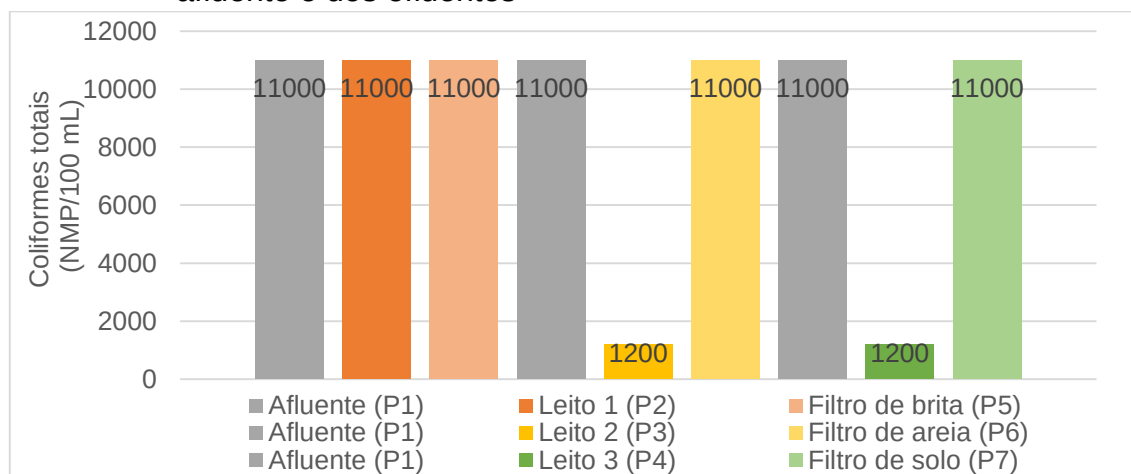
Conforme apresentado nas Tabelas 10, 11 e 12, observa-se que nas três análises obteve-se grandes variações de remoção negativa e positiva, tanto de coliformes totais (Figuras 67, 68 e 69) quanto de termotolerantes (Figuras 70, 71 e 72) do afluente (P1) para os efluentes dos leitos (P2, P3 e P4), bem como os efluentes finais dos filtros (P5, P6 e P7).

Figura 67 Variações dos resultados de coliformes totais na primeira análise do afluente e dos efluentes



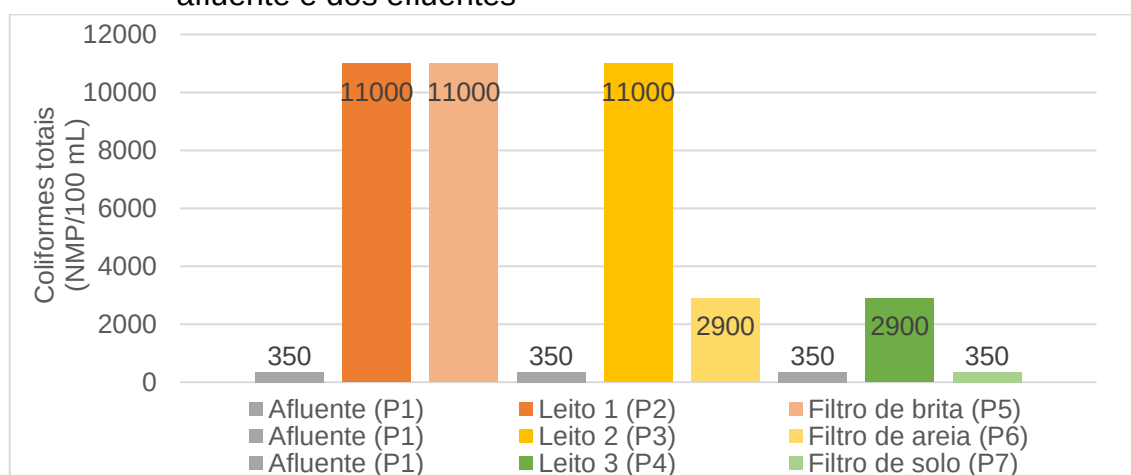
Fonte: Própria, 2018.

Figura 68 Variações dos resultados de coliformes totais na segunda análise do afluente e dos efluentes



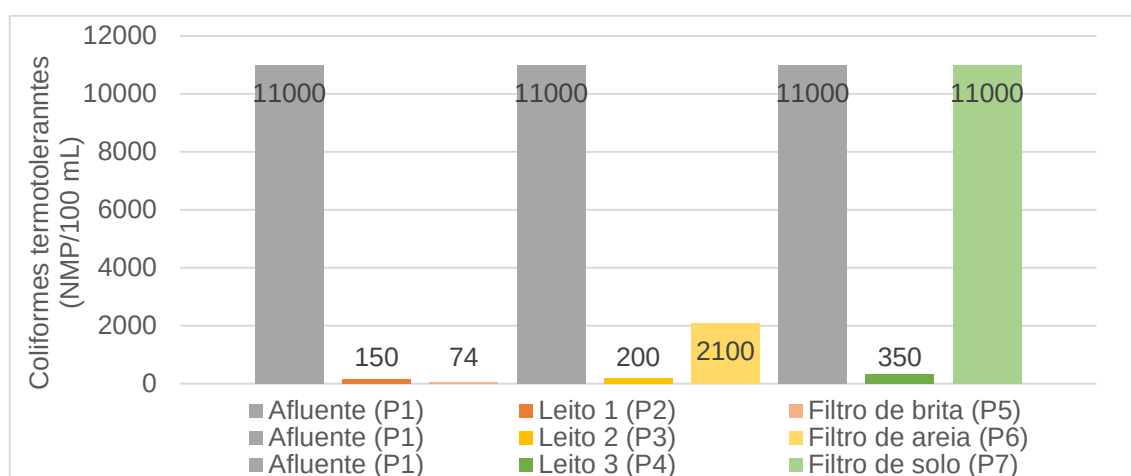
Fonte: Própria, 2018.

Figura 69 Variações dos resultados de coliformes totais na terceira análise do afluente e dos efluentes



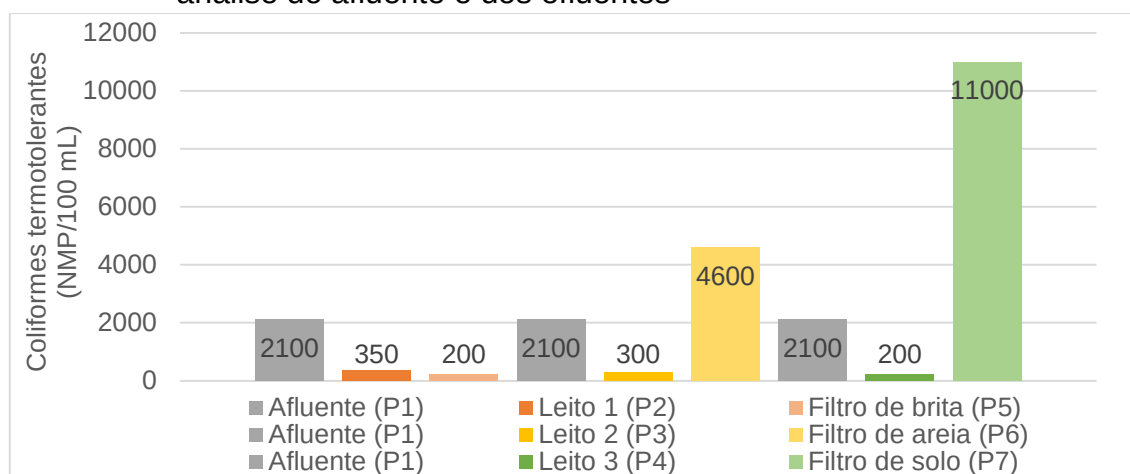
Fonte: Própria, 2018.

Figura 70 Variações dos resultados de coliformes termotolerantes na primeira análise do afluente e dos efluentes



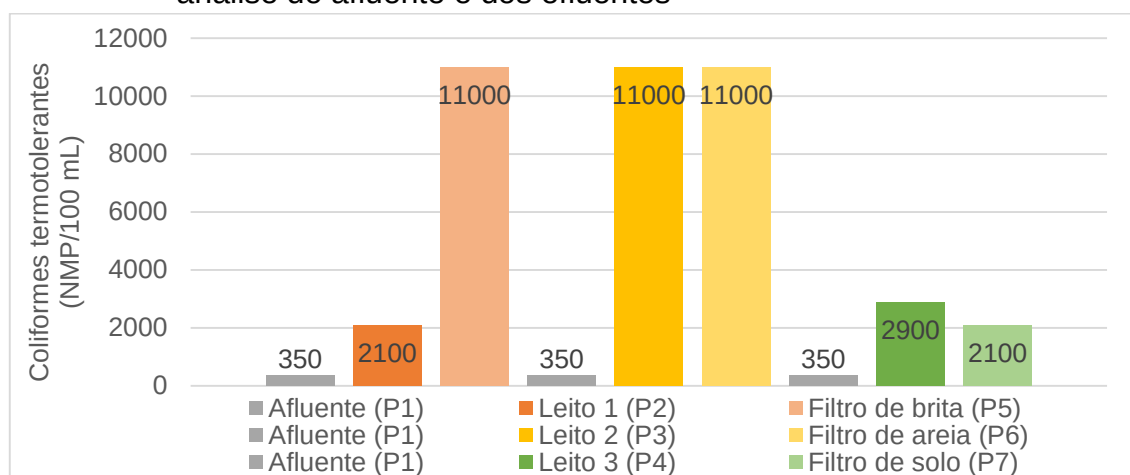
Fonte: Própria, 2018.

Figura 71 Variações dos resultados de coliformes termotolerantes na segunda análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Figura 72 Variações dos resultados de coliformes termotolerantes na terceira análise do afluente e dos efluentes



Fonte: Própria, 2018.

Presume-se que essas variações podem ser decorrentes dos materiais utilizados para o preenchimento dos leitos com plantas e dos meios filtrantes. Tendo em vista, que os substratos não passaram por processos de desinfecção para utilização na pesquisa. Para tanto, é necessário proceder outras análises para verificação de novos resultados.

4.5 Análise do potencial de reuso do efluente tratado

Para análise do potencial de reuso foram adotados os resultados obtidos nas amostras de efluentes finais dos filtros da última análise, comparando-os com as

normas e resoluções vigentes. Devido aos problemas ocorridos nas demais análises, juntamente com a grande variação dos resultados e a instabilidade do sistema, estas foram desconsideradas. Cabe ressaltar que, diversos parâmetros não foram avaliados pela ausência de equipamentos e reagentes envolvidos nestas análises.

Os limites estabelecidos de remoção da matéria orgânica pela ANA (2005) são baseados na demanda bioquímica de oxigênio. O Manual de Saneamento (BRASIL, 2015) afirma que a relação DQO/DBO varia de 1,7 a 2,4, usualmente utiliza-se o valor de 2,0 para esgoto doméstico bruto. As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados avaliados dos parâmetros para águas de reuso da terceira análise realizada no dia 28/11/2018.

Tabela 13 Resultados dos parâmetros avaliados para águas de reuso

Ponto de coleta	Descrição	Parâmetro físico		Parâmetro biológico	
		Cor aparente (uH)	Turbidez (uT)	Coliformes totais (NMP/100 mL)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)
P5	Efluente do filtro de brita	570	33	> 11000	11000
P6	Efluente do filtro de areia	512	32	2900	> 11000
P7	Efluente do filtro de solo	430	22	350	2100

Fonte: Própria, 2018.

Tabela 14 Resultados dos parâmetros avaliados para águas de reuso

Ponto de coleta	Parâmetro químico								
	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	OD (mg/L)	pH	Dureza (mg/L)	Alcalinidade e (mg/L)	Cloreto (mg/L)
P5	60,0	792,1	49,5	24,8	8,1	7,7	122,0	539,0	72,5
P6	52,0	737,7	43,6	21,8	8,2	7,8	120,0	481,0	63,0
P7	51,0	720,0	50,5	25,3	8,4	7,5	174,0	431,0	57,0

Fonte: Própria, 2018.

A ANA (2005) estabelece as concentrações de 0 a 30 uH para cor aparente e 0 a 10 uT para turbidez. Em relação a turbidez, a Norma NBR 13969 (ABNT, 1997) exige o limite de 0 a 5 uT, diferente da ANA (2005) que afere uma faixa de 0 a 10 uT. Entretanto, as amostras não estão em conformidade com ambas normativas, tanto para cor quanto para turbidez (Tabela 13), relacionadas ao reuso de águas.

Somente, a classe 4 da ANA (2005) exige um limite de 2,2 NMP/100 mL para coliformes totais. De qualquer maneira, o tratamento dos efluentes não atingiu o limite estabelecido.

Os limites de coliformes termotolerantes, das classes de reuso da Norma NBR 13969 (ABNT,1997), variam da faixa de 0 a 500 NMP/100 mL. Portanto, o efluente não está adequado a reutilização. Enquanto, para as classes de reuso da ANA (2005), esses valores variam de 0 a 10000 NMP/100 mL. Conforme a Tabela 13, apenas o efluente do filtro de solo está dentro dos limites estabelecidos para a Classe 2 de reuso.

Conforme a Tabela 14, os limites de sólidos suspensos totais estão compreendidos entre 0 a 5000 mg/L para ANA (2005). Assim, os efluentes provenientes dos filtros de brita, areia e solo atendem as concentrações exigidas para água de reuso Classe 4. Já, as concentrações de sólidos dissolvidos totais são limitadas de 0 a 200 mg/L (ABNT, 1997) e 0 a 1000 mg/L (ANA, 2005). Deste modo, os efluentes destes filtros estão adequados a água de reuso de Classe 4, sem recirculação, da Resolução ANA.

Os limites de DBO estão estabelecidos de 0 a 30 mg/L (ANA, 2005), os efluentes dos filtros atendem as águas de reuso Classe 2. Para DQO, as concentrações variam de 0 a 75 mg/L, estes efluentes estão adequados as águas de reuso Classe 4. Esta classe exige a presença de oxigênio para águas sem recirculação, o que foi atendida conforme as concentrações de oxigênio dissolvido nos efluentes.

Em relação ao pH, os limites variam de 6,0 a 8,0 (ABNT, 1997) e 5,0 a 9,0 (ANA, 2005). Portanto, os efluentes dos filtros estão dentro das concentrações da Classe 1 da Norma NBR 13969 e das Classes 1, 2, 3 e 4 da Resolução ANA.

Os parâmetros de dureza e alcalinidade são exigidos para a água de reuso Classe 4 (ANA, 2004), variando de 0 a 500 mg/L e de 0 a 850 mg/L, respectivamente. Os efluentes dos três filtros estão adequados aos limites de dureza e somente, os filtros de areia e solo atenderam ao limite de alcalinidade. Para os cloretos, a ANA (2005) estabelece as concentrações 0 a 600 mg/L, assim os limites estão dentro das exigências determinadas para as águas de reuso Classes 3 e 4.

Diante disso, constata-se que os efluentes tratados provenientes dos filtros do sistema *wetland* construído, nas condições atuais supracitadas, não estão atendendo aos parâmetros de águas de reuso. De modo geral, quando a concentração de um parâmetro atende ao limite estabelecido, outro parâmetro ultrapassa sua respectiva exigência. Presume-se que, quando o sistema *wetland* construído se estabilizar, este poderá atender as normativas de águas de reuso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da realização deste trabalho, pode-se concluir os efluentes finais do sistema *wetland* construído, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás, nas condições atuais supracitadas, não estão em conformidade com os limites estabelecidos pelas normativas de águas de reuso, devido ao processo de tratamento estar na fase de estabilização.

Com base na Norma NBR 13969 (ABNT, 1997), os efluentes finais dos filtros de brita, areia e solo areno-argiloso mostraram-se aptos a faixa de pH estabelecida para águas de reuso Classe 1. Conforme a Agência Nacional de Águas, especificamente no manual sobre “Conservação e reuso de água em edificações”, os efluentes finais dos filtros de brita, areia e solo areno-argiloso atenderam as exigências para os seguintes parâmetros:

- Águas de reuso Classe 1: pH;
- Águas de reuso Classe 2: Demanda bioquímica de oxigênio;
- Águas de reuso Classe 3: Cloretos;
- Águas de reuso Classe 4: Demanda química de oxigênio, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais, dureza, cloretos.

Excepcionalmente, apenas o efluente do filtro de solo areno-argiloso era adequado ao limite de coliformes termotolerantes das águas de reuso Classe 2. Enquanto os filtros de brita e areia apresentaram-se aptos a faixa de alcalinidade para águas de reuso Classe 4.

Avaliando-se somente os leitos com plantas, verifica-se que o leito 1 (P2) foi mais eficiente na remoção média de cor aparente (61,5%), turbidez (75,3%), sólidos dissolvidos totais (16,9%) e demanda bioquímica de oxigênio (7,6%). Em seguida, o leito 2 (P3) apresentou melhor desempenho na redução média de sólidos suspensos (87,2%) e alcalinidade (17,7%). Por fim, o leito 3 (P4) mostrou-se eficiente na remoção média de cloretos (28,1%).

Em relação a eficiência média de remoção nos filtros, o filtro de brita obteve melhor desempenho na redução complementar do parâmetro de dureza (9,5%), do efluente

oriundo do leito 1. Enquanto o filtro de areia contribuiu na eficiência de remoção dos parâmetros de sólidos dissolvidos totais (19,2%), condutividade elétrica (21,3%), demanda química de oxigênio (29,9%), alcalinidade (28,8%) e cloretos (23,7%), do efluente proveniente do leito 2. Por fim, o filtro de solo foi eficaz na redução dos atributos cor aparente (4,6%), turbidez (10,0%) e sólidos suspensos totais (31,5%), do efluente advindo do leito 3. Nos parâmetros de coliformes totais e termotolerantes, os filtros não tiveram desempenho satisfatório, o qual pode estar associado a contaminação dos materiais.

Em suma, observa-se que os meios filtrantes resultaram em baixa remoção de carga poluidora de certos parâmetros, ou ainda interferiram na redução dessas concentrações, possivelmente devido as dimensões reduzidas dessas unidades em relação à proporção das vazões provenientes dos leitos com plantas.

Cabe ressaltar que o sistema encontra-se em operação e os leitos com plantas estão se consolidando, devido à fase de crescimento das taboas. Quando o sistema *wetland* construído se estabilizar, presume-se que os efluentes finais provenientes dos filtros podem atender as exigências mínimas das águas de reuso, para fins não potáveis.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. de A.; OLIVEIRA, L. F. C. de.; KLIEMANN, H. J. Eficiência de espécies vegetais na purificação de esgoto sanitário. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37 (1), p. 1-9, mar. 2007;

ALMEIDA, R. de A.; UCKER, F. E. Considerando a evapotranspiração no cálculo de eficiência de estações de tratamento de esgoto com plantas. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 8, n. 4, p. 039 -045, out./dez. 2011;

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conservação e reuso da água em edificações**. São Paulo: 2005;

_____. **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017;

APHA; AWWA; WPCF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23ª edição, Washington D. C./USA, American Public Health Association, 2017;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016;

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 1986;

_____. **NBR 9689**: Estudo de concepção do sistema de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986;

_____. **NBR 13969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997;

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003;

BRASIL. Lei nº 11.445, de 28 de novembro de 2005. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico, altera a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, a Lei nº 8.036, de 11 de maio de 1990, a Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, e a Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Brasília: **Diário Oficial da União**, 2007;

_____. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 4. ed. Brasília: Funasa, 2015;

BRIX, H. Wastewater treatment in constructed wetlands: System design, removal processes, and treatment performance. In: MOSHIRI, G. A. (Org.). **Constructed wetlands for water quality improvement**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p. 9-22;

CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p. Projeto PROSAB;

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 16, p.40-55, jan./mar., 2014;

CARVALHO, E. H.; ANDREOLI, C. V. **Lodos de fossa e tanque séptico**: Orientações para definição de alternativas de gestão e destinação. Curitiba: ABES, 2015;

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Brasília: **Diário Oficial da União**, 2006;

COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M. Saneamento rural no Brasil: impacto da fossa séptica biodigestor. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Edição Especial, p. 51-60, 2014;

COSTA, J. F.; PAOLI, A. O.; SPERLING, M. V.; SEIDI, M. Avaliação do desempenho de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial tratando efluente de reator UASB, com base em quatro anos de monitoramento. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, jan/fev. 2018, 191-200;

COSTA, S. M. S. P. da. **Avaliação do potencial de plantas nativas do Brasil no tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais em “wetlands” construídos**. Campinas, SP, 2004. Originalmente apresentada tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2004;

FIA, F. R. L.; MATOS, A. T.; FIA, R.; BORGES, A. C.; CECOM, P. R. Efeito da vegetação em sistemas alagados construídos para tratar águas residuárias da suinocultura. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, n.2, p. 303-311, mar./abr. 2017;

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE - FUNASA. **Panorama do Saneamento Rural no Brasil**. 2017. Disponível em:< <http://www.funasa.gov.br/panorama-do-saneamento-rural-no-brasil>>. Acesso em: 26/03/18;

GRACE, J.; HARRISON, J. S. The biology of Canadian weeds. 73. *Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. and *Typha xglauca* Godr. Can. J. Plant Sci. **66**: 361-379;

GONÇALVES, R. F. (Coord.). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 2009;

GOOGLE MAPS. **Escola de Engenharia Civil e Ambiental**. 2018. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/place/Escola+de+Engenharia+Civil+e+Ambiental+-+EECA+UFG/@-16.6771317,->

[49.2425389,18z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x935ef182071891f5:0x3c1d5be8f2de76f7!8m2!3d-16.6771343!4d-49.2414446](https://doi.org/10.24253/91.18z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x935ef182071891f5:0x3c1d5be8f2de76f7!8m2!3d-16.6771343!4d-49.2414446)>. Acesso em: 29/05/18;

HESPANHOL, I. Reuso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 79-94, jul./ago./set., 2015;

IMHOFF, K. K. R. **Manual de tratamento de águas residuárias**. 3ª reimpressão. São Paulo: Edgard Blucher, 2002;

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Estações Automáticas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em 20/09/18;

KADLEC, R. H; WALLACE, S. **Treatment wetlands**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008;

MANCUSO, P. C. S. SANTOS, H. F. (Ed.). **Reuso de água**. Barueri: Manole, 2003;

MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; LO MONACO, P. A. Eficiência de sistemas alagados construídos na remoção de poluentes de águas residuárias de indústria de laticínios. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.6, p.1144-1155, nov./dez. 2012;

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016;

MENDONÇA, H. V. de.; RIBEIRO, C. B. de. M.; BORGES, A. C.; BASTOS, R. R. Sistemas alagados construídos em batelada: remoção de demanda bioquímica de oxigênio e regulação de pH no tratamento de efluentes de laticínios. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 10, n. 2, abr./jun. 2015;

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário**: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. 2. ed. ver. atualizada e ampl. São Paulo: Blucher, 2011;

OLIVEIRA, I. **MACO I**: Apostila de Materiais de Construção I. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2014;

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA - UNESCO. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2017 - Resumo Executivo: **Águas residuais - O recurso inexplorado**, 2017;

PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M.; RIBEIRO, T. A. P.; BARBOSA, M. Pré-filtração em pedregulho e filtração lenta com areia, manta não tecida e carvão ativado para polimento de efluentes domésticos tratados em leitos cultivados. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.4, p.803-812, jul./ago. 2011;

PITALUGA, D. P. da. S.; ALMEIDA, R. A.; REIS, R. P. A. **Wetland construído no tratamento de esgotos sanitários**: Substratos. Goiânia: Novas Edições Acadêmicas, 2015;

POÇAS, C. D. **Utilização da tecnologia de wetlands para tratamento terciário: controle de nutrientes**. São Paulo, SP, 2015. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, 2015;

POMPÊO, M. **Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas em reservatórios tropicais brasileiros**. São Paulo: Instituto de Bio-ciências da USP, 2017. 138 p.

QUELUZ, J. G. T. **Eficiência de alagados construídos para o tratamento de águas residuárias com baixas cargas orgânicas**. Botucatu, SP, 2016. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2016;

SALATI, E. **Controle de qualidade de água através de sistemas de wetland construídos**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2006;

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. Florianópolis, SC, 2006. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2006;

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECEZARO, S. T.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. Experiências brasileiras com wetland construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: Parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, p. 151-158, jan./mar. 2015;

SILVA, S. C. **“Wetland construídos” de fluxo vertical com meio suporte de solo areno-argiloso modificado no tratamento de esgotos domésticos**. Brasília, DF, 2007. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade de Brasília – UnB, 2007;

SILVA, S. C.; BERNARDES, R. S.; RAMOS, M. L. G. Remoção da matéria orgânica do esgoto em solo de wetland construído. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.20, n.4, p. 533-542, out./dez. 2015;

SMITH, K.; LIU, S.; HU, H-Y.; DONG, X.; WEN, X. Water and energy recovery: The future of wastewater in China. **Science of the Total Environment**, p. 1466–1470, 2018;

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica Sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em APG II**. Nova Dessa, SP: Instituto Plantarum, 2005;

SPERLING, M. V. **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;

TELLES, D. D. A.; COSTA, R. H. P. G. **Reuso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010;

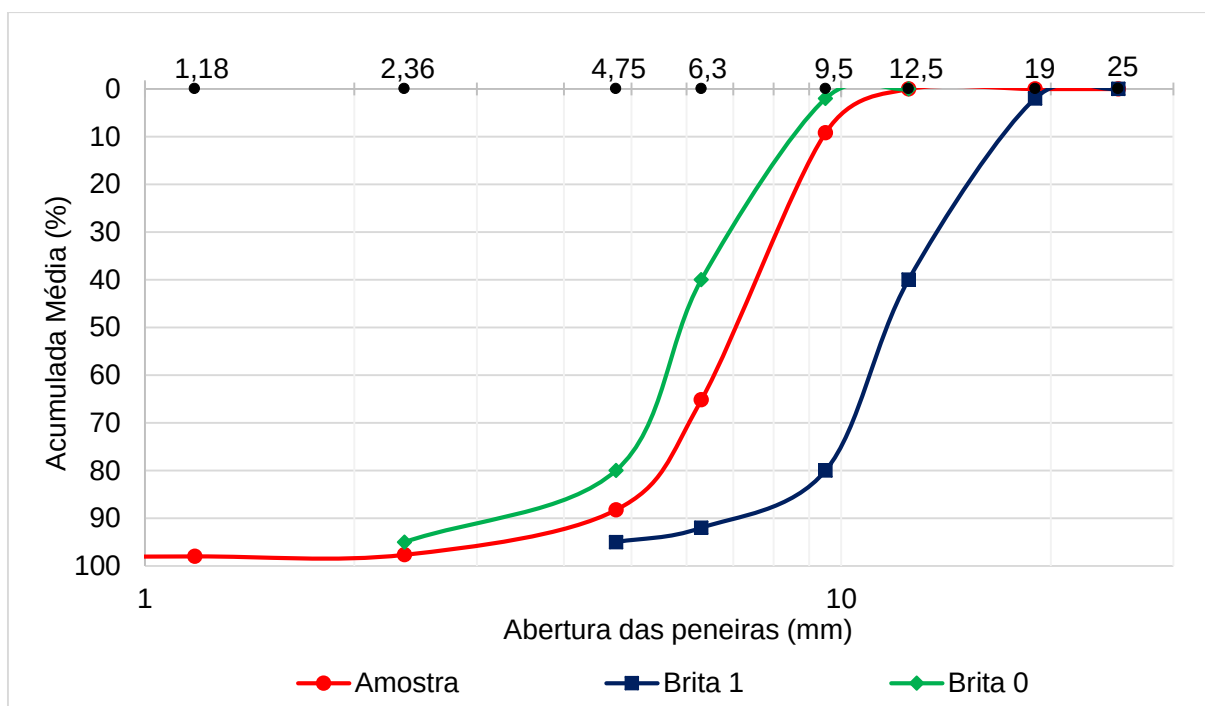
UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME - UN-HABITAT. **Constructed Wetlands Manual**. UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme Nepal, Kathmandu, 2008;

VALENTIM, M. A. A. **Uso de leitos cultivados no tratamento de tanque séptico modificado**. Campinas, SP, 1999. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2003;

WETZEL, R. Constructed wetlands: Scientific foundations and critical. In: MOSHIRI, G. A. (Org.). **Constructed wetlands for water quality improvement**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p. 1-8.

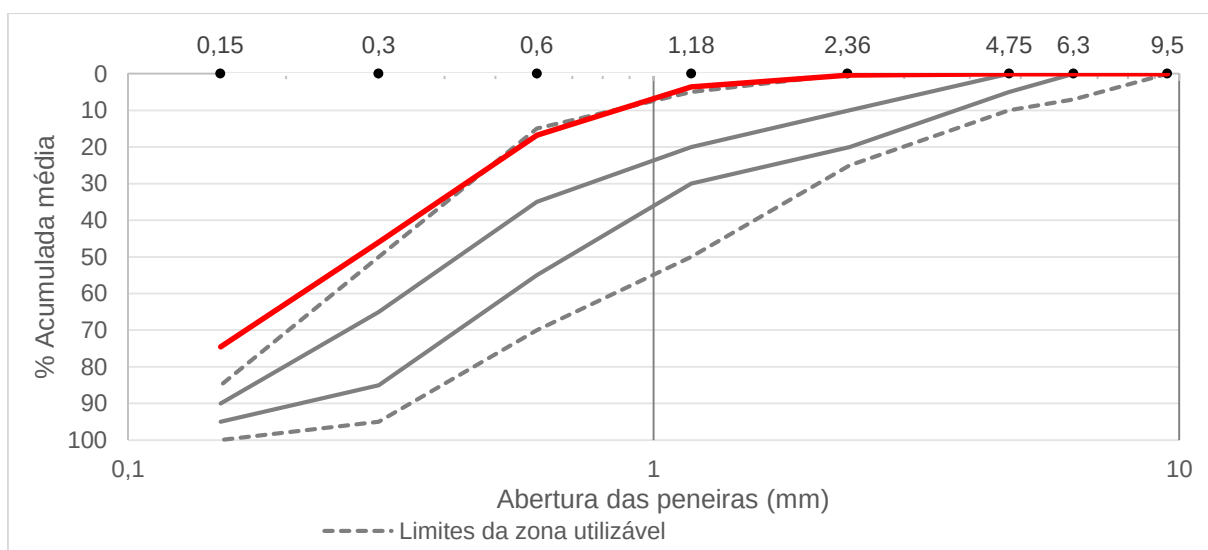
**APÊNDICE A – Caracterização da amostra de brita por peneiramento
(NBR NM 248:2003)**

Peneiras (mm)	1º Determinação			2º Determinação			% Acumulada Média
	Massa inicial (g)		1002,35	Massa inicial (g)		1235,60	
	Massa (g)	%Retida	%Acum.	Massa (g)	%Retida	%Acum.	
25	0,00	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0
19	0,00	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0
12,5	0,00	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0
9,5	98,75	9,88	9,9	104,64	8,5	8,5	9,2
6,3	540,83	54,14	64,0	714,79	57,8	66,3	65,2
4,75	233,98	23,42	87,4	281,09	22,7	89,1	88,3
2,36	99,85	9,99	97,4	109,16	8,8	97,9	97,7
1,18	3,94	0,39	97,8	3,34	0,3	98,2	98,0
0,6	1,20	0,12	98,0	1,01	0,1	98,3	98,1
0,3	1,30	0,13	98,1	1,28	0,1	98,4	98,2
0,15	2,85	0,29	98,4	3,00	0,2	98,6	98,5
Fundo	16,30	1,63	100,0	17,29	1,4	100,0	100,0
Total	999,00	100,00		1235,60	100,0		
Mód. Finura	5,87			5,89			
Módulo de Finura Médio (MF)			<u>5,88</u>	Dimensão Máxima Característica (DMC)			<u>12,50</u>
Diferença de peneiras entre duas deter. <4%		OK	Diferença das massas inicial e final <0,3%		OK	Aprovação do ensaio	
						APROVADO	



**APÊNDICE B – Caracterização da amostra de areia por peneiramento
(NBR NM 248:2003)**

Determinação do Teor de Material Pulverulento							
Nº de determinação		1º Determinação		2º Determinação		Média	
Massa Inicial (g)		300,00		300,00		300,00	
Massa Final (g)		299,45		299,44		299,45	
m = [(mi - mf)/mi] x 100		0,18		0,19		0,19	
Granulometria							
Peneiras (mm)	1º Determinação			2º Determinação			Porc. Retida Acumulada Média (%)
	Massa inicial (g)	300,00		Massa inicial (g)	300,00		
	Massa retida (g)	Porcentagem Retida (%)		Massa retida (g)	Porcentagem Retida (%)		
		Indiv.	Acum.		Indiv.	Acum.	
9,5	0,00	0,0%	0,0%	0,00	0,0%	0,0%	0,0%
6,3	0,00	0,0%	0,0%	0,00	0,0%	0,0%	0,0%
4,75	0,00	0,0%	0,0%	0,00	0,0%	0,0%	0,0%
2,36	1,40	0,5%	0,5%	1,08	0,4%	0,4%	0,4%
1,18	9,56	3,2%	3,7%	9,40	3,1%	3,5%	3,6%
0,6	40,86	13,6%	17,3%	38,55	12,9%	16,3%	16,8%
0,3	91,01	30,3%	47,6%	93,91	31,3%	47,6%	47,6%
0,15	85,02	28,3%	76,0%	86,60	28,9%	76,5%	76,2%
Fundo (0,075)	71,60	23,9%	99,8%	69,90	23,3%	99,8%	99,8%
Mat. Pulv.	0,55	0,2%	100,0%	0,56	0,2%	100,0%	100,0%
Total	300	100%		300	100%		
Mod.Finura	1,45			1,44			
Módulo de Finura Médio (MF)			<u>1,45</u>	Dimensão Máxima Característica (DMC)			<u>1,18</u>
Diferença de peneiras entre duas determ. < 4%		OK	Diferença das massas inicial e final < 0,3%		OK	ENSAIO APROVADO	



APÊNDICE C – Caracterização da amostra de solo por peneiramento e sedimentação (NBR 7181:2016)

Peneiramento Fração Grossa (Entre 60,00 e 2,00 mm)						
Peneira (Série ABNT)	Abertura mm	Material Retido			Material que Passa (g)	% Passa Amostra Total ⑧
		Massa (g)	% do total ⑦	% Acumulado		
3"	76	0	0,00	0,00	876,97	100,00
2"	50	0	0,00	0,00	876,97	100,00
1.1/2"	38	0	0,00	0,00	876,97	100,00
1"	25	0	0,00	0,00	876,97	100,00
3/4"	19	0	0,00	0,00	876,97	100,00
3/8"	9,5	0	0,00	0,00	876,97	100,00
Nº 4	4,8	0	0,00	0,00	876,97	100,00
Nº 10	2,0	0,8	0,09	0,09	876,17	99,91

Peneiramento Fração Fina (Entre 2,00 e 0,075 mm)							
Amostra Parcial Úmida (g):		70		Amostra Parcial Seca (g):		61,38	9 K= 14,27428571
Peneira (Série ABNT)	Abertura mm	Material Retido				Material que Passa (g)	% Passa Amostra Total
		Massa (g) (A. Parcial)	10 Massa (g) (A. Total)	% Total	% Acumulado		
16	1,2	0,94	13,42	1,53	1,62	862,75	98,38
30	0,6	2,44	34,83	3,97	5,59	827,92	94,41
40	0,42	1,51	21,55	2,46	8,05	806,37	91,95
60	0,25	9,28	132,47	15,10	23,16	673,91	76,84
100	0,15	6,67	95,21	10,86	34,01	578,70	65,99
200	0,075	5,51	78,65	8,97	42,98	500,04	57,02

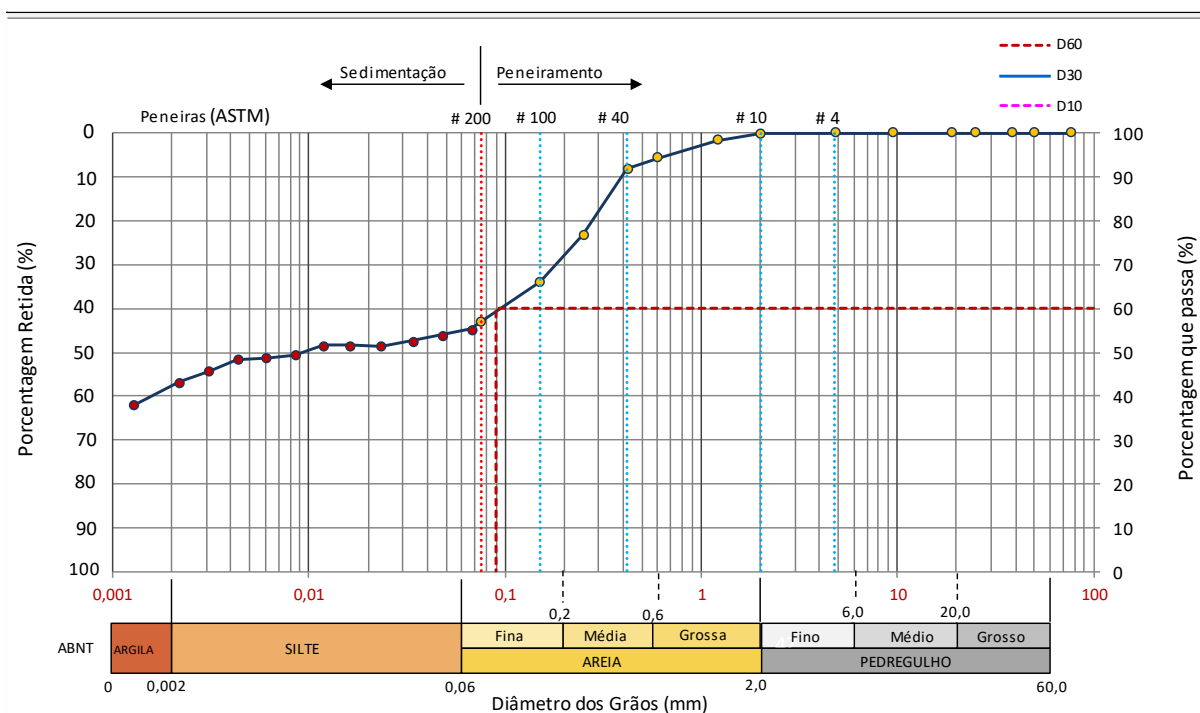
Dados da Amostra				Granulometria por Sedimentação			
Massa Total (M)	g	70		$K = N \times \frac{\delta}{\delta - 1} \times \frac{\rho w}{M_s} \quad Q = k \times LC \quad LC = L - L_d \quad d = \sqrt{\frac{1800 \times \eta \times a}{\delta - 1} \times \frac{1}{t}}$			
Massa Seca (Ms)	g	61,38					
Massa Esp. Real (ρs)	g/cm³	2,650					
Tipo de Defloculante	-----						
Quant. Defloculante	ml						
Solo Passado Nº 10 (N)	%	99,91					
Densímetro	Nº						
Proveta	Nº						

Selecione a incógnita	N	Porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm,
-----------------------	---	---

Dados Para Cálculo de Granulometria por Sedimentação			
N	99,91%	Fator Q/Lc para simplificar o cálculo de Q %: FQ	26,1415 N d/Ms (d-1)
Correção devido ao Menisco: adotado 0,0012 que aparece no cálculo de Lc como a terceira parcela da coluna.			

Sedimentação COM Defloculante								
Tempo Decorrido	Leitura (L) Densímetro	Temperatura (°C)	Viscosidade (g.s/cm2)	Ld	LC	a (cm)	Q (% Passa)	d (mm)
0,5 min.	1,0215	27,5	8,6219E-06	1,00153	0,02117	14,30	55,33	0,067
1 min.	1,0210	27,5	8,6219E-06	1,00153	0,02067	14,41	54,02	0,048
2 min.	1,0205	27,5	8,6219E-06	1,00153	0,02017	14,51	52,71	0,034
4 min.	1,0200	27,5	8,6219E-06	1,00153	0,01967	13,86	51,41	0,023
8 min.	1,0195	29,5	8,2490E-06	1,00096	0,01974	13,96	51,60	0,016
15 min.	1,0195	29,5	8,2490E-06	1,00096	0,01974	13,96	51,60	0,012
30 min.	1,0190	28,5	8,4320E-06	1,00126	0,01894	14,06	49,51	0,008
1:00 h	1,0190	27,5	8,6219E-06	1,00153	0,01867	14,06	48,79	0,006
2:00 h	1,0190	27	8,7194E-06	1,00166	0,01854	14,06	48,46	0,004
4:00 h	1,0180	27	8,7194E-06	1,00166	0,01754	14,27	45,84	0,003
8:00 h	1,0170	27	8,7194E-06	1,00166	0,01654	14,47	43,23	0,002
24:00 h	1,0150	27	8,7194E-06	1,00166	0,01454	14,88	38,00	0,001

APÊNDICE D – Caracterização da amostra de solo por peneiramento e sedimentação (NBR 7181:2016)



Classificação do Solo								
% Argila	43,23%	% Silte	11,62%	% Total de Areia	45,06%	% Total de Pedregulho	0,09%	% Total de Pedra-de-mão
				% Areia Grossa	5,50%	% Pedregulho Grosso	0,00%	
				% Areia Média	22,99%	% Pedregulho Médio	0,00%	
				% Areia Fina	16,57%	% Pedregulho Fino	0,09%	

