



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

Arielle da Rosa Sousa

**Potencialidade de reuso do esgoto tratado em sistemas wetlands construídos no contexto brasileiro**

Florianópolis  
2023

Arielle da Rosa Sousa

**Potencialidade de reuso do esgoto tratado em sistemas wetlands construídos no contexto brasileiro**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Heleno Sezerino

Florianópolis

2023

Sousa, Arielle da Rosa

Potencialidade de reuso do esgoto tratado em sistemas wetlands construídos no contexto brasileiro. / Arielle da Rosa Sousa ; orientador, Pablo Heleno Sezerino, 2023.

147 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Wetlands construídos. 3. Águas residuárias. 4. Reuso. I. Sezerino, Pablo Heleno. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Arielle da Rosa Sousa

**Potencialidade de reuso do esgoto tratado em sistemas wetlands construídos no contexto brasileiro**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Tamara van Kaick  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Elisa Magri  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental pelo PPGEA.

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Alexandra Rodrigues Finotti  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

---

Prof. Dr. Pablo Heleno Sezerino  
Orientador.

Florianópolis, 2023

## AGRADECIMENTOS

Não há como iniciar qualquer tipo de agradecimento sem começar pela minha família, minha mãe Ieda e meu pai Herculano que estiveram comigo durante todas as etapas da minha formação acadêmica e da minha vida, sempre sendo meus maiores incentivadores e minha base. Sem o seu apoio incondicional e constante nada disso seria possível.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento, permitindo através da concessão de bolsa de mestrado minha dedicação à pesquisa científica durante esses dois anos de estudo. Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental por me proporcionarem um ensino de qualidade, efetivando com excelência meu objetivo inicial ao entrar no PPG de agregar o máximo de conhecimento durante esse período, aportando grande valia ao meu crescimento profissional.

Agradeço ao Prof. Pablo Sezerino, pelo acolhimento no Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), pela orientação, troca de experiências e por toda compreensão e confiança depositada em mim.

Agradeço a todos que contribuíram com o desenvolvimento dessa pesquisa, principalmente aos que compartilharam suas experiências com wetlands construídos em território nacional e me receberam para visita de sistemas aplicados, principalmente Profa. Dra. Tamara Van Kaick da Universidade Tecnológica do Paraná, Eng. João Victor Gallo do Escritório Petinelli, equipe técnica do SAMAE de Meleiro/SC e dona Marizete, por me receber em sua casa em Colombo/PR. Agradeço a todos por toda receptividade e atenção durante as visitas realizadas.

Foram dois anos de muita dedicação, escolhas e adversidades. Sou muito grata por todos que estiveram comigo durante essa trajetória e por todos os caminhos traçados até aqui, que me fazem a profissional e pessoa que sou hoje.

Dedico essa dissertação especialmente aos meus avós, vó Maria e vô Herculano. Sinto muita saudade, mas carrego a serenidade em saber que estão me acompanhando até aqui.

## RESUMO

A adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SBN) como ferramenta de circularidade de recursos em diversos domínios tem se mostrado uma intervenção explorada amplamente em cenário mundial. Dentre as SBN, os wetlands construídos (WC) destacam-se na temática do tratamento descentralizado de águas residuárias. Neste contexto, este trabalho avaliou a potencialidade de reuso da água residuária tratada em wetlands construídos de escoamento subsuperficial (WC-FSS), observando as principais práticas empregadas mundialmente. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica em duas etapas: (i) estudos aplicando WC em sistemas que objetivaram o reuso do esgoto tratado, avaliando arranjos tecnológicos empregados e tipos de reuso; (ii) estudos abordando a aplicabilidade de WC-FSS em cenário nacional, avaliando tecnologias empregadas e performances atingidas, categorizando-os em diferentes contextos nos quais o tratamento descentralizado de esgoto e posterior recuperação de recursos se mostravam viáveis. Na primeira etapa, 72 sistemas distribuídos entre 26 países foram inventariados, com 75% destes inseridos em cenário rural destacando-se que 38% tratavam esgoto bruto. Em cenário urbano, 09 entre 18 sistemas optaram pelo tratamento de águas cinzas. Tanto em cenário urbano quanto rural, houve uma predominância do emprego de WC de escoamento subsuperficial horizontal (WCH) em nível secundário de tratamento, pós tanques sépticos (TS). Destaca-se que a associação de WCH com tanques de sedimentação a montante, apresentou remoção média acima de 97% para parâmetros de SST, DBO e  $\text{NH}_4^+$ . Os tipos de reuso mais empregados foram irrigação de áreas verdes e irrigação subsuperficial de culturas agrícolas. Em relação a segunda etapa, 65 sistemas foram inventariados, sendo 60% em cenário rural, 32% em cenário urbano e 8% em cenário periurbano. Nacionalmente, há uma predominância da associação de WCH com TS. Na ordem de 93% dos sistemas atingiram valores de DBO exigidos pelas legislações nacionais para destinação ambientalmente adequada do esgoto tratado. A partir do inventário realizado, 28 sistemas enquadraram-se em algum tipo de classificação para reuso do tipo urbano, enquanto que 26 sistemas atenderam aos padrões para reuso agrícola. Por fim, foi elaborado uma matriz tecnológica inferindo sobre diferentes arranjos para diferentes contextos, de modo a se atender aos padrões de qualidade exigidos por diferentes legislações nacionais de referência, promovendo o reuso seguro da água recuperada para irrigação de áreas verdes, descargas sanitárias e lavagens de áreas externas, bem como, para fertirrigação de culturas agrícolas. Empregado majoritariamente em nível secundário, a ecotecnologia dos WC-FSS tem apresentado robustez na sua performance e atendimento da maioria dos padrões exigidos pelas legislações para destinação ambientalmente adequada dos esgotos tratados. Cabe inferir, por fim, que para a promoção do reuso de esgoto tratado em sistemas tipo wetlands, há que se conduzir estudos de análise de risco microbiológico e ambiental relacionados aos fins específicos, bem como identificar modelos de negócios que legitimem a prática da economia circular no território brasileiro.

**Palavras-chave:** Tratamento de esgoto. Wetlands construídos. Água de reuso. Economia circular.

## ABSTRACT

The adoption of Nature-Based Solutions (NBS) as a circularity tool in various domains has been shown to be a widely explored intervention worldwide. Among the NBS, constructed wetlands (CW) stands out in terms of wastewater treatment. In this context, this work evaluated the reuse potential of treated wastewater in subsurface flow constructed wetlands (SF-CW), observing the main practices used worldwide. Bibliographical research was carried out in two stages: (i) studies applying SF-CW in systems that aim the reuse of treated wastewater, evaluating technological arrangements and types of reuse; (ii) studies addressing the applicability of SF-CW in the national scenario, evaluating technologies employed and performances achieved, categorizing them in different contexts in which the decentralized treatment of wastewater and subsequent resource recovery proved to be viable. In the first stage, 72 systems distributed among 26 countries were inventoried, with 75% of these inserted in a rural setting, highlighting that 38% treated raw sewage. In an urban setting, 09 out of 18 systems opted for gray water treatment. Both in urban and rural settings, there was a predominance of the use of horizontal subsurface runoff (HCW) CW at secondary level of treatment, after septic tanks (ST). It is noteworthy that the association of HCW with sedimentation tanks, presented an average removal above 97% for TSS, BOD and  $\text{NH}_4^+$  parameters. The most used types of reuse were irrigation of green areas and subsurface irrigation of agricultural crops. Regarding the second stage, 65 systems were inventoried, in which 60% are located in a rural setting, 32% in an urban setting and 8% in a peri-urban setting. Nationally, there is a predominance of the association of HCW with ST. Around 93% of the systems achieved the BOD values required by national legislation for environmentally appropriate disposal of treated wastewater. 28 systems from the inventory fit into some type of classification for urban reuse, while 26 systems met the standards for agricultural reuse. Finally, a technological matrix was elaborated inferring about different arrangements for multiple contexts, in order to meet the quality standards required by different national legislations of reference, promoting the safe reuse of recovered water for irrigation of green areas, sanitary discharges and washing external areas, as well as for fertigation of agricultural crops. Mostly used at secondary level, the ecotechnology of the WC-FSS has shown robustness in its performance and compliance with most of the standards required by legislation for the environmentally appropriate destination of treated sewage. Finally, it should be inferred that in order to promote the reuse of treated sewage in wetlands-type systems, it is necessary to conduct microbiological and environmental risk analysis studies related to specific purposes, as well as to identify business models that legitimize the circular economy practiced in the Brazilian territory.

**Keywords:** Wastewater treatment. Constructed wetlands. Water reuse. Circular economy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do sistema de tratamento de esgoto conforme o nível de descentralização ou centralização.....	38
Figura 2 - Fluxograma de opções de tecnologias para o tratamento de esgoto doméstico no lote. ....	39
Figura 3 - Representação esquemática do perfil de um WCH. ....	44
Figura 4 - Representação esquemática do perfil de um WCVD.....	45
Figura 5 - Representação esquemática do perfil de um WCV-FS.....	46
Figura 6 - Representação esquemática do perfil de um Sistema Híbrido da associação de um WCVD seguido de WCH. ....	46
Figura 7 - Mudança da gestão “fim de tubo” nos serviços de saneamento para uma abordagem circular com recuperação de recursos (a) e integração das SBN no cenário urbano (b). ....	48
Figura 8 - Quantidade de publicações por ano na plataforma Web of Science em busca inicial. ....	52
Figura 9 - Visão geral das etapas adotadas no processo de seleção dos artigos da revisão sistemática baseado no método PRISMA.....	54
Figura 10 - WCV-FS como tratamento secundário de esgoto doméstico gerado em loteamento multifamiliar localizado em Palhoça/SC. ....	63
Figura 11 - WCVD como tratamento secundário de esgoto sanitário gerado em prédio comercial localizado em Florianópolis/SC. ....	63
Figura 12 - WCV como tratamento secundário de esgoto sanitário de bacias de escoamento de duas zonas da cidade, ou “bairro-cidade”, localizado em Meleiro/SC.....	64
Figura 13 - WCH como tratamento secundário de esgoto sanitário gerado em pousada rural localizada em Tubarão/SC.....	64
Figura 14 - Visão geral da abordagem metodológica adaptada de Tranfield et al. (2003) adotada no processo de seleção dos artigos da revisão integrativa. ....	65
Figura 15 - Representação de afinidade sobre as potencialidades de reuso da água recuperada nos diferentes contextos.....	67
Figura 16 - Representação dos diferentes contextos no quais o tratamento de esgoto dá-se por meio de WCs e seus respectivos potenciais para reuso do efluente tratado. ....	68
Figura 17 - Relação de países e quantidade de publicações levantadas na Revisão Sistemática da Literatura (RSL).....	69
Figura 18 - Tipos de águas residuárias tratadas nos sistemas wetlands inventariados. ....	75



Figura 19 - WC-FSS empregados em diferentes níveis de tratamento.....	76
Figura 20 - Variação da composição de alguns elementos dos WC-FSS levantados pela RSL. .....	77
Figura 21 - Eficiência de remoção de poluentes físico-químicos em arranjos compostos por WCH em cenário rural.....	83
Figura 22 - Eficiência de remoção de poluentes físico-químicos em arranjos compostos por WCV em cenário rural.....	84
Figura 23 - Eficiência de remoção de parâmetros físico-químicos em arranjos compostos por SH em cenário rural.....	85
Figura 24 - Avaliação do reuso do efluente tratado nos sistemas avaliados, de acordo com (a) reuso potencial ou reuso aplicado, (b) aplicação agrícola e (c) aplicação urbana.....	86
Figura 25 - Distribuição geográfica de sistemas compostos por wetlands construídos em escala real para o tratamento de esgoto doméstico em cenário nacional.....	87
Figura 26 - Variação da composição de alguns elementos dos WC-FSS em cenário nacional. .....	89
Figura 27 - Residencial multifamiliar atendido pelo sistema descentralizado (WCV-FS) – Palhoça/SC.....	97
Figura 28 - Residências atendidas pelo sistema descentralizado (WCH) – Colombo/PR.....	98
Figura 29 - Wetlands Construídos plantados com Íris Amarelo (1), Papiro (2) e Formio (3) – Curitiba/PR.....	99
Figura 30 - Estrutura que permite a elevação da superfície dos Wetlands Construídos.....	100
Figura 31 - escoamento livre do esgoto abaixo da superfície do sistema.....	100
Figura 32 - Raízes da macrófita Formio.....	101
Figura 33 - Bairro-cidade atendido pelo sistema descentralizado (WCV) – Meleiro/SC.....	111
Figura 34 - Frequência de enquadramento na legislação nacional CONAMA nº 430/2011 e na normativa ABNT NBR 13969:1997 do efluente tratado nos WC-FSS aplicados em contexto nacional.....	112
Figura 35 - Frequência de enquadramento nas respectivas legislações estaduais do efluente tratado nos WC-FSS aplicados no contexto nacional.....	113
Figura 36 - Matriz tecnológica para orientar a inserção dos WC-FSS como tecnologia geradora de água de reuso no contexto brasileiro.....	121

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Classificações de recomendações de uso propostas pelos documentos reguladores para reuso da água recuperada. ....	26
Quadro 2 - String de busca para RSL de estudos sobre reuso de efluentes tratados em sistemas compostos por wetlands construídos. ....	52
Quadro 3 - String de busca utilizado nas bases de dados. ....	57
Quadro 4 - Quadro conceitual sobre os principais aspectos acerca o reuso do efluente tratado em sistemas com Wetlands Construídos. ....	86
Quadro 5 - Classificação de cores referentes ao atendimento dos parâmetros às legislações de referência quanto ao atendimento dos padrões exigidos para reuso da água residuária tratada. ....	113
Quadro 6 - Potencialidade de reuso urbano da água residuária recuperada em diferentes contextos, suas aplicações e legislações referentes. ....	116
Quadro 7 - Potencialidade de reuso agrícola da água residuária recuperada em diferentes contextos, suas aplicações e legislações referentes. ....	118
Quadro 8 - Publicações levantadas na RSL sobre estudos de caso com reuso da água recuperada. ....	136
Quadro 9 - Publicações levantadas pela revisão integrativa de estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS. ....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade recomendados para água de reuso de acordo com algumas legislações nacionais de referência.....	30
Tabela 2 - Desempenho de tratamento relacionado às diferentes modalidades de wetlands construídos de escoamento subsuperficial.....	47
Tabela 3 - Periódicos mais recorrentes e publicações científicas levantadas pela RSL.....	55
Tabela 4 - Periódicos e publicações científicas levantadas pela revisão integrativa.....	60
Tabela 5 - Quantidade de trabalhos acadêmicos das instituições de ensino superior mais recorrentes na revisão integrativa.....	61
Tabela 6 - Dados gerais sobre sistemas de tratamento de águas residuárias em cenário urbano.....	70
Tabela 7 - Dados gerais sobre sistemas de tratamento de águas residuárias em cenário rural.....	72
Tabela 8 - Arranjos tecnológicos mais frequentes nos sistemas estudados.....	78
Tabela 9 - Composição do efluente recebido pelos sistemas (água cinza, esgoto bruto e secundário) e após o tratamento em diferentes etapas.....	79
Tabela 10 - Eficiência na remoção de poluentes das águas residuárias em cenário urbano....	81
Tabela 11 - Composição do efluente recebido pelos sistemas (água cinza, esgoto bruto e secundário) e após o tratamento em diferentes etapas.....	82
Tabela 12 - Arranjos tecnológicos mais frequentes nos sistemas estudados no cenário nacional.....	90
Tabela 13 - Visão geral de diferentes configurações de wetlands construídos para tratamento de esgoto doméstico localizados em cenário urbano.....	93
Tabela 14 - Composição média do efluente gerado nos diferentes contextos instalados em cenário urbano e composição média pós-tratamento em wetlands.....	95
Tabela 15 - Visão geral de diferentes configurações de wetlands construídos para tratamento de esgoto doméstico localizados em cenário rural.....	102
Tabela 16 - Composição média do efluente bruto gerado nos diferentes contextos instalados em cenário rural e composição média do efluente pós-tratamento em wetlands.....	106
Tabela 17 - Visão geral de diferentes configurações de wetlands construídos para tratamento de esgoto doméstico gerado em “bairros-cidade”.....	108
Tabela 18 - Composição média do efluente bruto gerado nos diferentes contextos instalados em “bairros-cidade” e composição média pós-tratamento em wetlands.....	109

Tabela 19 - Adequação de parâmetros quanto aos valores recomendados para reuso urbano. .....	114
Tabela 20 - Adequação de parâmetros quanto aos valores recomendados para reuso agrícola. .....	117
Tabela 21 - Eficiências de remoção de poluentes requeridas de acordo com composição média do esgoto doméstico bruto gerado em diversos contextos e o respectivo enquadramento visando reuso urbano e reuso agrícola. ....	119
Tabela 22 - Eficiências de remoção nos estudos de caso com reuso da água recuperada. ....	146
Tabela 23 - Eficiências de remoção nos estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS.	147

## LISTA DE ABREVIACÕES

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- BF – Biofiltro
- Cevat/Cdig – Câmara de evapotranspiração com câmara de digestão anaeróbia
- Cl – Cloração
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente
- DD – Decanto-digestor
- DEC – Decantador primário
- DRF – *Dynamic roughing filter*
- E.P. – Equivalente Populacional
- FA – Filtro de areia
- FAN – Filtro anaeróbio
- FB – Filtro biológico anaeróbio
- FBr – Filtro de brita
- FCA – Filtro de carvão ativado
- FD – Filtro em discos
- FZ – Filtro de zeólita
- LAB – Lodo ativado em bateladas
- LE – Lagoa de estabilização
- RA – Reator anaeróbio
- RAC – Reator Anaeróbio Compartimentado
- RAe – Reator aeróbio
- SBN – Soluções Baseadas na Natureza
- SH – Sistema Híbrido
- TA – Tanque de acúmulo
- TAH – Taxa de aplicação hidráulica
- TE – Tanque de equalização
- TE+A – Tanque de equalização com areação forçada
- TImh – Tanque Imhoff
- TR – Tanque de retenção
- TRH – Tempo de Retenção Hidráulica

TS – Tanque séptico

TSed – Tanque de sedimentação

UASB – Upflow anaerobic sludge blanket

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

WC – Wetland Construído

WC-FL – Wetland construído de fluxo livre (escoamento superficial).

WC-FSS – Wetland construído de fluxo subsuperficial

WCH – Wetland construído de fluxo horizontal

WCV – Wetland construído de fluxo vertical

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2.1. OBJETIVO GERAL.....	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1. Reuso de Águas Residuárias .....	20
3.1.1. Reuso Agrícola e Urbano .....	21
3.1.2. Práticas de Reuso no Cenário Internacional .....	22
3.1.3. Práticas de Reuso no Cenário Nacional.....	23
3.1.4. Legislações Nacionais de Referência .....	24
3.2. Economia Circular.....	33
3.3. Esgotamento Sanitário no Contexto Brasileiro .....	36
3.4. Tratamento de Esgotos como Ação Necessária à Economia Circular.....	40
3.5. Wetlands Construídos como Solução Baseada na Natureza .....	42
3.5.1. Modalidades de Wetland Construído de Escoamento Subsuperficial .....	43
3.5.2. Wetlands Construídos no contexto da Economia Circular .....	48
4. METODOLOGIA.....	50
4.1. Wetlands Construídos como Tecnologia Geradora de Água de Reuso.....	50
4.1.1. Identificação e seleção preliminar dos dados bibliográficos .....	51
4.1.2. Elegibilidade .....	53
4.1.3. Extração de dados .....	54
4.2. Aplicabilidade de Wetlands Construídos no Tratamento Secundário de Esgotos Domésticos – Experiências Brasileiras .....	55
4.2.1. Planejamento.....	56
4.2.2. Execução.....	58
- Levantamento dos artigos nas bases de dados.....	58
- Seleção dos artigos relevantes para estudo .....	59

- <i>Leitura e avaliação dos artigos</i> .....	59
- <i>Categorização, extração e síntese dos dados</i> .....	61
4.2.3. <i>Visitas técnicas</i> .....	66
4.3. <i>Interpretação das Informações Levantadas</i> .....	66
4.4. <i>Potencialidade de Reuso da Água Recuperada nos Diferentes Contextos</i> .....	67
5. <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	69
5.1. <i>Inventário sobre Wetlands Construídos como Tecnologia Geradora de Água de Reuso</i> .....	69
5.2. <i>Experiências Brasileiras no Emprego de Wetlands Construídos para Tratamento Secundário de Esgotos DOMésticos e Sanitários</i> .....	87
5.2.1. <i>Cenário Urbano</i> .....	91
5.2.2. <i>Cenário Rural</i> .....	101
5.2.3. <i>Cenário Periurbano (“bairros-cidade”)</i> .....	107
5.2.4. <i>Performance nos sistemas e potencialidade de reuso</i> .....	111
5.3. <i>Wetlands como Tecnologia Geradora de Água de Reuso no Contexto Brasileiro</i> .....	118
6. <b>CONCLUSÃO</b> .....	125
7. <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	127
APÊNDICE I .....	136
APÊNDICE II.....	141
APÊNDICE III .....	146
APÊNDICE IV .....	147



## 1. INTRODUÇÃO

O lançamento de esgotos *in natura* ou tratados de forma ineficaz nos solos e nos corpos hídricos provocam efeitos deletérios ao ecossistema, além de potencializar a veiculação de doenças para as comunidades ao entorno (LAVRNIC; MANCINI, 2016). A poluição e degradação dos corpos d'água atrelado à escassez hídrica são fatores que tem impulsionado a busca por tecnologias que ofereçam não apenas o tratamento adequado, mas também a possibilidade de aproveitamento desse recurso como uma fonte não convencional de água.

Recentemente, a busca por sistemas naturais de tratamento tem se destacado devido ao seu custo reduzido, manutenção facilitada e preferência de instalação em regiões periurbanas (PINNINTI et al., 2021). As Soluções Baseadas na Natureza (SBN) agregam em sua concepção os três pilares associados ao desenvolvimento sustentável (social, econômico e ambiental), além de contemplar em suas intervenções outros fatores como ações de conservação, de restauração e a busca pelo reaproveitamento de recursos. Pode-se classificar as SBN em três esferas: (i) intervenções como compostagem e controle de processos erosivos; (ii) unidades espaciais como florestas urbanas e corredores verdes; (iii) e unidades tecnológicas como os Wetlands Construídos (WCs) (CASTELLAR et al., 2020).

WCs são uma ecotecnologia consolidada e utilizada mundialmente para o tratamento de águas residuárias. Seu funcionamento é baseado nos processos encontrados em ambientes alagados naturais, sendo estes sistemas robustos e tolerantes quanto a variação de carga e vazão afluente aplicada, com aplicação recomendada principalmente em sistemas descentralizados (DOTRO et al., 2017). No cenário nacional, a ecotecnologia é amplamente estudada desde meados dos anos 1990 (SILVA; SEZERINO, 2021) e o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) os enquadra como uma opção para tratamento de esgotos domésticos no contexto rural, tanto em soluções coletivas quanto individuais (BRASIL, 2019).

O efluente tratado em sistemas WCs caracteriza-se como um líquido com baixa turbidez e reduzida matéria orgânica. Entretanto, uma barreira no tratamento é a limitada remoção de nutrientes, principalmente em relação a amônia, nitrato e ortofosfato (SGROI et al., 2018). Sendo assim, o efluente pode ser encarado como um tipo de “água nutricional” que agrega importantes macronutrientes, com potencial uso para a fertirrigação de plantas.

Seguindo a visão da economia circular, é fundamental a procura por oportunidades para promover a produção e o consumo sustentável através de novos modelos, em observância com o crescimento populacional contínuo e a exponencial escassez de recursos (GOVIDAN;

HASANAGIC, 2018). Em contrapartida com o que tem sido observado na gestão e tratamento de resíduos sólidos, ainda se predomina um pensamento linear quanto ao tratamento de águas residuárias, no qual, após o alcance dos padrões de qualidade, esse efluente é descartado no ambiente, sem que ocorra o aproveitamento dos recursos – água e nutrientes.

O reuso de águas residuárias tratadas atua como ferramenta estratégica para o fomento da reengenharia do ciclo da água, promovendo a circularidade desse recurso. Logo, a prática deve estar apoiada ao entendimento técnico adequado para oferecer segurança na sua aplicação, observando os aspectos legais que determinam tipos de uso, respectivos padrões de qualidade e metodologias de gestão de risco (SANTOS et al., 2020).

Além do mais, o reuso de águas residuárias é considerado uma prática essencial para o país atingir a Agenda 2030, através dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) promovidos pela Organização das Nações Unidas. Em especial o ODS 6, ao garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e esgotamento sanitário para toda a população, mas também o ODS 11, ao tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, e o ODS 12, ao promover padrões de produção e de consumo mais sustentáveis (UNESCO; UNESCO i-WSSM, 2020).

Nota-se uma tendência no cenário nacional e internacional da inserção dos WCs no contexto da economia circular, através do reuso do efluente tratado para diversos fins, desde irrigação agrícola de vinhedos (MILANI et al., 2020), de culturas alimentícias (SERES et al., 2020; SILVA et al., 2019; RECH et al., 2015), uso em descargas sanitárias e produção de água potável (LAKHO et al., 2021) e inclusive na produção anual de 10.000 m<sup>3</sup> de água recuperada aplicada na irrigação paisagística, lavagem de logradouros e de galerias de rede de esgoto (GONZALEZ-FLO et al., 2023). Segundo Moreira e Dias (2020), os sistemas de WCs se apresentam como uma solução promissora e sustentável para saneamento rural ao promover o acesso adequado aos serviços de esgotamento sanitário à população, redução de impactos no ambiente e promoção do reuso da água recuperada de forma segura.

O Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), vinculado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), vem ao longo de 18 anos pesquisando e aplicando a ecotecnologia de wetlands construídos no tratamento de águas residuárias domésticas, industriais e agropecuárias, bem como incentivando o reuso do esgoto tratado com enfoque na sustentabilidade na gestão hídrica. Por conseguinte, este estudo direciona-se para o mapeamento de práticas mundiais acerca o aproveitamento de esgoto tratado em sistemas de WCs como água de reuso não potável e da

aplicabilidade dos sistemas em território nacional nos cenários urbano, periurbano e rural a partir de dados secundários, além de avaliação da potencialidade de reuso dos esgotos tratados em diferentes modalidades de WCs de escoamento subsuperficial, visando a inserção da ecotecnologia no contexto da economia circular.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a potencialidade de aproveitamento do esgoto tratado por modalidades de wetlands construídos de escoamento subsuperficial como água de reuso, sob a perspectiva de economia circular no contexto brasileiro.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Pontuar as principais práticas no cenário mundial da inserção dos wetlands construídos como gerador de água de reuso e sua relevância no contexto da economia circular;
- Avaliar a performance de diferentes modalidades de wetlands construídos no tratamento de esgotos gerados em diferentes cenários nacionais (urbano, periurbano e rural), com vista ao lançamento ambientalmente adequado em corpos d'água ou no solo;
- Analisar a qualidade do esgoto tratado pela ecotecnologia dos wetlands construídos quanto a adequação das características demandadas para reuso não potável da água reciclada;
- Inferir acerca de distintos arranjos tecnológicos compondo os wetlands construídos como gerador de água de reuso aplicável ao contexto brasileiro.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. REUSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

O estresse hídrico tem se tornado um fator cada vez mais preocupante em função do crescimento exponencial das demandas de água no país. Essa demanda está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e ao processo de urbanização, no qual, nas últimas duas décadas, um aumento de 80% do total retirado de água foi identificado e ainda é estimado que essa retirada aumente mais 23% até 2030. As regiões mais críticas são a Região Sul, onde ocorre uma expressiva retirada de água para irrigação de grandes lavouras de arroz, Região Sudeste, com o intensivo uso para abastecimento humano, irrigação e indústria, e na Região Nordeste que sofre com uma reduzida disponibilidade hídrica (ANA, 2020).

Apesar de contar com uma disponibilidade hídrica favorável quando comparado a outras nações, compreendendo aproximadamente 8% da reserva mundial de água doce, o Brasil sofre com a distribuição desigual desse recurso (BRANDÃO et al., 2019). No balanço hídrico quali-quantitativo referente as demandas hídricas de 2016, aproximadamente 13% da área total do Brasil se encontra em situação crítica, com destaque para o estado do Rio Grande do Sul e a região Nordeste (INTERÁGUAS, 2017b). Conjuntamente com a cobertura desigual no abastecimento de água potável, soma-se uma grande variabilidade nos índices pluviométricos ao longo do território, refletindo em secas mais pronunciadas nos estados da região Sudeste, e em parte da região Sul, Centro-Oeste e Nordeste (ANA, 2020).

Outro ponto relevante refere-se às regiões que abrigam áreas de mananciais, no qual o lançamento de efluentes, mesmo tratados, não é permitido a fim de evitar contaminação do curso d'água responsável pelo abastecimento público. Essa restrição tem sido observada na Região Metropolitana de Curitiba, como nas cidades de Piraquara e São José dos Pinhais, onde apenas indústrias que desenvolvem atividades não poluidoras ou indústrias “secas” que não geram efluentes líquidos são permitidas para instalação nessas áreas de mananciais (VÉGAS, 2013).

Nesse cenário de insegurança hídrica, o reuso de águas residuárias se mostra como uma solução sustentável, promovendo o aproveitamento do recurso recuperado para usos menos exigentes, resguardando a água potável para fins mais nobres. A reuso do recurso hídrico, além de ocorrer de forma natural há milhões de anos através da reciclagem da água no ciclo hidrológico, é uma prática que tem sido adotada de forma indireta ou não planejada pelos

seres humanos há muito tempo, a partir da captação de água em corpos hídricos que receberam águas residuárias previamente (SOUSA et al., 2008).

Para a garantia da segurança do uso pelos usuários (contribuindo acerca da aceitação da água de reuso pela população), a prática deve estar apoiada em um embasamento técnico adequado e no tratamento eficiente da água residuária (SANTOS et al., 2020). Segundo Hespanhol (2002), os fatores que irão estabelecer o nível de tratamento necessário, os critérios de segurança e os custos de capital, operação e manutenção são a qualidade da água a ser tratada e o tipo de reuso a ser aplicado.

De modo geral, a aplicação da água de reuso pode ocorrer em diversas categorias, quais sejam: (i) reuso agrícola; (ii) reuso urbano; (iii) reuso ambiental, como na recarga de corpos hídricos e aquíferos; (iv) reuso na aquicultura; (v) reuso industrial; e ainda em termos de potabilidade – reuso potável ou não potável (SANTOS; LIMA., 2022). No presente estudo, o enfoque de aproveitamento da água recuperada se direciona ao reuso não potável nas categorias agrícola e urbano.

### **3.1.1. Reuso Agrícola e Urbano**

Mundialmente a prática do reuso em cenário agrícola se mostra dominante quando comparado às demais aplicações (ANGELANAKIS et al., 2018), com sua principal finalidade destinada à fertirrigação de cultivos agrícolas, visto a presença de diversos nutrientes fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, como nitrogênio, fósforo, potássio e magnésio, possibilitando a redução da necessidade de aplicação de adubos minerais (RODRIGUES, 2008). Além disso, ao se considerar o recurso hídrico em si, a irrigação demanda atualmente 70% do consumo de água mundialmente (PENG et al. 2019), valor muito próximo do volume consumido nas bacias hidrográficas no Brasil para essa atividade – aproximadamente 66,1% (ANA, 2020).

Acerca o reuso urbano não potável, diversas atividades são contempladas, tais como descargas de vasos sanitários, irrigação paisagística, lavagem de veículos, ruas e demais espaços urbanos, combate a incêndio, entre outras (SANTOS; LIMA, 2022). Santos e Vieira (2020) ainda destacam a desobstrução de galerias de águas pluviais e redes de esgoto como práticas essencialmente nacionais, devido ao constante assoreamento dos sistemas.

De acordo com Sousa (2008), o uso de água no ambiente interno das edificações residenciais se concentra nas atividades de limpeza e higiene, e no ambiente externo na

irrigação paisagística, uso em piscinas e lavagem de veículos. Em relação às edificações comerciais e públicas, o uso de água ocorre de forma semelhante às residenciais, mas com o acréscimo de uso em sistemas de resfriamento de ar, e com um maior consumo em ambientes sanitários nas edificações públicas, como universidades e hospitais, correspondendo de 35% a 50% do consumo total. Como apontado por Santos e Lima (2022) a priori, diversas dessas atividades podem ser realizadas com a adoção da água de reuso, possibilitando resguardar a água que atende aos padrões de potabilidade para fins mais nobres.

Todavia, acompanhado dos diversos benefícios oferecidos, desafios no âmbito da economia, saúde e meio ambiente tem sido barreiras para disseminação da prática do reuso (OFORI et al., 2021). Visando garantir a segurança da saúde pública, tanto dos usuários quanto dos produtores e distribuidores da água de reuso, a determinação de parâmetros microbiológicos é o fator de restrição predominante nos quadros regulatórios. Águas residuárias não tratadas, ou tratadas de forma inadequada, apresentam na sua composição diferentes tipos de patógenos, devido a contaminação fecal da água, com agentes transmissores de doenças do grupo das bactérias (como *Salmonella spp.*, *Leptospira*), dos vírus, dos protozoários e helmintos (von SPERLING, 2007).

No caso de sua aplicação como água de irrigação, os principais fatores que exigem atenção, além da contaminação microbiológica, estão relacionados à contaminação ambiental, devido a impermeabilização e desbalanceamento de elementos no solo (MOSCOSO; LEÓN, 1996) e bioacumulação e aumento de concentração de metais pesados e sódio no solo (FEIGIN; RAVINA; SHALHEVET, 1991).

### **3.1.2. Práticas de Reuso no Cenário Internacional**

O reuso controlado já é uma realidade e uma prática consolidada no cenário internacional, sendo atualmente uma intervenção prioritária em países que sofrem com considerável estresse hídrico ou longos períodos de seca, como China, México, Estados Unidos e Israel (GUERRA-RODRIGUEZ et al., 2020).

Em relação ao reuso agrícola, a prática tem sido adotada principalmente em países que sofrem com extremo estresse hídrico, como Arábia Saudita, Omã, Chipre e Israel. No caso de Israel, destaca-se que 97% das estações de tratamento realizam o tratamento terciário dos efluentes e aproveita-se 80% da água residuária tratada para fins de reuso, sendo que 90% desse

volume é destinado para agricultura e 10% para irrigação de parques municipais (MARIN; TAL; YERES, 2017).

Kumar, Hiremath e Asokar (2014) apresentam um estudo de caso situado na Índia, no qual o efluente tratado por uma série de lagoas é aproveitado para irrigação de culturas, como arroz, trigo, milho, algodão, cevada, cana-de-açúcar e sementes oleaginosas. Para uma melhora na eficiência do tratamento, foi associada às lagoas de maturação a criação de peixes e os autores ainda destacam que, com o reuso do esgoto tratado, foi reduzido em até 50 kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> a aplicação de ureia e fosfato nas plantações.

A Alemanha é um país que tem se beneficiado do reuso local em edificações de águas cinza, com a instalação de Estações de Tratamento de Água Cinza (ETAC) nos prédios residenciais. Essas ETAC são comumente compostas por biorreatores com membranas filtrantes (MBR) que apesar de possuírem um alto valor de investimento, assegura-se um fluxo de caixa positivo nos empreendimentos devido às elevadas tarifas de água e esgoto alemãs (GONÇALVES; KELLER; FRANCI, 2019).

Como referência internacional, cabe citar as diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde – OMS, que reconhece parâmetros para reuso de águas residuárias tratadas no cenário agrícola. Para irrigação irrestrita, permite-se um valor máximo de *Escherichia coli* (*E. coli*) de 10<sup>5</sup> NMP/100mL, para plantas que se desenvolvem distantes do nível do solo, e 1000 NMP/100mL para cultivo de tubérculos, raízes e plantas de que desenvolvem rentes ao nível do solo. Já para irrigação restrita, o valor máximo permitido se estende de 10<sup>4</sup> NMP/100mL a 10<sup>6</sup> NMP/100mL, variando de acordo com as técnicas aplicadas para tratamento da água residuária (WHO, 2006).

Além disso, países como Espanha, China, Estados Unidos, Portugal e Israel já elaboraram legislações e regulamentações próprias de modo a auxiliar e incentivar a prática do reuso em seus territórios. Segundo Hendges, Antes e Tones (2018), o arcabouço legal instituído nesses países podem fornecer subsídios para a desenvolvimento do código de prática no Brasil, adaptando-se as características regionais e locais do território nacional.

### **3.1.3. Práticas de Reuso no Cenário Nacional**

Atualmente, o reuso de águas residuárias tratadas ainda não se mostra amplamente difundido no Brasil, com poucos sistemas em escala real realizando a prática. No território nacional, o cenário industrial e urbano são as modalidades que mais tem praticado o reuso. No

primeiro caso, a difusão do reuso nas indústrias tem sido incentivada de modo a reduzir custos com captação de água doce e despesas com lançamento de efluentes nos corpos receptores. Já no segundo caso, os usos mais observados são para lavagem de espaços públicos (vias e logradouros) e irrigação paisagística em ambiente externo e para descargas sanitárias, irrigação de jardins e lavagem de pisos em ambientes internos (MOTA, 2022).

Acerca o reuso urbano, Mota (2022) destaca que algumas cidades já utilizam o esgoto tratado, como a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), que fornece os efluentes das ETEs de Barueri, Parque Novo Mundo e São Miguel Paulista para as cidades de São Paulo, Carapicuíba, São Caetano do Sul, Barueri, Diadema e Santo André para atividades de irrigação paisagística, lavagem de vias e logradouro públicos, abatimento de poeiras em obras civis e desobstrução de tubulações e galerias.

Já em relação ao reuso local em edificações, nota-se uma tendência no aproveitamento de águas cinzas tratadas (MOTA, 2022), fração da água residuária de uma residência, excluindo as partes geradas das bacias sanitárias e mictórios, que representa de 60 a 80% do esgoto doméstico (ERIKSSON et al., 2002). Um exemplo refere-se ao Edifício Royal Blue, localizado em Vitória/ES, que possui uma ETAC operando desde 2008, com um arranjo tecnológico composto por associação em série de processos biológicos anaeróbio e aeróbio (GONÇALVES; KELLER; FRANCI, 2019).

Já em relação ao reuso agrícola, Mota (2022) levanta que praticamente não existem projetos aplicados em território nacional, exceto sistemas em escala piloto para o desenvolvimento de pesquisas. Um desses projetos é o Projeto Palmas para Santana, realizado no município de Santana do Seridó no Rio Grande do Norte, o qual, desde 2014, promove a irrigação de 1 hectare com 20.000 pés de palma forrageira, produzidos para alimentação animal (MOTA, 2022).

Santos et al. (2020) reforçam que, com vista a impulsionar a prática do reuso no país como instrumento de promoção de segurança hídrica, é fundamental sua institucionalização em legislações de cobertura nacional que regulem e direcionem a prática, oferecendo a segurança na sua aplicação.

### **3.1.4. Legislações Nacionais de Referência**

No cenário atual, o Brasil não é contemplado por uma legislação federal que incorpore especificadamente parâmetros de qualidade da água recuperada para fins de reuso. Cabe apontar



que com a Lei nº 14.026/2020 que atualiza o marco legal do saneamento básico no Brasil, o estímulo ao reuso de efluentes sanitários tratados entrou como um dos princípios fundamentais que regem os serviços de saneamento básico. A composição de um quadro regulatório deve se apoiar em instrumentos, como a indicação de padrões de qualidade para os diferentes usos, definição de responsabilidades entre produtores e consumidores da água de reuso atuando em conjunto com o órgão fiscalizador, licenciamento ambiental da atividade e adoção de metodologias de gestão de riscos (SANTOS; VIEIRA, 2020).

Alguns documentos federais têm sido empregados para nortear práticas atuais, propondo valores máximos permissíveis de parâmetros físico-químicos e microbiológicos de acordo com cada recomendação de uso da água recuperada, com destaque para:

- O Produto III do Programa Interáguas (2017a), desenvolvido pelo Ministério das Cidades do Governo Federal, que propõe um Plano de Ações para instituir uma política de reuso de efluente sanitário tratado no Brasil;
- A Norma Brasileira da ABNT, NBR 13.969/1997, norma que regula alternativas técnicas para tratamento local de esgotos, com tanque séptico como unidade preliminar;
- A Norma Brasileira da ABNT, NBR 16.783/2019, norma que regula o uso de fontes alternativas de água não potável em edificações;
- Diretrizes indicadas pelo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), agrupadas por Bastos et al. (2008);
- Manual de Conservação e Reuso de Água em Edificações (2005), publicado pela Agência Nacional das Água – ANA, em parceria com a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo – FIESP e o Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo – SindusCon-SP.

Além disso, algumas legislações estaduais têm regulado a prática, com destaque para:

- Deliberação Normativa CERH-MG nº 65/2020, que estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reuso direto de água não potável no Estado de Minas Gerais;
- Resolução Consema RS nº 419/2020, que estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reuso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul;

- Resolução SES/SIMA nº 01/2020, que disciplina o reuso direto não potável de água, para fins urbanos no Estado de São Paulo.

Importante frisar que cada documento norteador determina suas classificações e os usos recomendados para aplicação da água de reuso de acordo, assim como respectivos parâmetros de qualidade. As características gerais de cada classificação, documento citado e usos recomendados relevantes ao estudo estão listados no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificações de recomendações de uso propostas pelos documentos reguladores para reuso da água recuperada (Continua).

Documento	Classificação e Uso
Programa Interáguas (2017a)	<b>Agrícola irrestrito:</b> irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve rente ao solo sem processamento prévio, como hortaliças e tubérculos (alface, morango, cenouras, etc), culturas hidropônicas.
	<b>Agrícola restrito:</b> irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve distante do solo sem processamento prévio (como milho, batatas, arroz) ou após processamento prévio; não destinadas ao consumo humano; cultivo de florestas plantadas.
	<b>Urbano irrestrito:</b> irrigação paisagística, bacias sanitárias e lavagem de logradouros.
	<b>Urbano restrito:</b> irrigação paisagística em áreas restritas (como em rodoviárias, cemitérios, centro comerciais) e outros usos urbanos, tais como desobstrução de redes de esgoto, construção civil, lavagem de veículos e combate a incêndio.

Quadro 1 - Classificações de recomendações de uso propostas pelos documentos reguladores para reuso da água recuperada (Continuação).

<b>Documento</b>	<b>Classificação e Uso</b>
NBR 13.969/1997	<b>Classe 1:</b> Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes.
	<b>Classe 2:</b> Lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.
	<b>Classe 3:</b> Descargas de bacias sanitárias.
	<b>Classe 4:</b> Pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.
NBR 16.783/2019	Descarga de vaso sanitário; lavagem de logradouros, pátios, garagens e áreas externas; lavagem de veículos; irrigação paisagística; uso ornamental (fontes, chafarizes e lagos), arrefecimento de telhados, sistemas de resfriamento a água.
PROSAB (Bastos et al., 2008)	<b>Agrícola irrigação irrestrita:</b> qualquer cultura, hidropônico e consumidas cruas.
	<b>Agrícola irrigação restrita:</b> hidropônico e qualquer cultura não ingerida crua, culturas alimentícias e não alimentícias, forrageiras, pastagens e árvores.
	<b>Urbano irrestrito:</b> irrigação (campos de esporte, parques, jardins e cemitérios), usos ornamentais e paisagísticos em áreas com acesso irrestrito ao público, limpeza de ruas.
	<b>Urbano restrito:</b> irrigação (parques, canteiros de rodovias), usos ornamentais e paisagísticos em áreas com acesso controlado ou restrito ao público, abatimento de poeira em estradas vicinais, usos na construção civil.
	<b>Uso predial:</b> Descarga de vaso sanitário.
Manual de Conservação e Reuso de Água em Edificações (2005)	<b>Classe 1:</b> descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água etc.), lavagem de roupas e de veículos.
	<b>Classe 3:</b> Irrigação de áreas verdes e rega de jardins.

Quadro 1 - Classificações de recomendações de uso propostas pelos documentos reguladores para reuso da água recuperada (Continuação).

<b>Documento</b>	<b>Classificação e Uso</b>
CERH-MG nº 65/2020	<b>Agrossilvipastoril amplo:</b> fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão.
	<b>Agrossilvipastoril limitado:</b> fertirrigação superficial ou localizada, evitando-se contato da água de reuso com o produto alimentício.
	<b>Urbano amplo:</b> lavagem de pátios, ruas e avenidas, estacionamentos ou outros com exposição similar; lavagem de veículos comuns; uso predial comercial ou industrial (restrito a descargas sanitárias).
	<b>Urbano limitado:</b> lavagem de veículos especiais (tais como aqueles utilizados em coleta e transporte de resíduos sólidos domésticos, coleta seletiva, construção civil, mineração), lavagem externa de trens e aviões, controle de poeira, combate a incêndio, desobstrução de galerias de água pluvial e rede de esgoto (para a desobstrução, o limite referente a coliformes termotolerantes ou <i>E. coli</i> é de $10^7$ NMP/100mL).
Consema RS nº 419/2020	<b>Urbano Classe A (irrestrito):</b> irrigação paisagística em locais de acesso irrestrito, lavagem de logradouros e veículos.
	<b>Urbano Classe B (restrito):</b> irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito, ao abatimento de poeira, aos usos na construção civil e em estações de tratamento de efluente e à desobstrução de redes de esgoto pluvial e/ou cloacal (para desobstrução de redes de esgoto pluvial ou cloacal é dispensado o atendimento do parâmetro coliformes termotolerantes)
	<b>Agrícola/florestal:</b> irrigação de qualquer cultura, exceto frutos, hortaliças, raízes e tubérculos com contato direto com o solo ou com a água para consumo humano na forma crua.
SES/SIMA nº 01/2020	<b>Irrestrito:</b> irrigação paisagística; lavagem de logradouros e espaços públicos e privados; construção civil; desobstrução de galerias; lavagem de veículos; combate a incêndio.
	<b>Restrito:</b> exceto combate a incêndio.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2020).

No estudo de Santos et al. (2020) discorre-se sobre a disparidade nos padrões estabelecidos pelos documentos legais existentes que atualmente regulam o reuso das águas recuperadas no país, observando-se uma sobreposição nas classificações de uso e grande disparidade entre valores máximos permitidos. Além disso, esses documentos apresentam restrições demasiadamente elevadas, inclusive ao se comparar com legislações internacionais, o que se torna um obstáculo na implantação de ações efetivas para a difusão da prática.

Nesse sentido, na Tabela 1 apresentam-se os valores recomendados de parâmetros físico-químicos e microbiológicos para diferentes usos da água recuperada, de acordo com as Legislações de Referência listadas no Quadro 1.

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade recomendados para água de reuso de acordo com algumas legislações nacionais de referência (Continua).

Documento	Classe	pH	DBO <sub>5,20</sub> (mg/L)	Sólidos (mg/L)	Turbidez (UT)	NT (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PT (mg/L)	Coliformes (NMP/100mL)	Cloro Residual (mg/L)
Programa Interáguas (2017a)	Agrícola irrestrito	6 - 9	< 15	-	≤ 5	-	-	-	-	-	< 10 (CT)	> 1,0
	Agrícola restrito	6 - 9	< 30	-	-	-	-	-	-	-	< 10 <sup>3</sup> (CT)	> 1,0
	Urbano irrestrito	6 - 9	< 15	-	< 5	-	-	-	-	-	< 10 (CT)	> 1,0
	Urbano restrito	6 - 9	< 30	-	< 5	-	-	-	-	-	< 10 <sup>3</sup> (CT)	> 1,0
NBR 13.969/1997	Classe 1	6 - 8	-	< 200 (SDT)	< 5	-	-	-	-	-	< 200 (CF)	0,5 - 1,5
	Classe 2	-	-	-	< 5	-	-	-	-	-	< 500 (CF)	> 0,5
	Classe 3	-	-	-	< 10	-	-	-	-	-	< 500 (CF)	-
	Classe 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 5.000 (CF)	-
NBR 16.783/2019		6 - 9	≤ 20	≤ 2.000 (SDT)	≤ 5	-	-	-	-	-	≤ 200 ( <i>E. coli</i> )	0,5 – 5,0
PROSAB (Bastos et al, 2008)	Agrícola irrestrito	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>3</sup> (CT)	-
	Agrícola restrito	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>4</sup> (CT)	-
	Urbano irrestrito	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 200 (CT)	-
	Urbano restrito	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>4</sup> (CT)	-

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade recomendados para água de reuso de acordo com algumas legislações nacionais de referência (Continuação).

Documento	Classe	pH	DBO <sub>5,20</sub> (mg/L)	Sólidos (mg/L)	Turbidez (UT)	NT (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PT (mg/L)	Coliformes (NMP/100mL)	Cloro Residual (mg/L)
PROSAB (Bastos et al, 2009)	Uso predial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>3</sup> (CT)	-
Manual de Conservação e Reuso de Água em Edificações (2005)	Classe 1	6 - 9	≤ 10	≤ 5 (SST) ≤ 500 (SDT)	≤ 2	-	< 10	≤ 20	≤ 1	≤ 0,1	ND (CF)	-
	Classe 3	6 - 9	≤ 20	< 20 (SST)	< 5	5 - 30	-	-	-	-	≤ 200 (CF)	< 1
CERH-MG nº 65/2020	Agrossilvipastoril amplo	6 - 9	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>4</sup> (CT ou <i>E. coli</i> )	-
	Agrossilvipastoril limitado	6 - 9	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>6</sup> (CT ou <i>E. coli</i> )	-
	Urbano amplo	6 - 9	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>3</sup> (CT ou <i>E. coli</i> )	-
	Urbano limitado	6 - 9	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10 <sup>4</sup> (CT ou <i>E. coli</i> )	-

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade recomendados para água de reuso de acordo com algumas legislações nacionais de referência (Continuação).

Documento	Classe	pH	DBO <sub>5,20</sub> (mg/L)	Sólidos (mg/L)	Turbidez (UT)	NT (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PT (mg/L)	Coliformes (NMP/100mL)	Cloro Residual (mg/L)
Consema RS nº 419/2020	Urbano Classe A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 200 (CT)	< 1,0
	Urbano Classe B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 10 <sup>3</sup> (CT)	< 1,0
	Agrícola/ Florestal	6 - 9	-	-	-	(1)	-	-	-	(1)	< 10 <sup>4</sup> (CT)	
SES/SIMA nº 01/2020	Irrestrito	6 - 9	≤ 10	-	≤ 2	-	-	-	-	-	ND (CF ou <i>E. coli</i> )	≥ 1,0
	Restrito	6 - 9	≤ 30	≤ 30 (SST)	≤ 5	-	-	-	-	-	≤ 200 (CF) ≤ 120 ( <i>E. coli</i> )	≥ 1,0

Legenda: DBO – Demanda Biológica de Oxigênio; SST – Sólidos Suspensos Totais; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – Nitrito; N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – Nitrogênio amoniacal; N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Nitrato; PT – Fósforo total; CT – Coliformes Termotolerantes; CF – Coliforme Fecal; *E. coli* – *Escherichia coli*; ND – Não Detectável.

(1) A carga aplicada não deverá exceder as recomendações de adubação para a cultura adotada, expressa em kg/ha, conforme tabelas constantes no “Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina”, elaborado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-Núcleo Regional Sul.



Cabe ressaltar que, além de documentos que determinam valores máximos de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, outras ferramentas também tem sido empregadas de modo a avaliar a potencialidade de reuso da água residuária tratada. Dentre elas, a avaliação quantitativa de risco microbiológico (AQRM), uma técnica de modelagem probabilística que calcula os riscos associados a diferentes patógenos em cenários específicos, traduzindo a ocorrência de patógenos ambientais para a probabilidade de infecção. Na AQRM, portanto, permite-se a estimativa de risco de acordo com determinados fatores, como a densidade do patógeno, as taxas de ingestão, os modelos de exposição, além dos modelos de dose-resposta adequados para as populações expostas. (OLIVEIRA, 2015).

Alguns estudos tem optado por metodologias semi-qualitativas para avaliação de risco microbiológico associado ao reuso de águas residuárias, como relatado por Marques et al. (2021), no qual inicialmente se estabelece os cenários de interesse, avaliando as rotas de transmissão, vias de exposição e eventos de perigo. Após, realiza-se a caracterização do risco, considerando identificação e caracterização do indicador de contaminação microbiológica e avaliação da exposição, obtendo-se, portanto, a probabilidade de exposição, probabilidade de infecção e severidade do risco (MARQUES et al., 2021).

Importante apontar que alguns documentos também recomendam outros critérios para garantir a difusão da prática do reuso de forma segura, como níveis de tratamento do efluente, além de periodicidade e critérios para monitoramento da água de reuso. Lima et al. (2020) reforçam a importância da disseminação do conceito “*one water*”, ou seja, a água vista como uma só através da união entre os departamentos de gestão de água e esgoto nas tomadas de decisão, desenvolvendo soluções mais ponderadas, racionais e eficientes, visando atender as futuras demandas hídricas.

### 3.2. ECONOMIA CIRCULAR

A Economia Circular (EC) é um conceito que tem sido amplamente levantado nos campos da política, economia e ciência como um instrumento rumo ao desenvolvimento sustentável. De modo geral, esse modelo econômico visa a conversão da economia linear (extração, produção, consumo e descarte) para um sistema fechado, priorizando a minimização de entradas de recursos, de geração de resíduos, de emissão de gases e perda de energia, com enfoque na reinserção de materiais que seriam desperdiçados (GEISSDOERFER et al., 2017).

Esse modelo econômico é restaurativo e regenerativo por princípio e sintetiza diferentes escolas de pensamento, como a economia de performance, a filosofia de design de McDonough e Braungart denominada *Cradle to Cradle* – C2C, a ecologia industrial, o capitalismo natural e a abordagem *blue economy* (EMF, 2015). Como definido por McDonough and Braungart (2002) na teoria C2C, os materiais fazem distinção entre ciclos técnicos e biológicos. O consumo ocorre apenas nos ciclos biológicos, onde deve-se priorizar a recuperação dos nutrientes biológicos dos produtos consumíveis ou os reinserir na biosfera de maneira segura, regenerando os sistemas vivos e construindo capital natural, reduzindo desperdício e geração de resíduos. Já no ciclo técnico, os materiais devem ser projetados de modo que circulem em ciclos fechados, mantendo um alto nível de qualidade e utilidade, sem retornar à biosfera, através da recuperação e restauração dos produtos, componentes e materiais – principalmente aqueles que não são produzidos de forma contínua pela biosfera (não-renováveis), como ligas metálicas e plásticos.

Em síntese, como estabelecido pela Fundação Ellen MacArthur (2015), a EC possui três princípios, quais sejam: (i) preservar e potencializar o capital natural, controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis; (ii) otimizar os rendimentos de recursos, circulando produtos, componentes e materiais com a mais alta utilidade em todos os momentos, tanto nos ciclos técnicos quanto biológicos e (iii) promover a eficácia do sistema, revelando e eliminando externalidades negativas.

Entretanto, os modelos de gestão de recursos adotados atualmente nas cidades ainda se apoiam nos preceitos da economia linear, a partir da adoção de práticas como a importação de recursos para serem utilizados e posteriormente descartados pelos consumidores e implementação de infraestruturas com única funcionalidade, como estações de tratamento de efluentes ou sistemas de drenagem urbana, carecendo de uma visão múltipla (ATANASOVA et al., 2021). Para que as cidades possam enfim se tornarem circulares e consigam atender os princípios da EC, é essencial que ocorram mudanças no design de infraestruturas e modelos de gestão através de uma abordagem sistêmica, holística, multisetorial e multidisciplinar. Para isso, é necessário que ocorra regulação através de legislações e governança, avaliação para posterior mudança de comportamento da população, e a adoção de novas abordagens conceituais, técnicas e tecnológicas (LANGERGRABER et al., 2020; LANGERGRABER et al., 2021).

De modo a conectar todos os agentes que atuam no planejamento das cidades e desenvolver sistemas para a gestão circular dos recursos nas cidades através de uma rede única,

a União Europeia criou a “COST (*CO*operation in Science and Technology) Action Circular City”. Ao definir uma linguagem comum interdisciplinar entre as partes envolvidas, utilizando os conceitos da EC como abordagem chave e as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) como ferramentas principais, o principal objetivo da iniciativa é encorajar os pesquisadores a testar a hipótese de que “um sistema de fluxo circular que implemente SBN para gerenciar nutrientes e recursos dentro da biosfera urbana levará a um ambiente urbano resiliente, sustentável e saudável” (LANGERGRABER et al., 2020).

Essa hipótese é testada em cinco domínios (*Working Groups – WG*), quais sejam: (i) WG<sub>1</sub> “ambiente construído”; (ii) WG<sub>2</sub> “gestão urbana de água”; (iii) WG<sub>3</sub> “recuperação de recursos”; (iv) WG<sub>4</sub> “agricultura urbana”; (v) WG<sub>5</sub> “sociedade”. O WG<sub>2</sub> investiga em específico o uso sustentável da água urbana, que engloba águas residuárias, águas pluviais, tratamento descentralizado e recuperação de recursos, com enfoque na recuperação da água tratada para irrigação, para os serviços de saneamento e, também, para fins recreativos (LANGERGRABER et al., 2020).

As SBN são tecnologias e soluções ecológicas multifuncionais e em multiescala, que agregam na sua concepção os preceitos da EC ao reproduzir os mecanismos encontrados no meio natural, estimulando a remodelação das infraestruturas para sistemas naturais circulares. A implementação de SBN nas cidades, portanto, facilita a transição rumo a EC, considerando que seus múltiplos benefícios vão além dos fatores climáticos, fomentando sistemas naturais no meio urbano, promovendo assim recursos e habitat para a biodiversidade local (LANGERGRABER et al., 2021; STEFANAKIS; CALHEIROS; NIKOLAOU, 2021). Atanasova et al. (2021) apontam que os principais desafios para desenvolvimento da circularidade no meio urbano (Urban Circularity Challenges – UCCs) podem ser atendidos através da adoção das SBN. Esses desafios são os seguintes: (i) UCC<sub>1</sub> “restauração e manutenção do ciclo da água”; (ii) UCC<sub>2</sub> “tratamento, recuperação e reuso da água e de águas residuárias”; (iii) UCC<sub>3</sub> “recuperação e reuso de nutrientes”; (iv) UCC<sub>4</sub> “recuperação e reuso de materiais”; (v) UCC<sub>5</sub> “produção de alimentos e biomassa de modo sustentável”; (vi) UCC<sub>6</sub> “eficiência e recuperação energética”, incluindo mitigação do efeito de ilha de calor e recuperação energética no fluxo de resíduos; (vii) UCC<sub>7</sub> “recuperação de sistemas construídos”.

Diante o exposto, o reuso de águas residuárias tem sido tópico recorrente em diversos estudos que tratam da Economia Circular, sendo levantado (principalmente em associação com as SBN) como ferramenta necessária para promoção de cidades circulares. No caso da rede

“COST Action Circular City” o reuso é promovido dentro do WG<sub>2</sub>, e em relação aos desafios para desenvolvimento de cidades circulares, é apontado especificadamente no UCC<sub>2</sub>, mas também dentro dos UCC<sub>1</sub> e UCC<sub>3</sub>. Para Atanasova et al. (2021), o real desafio está na gestão dos serviços de saneamento, no qual a abordagem de “tratamento para descarte” deve transitar para o “gerenciamento para reuso”, concomitantemente com a inclusão de infraestruturas que ofereçam segurança na prática, fornecendo mais serviços à sociedade através da recuperação da água e nutrientes.

### 3.3. ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO CONTEXTO BRASILEIRO

A nível nacional, os serviços públicos de esgotamento sanitário são definidos como as atividades, infraestruturas e instalações que realizam a coleta, transporte, tratamento e disposição dos esgotos sanitários e dos lodos originários da operação de unidades de tratamento coletivas ou individuais de forma ambientalmente adequada. Essa destinação consiste na produção de água de reuso ou no lançamento do efluente tratado de forma adequada no ambiente (BRASIL, 2007).

Nos municípios brasileiros, os índices de cobertura dos serviços de esgotamento sanitário apontam que apenas 55% da população urbana é atendida de forma adequada quanto a coleta seguida de tratamento, no qual 12% é a parcela atendida com soluções no lote, também chamadas de soluções individuais. Nesse sentido, 45% da população urbana não é atendida de forma adequada, onde 18% é contemplada com a coleta, mas carece do tratamento do esgoto gerado e 27% sequer são contemplados com a coleta desse efluente (ANA, 2017).

Ao observar dados levantados pelo Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB sobre os destinos empregados pelos domicílios para os esgotos gerados, a forma mais utilizada consiste na rede geral de esgoto ou pluvial, abrangendo a 66,5% dos domicílios, seguido pela utilização de fossa séptica por 15,6%. Enquanto isso, 17,9% não possuem um atendimento adequado a esse serviço, correspondendo a cerca de 12,4 milhões de domicílios, no qual 14,9% fazem uso de fossa rudimentar e 3% destinam diretamente em valas, rios, lagos, mar ou outros locais sem nenhum tipo de tratamento (BRASIL, 2013).

Com a Lei Federal nº 14.026/2020, que atualiza e complementa o Marco Regulatório do Saneamento Básico no país, ficou estabelecido que os contratos de prestação de serviços públicos de saneamento básico deverão definir metas que garantam a universalização do atendimento de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de

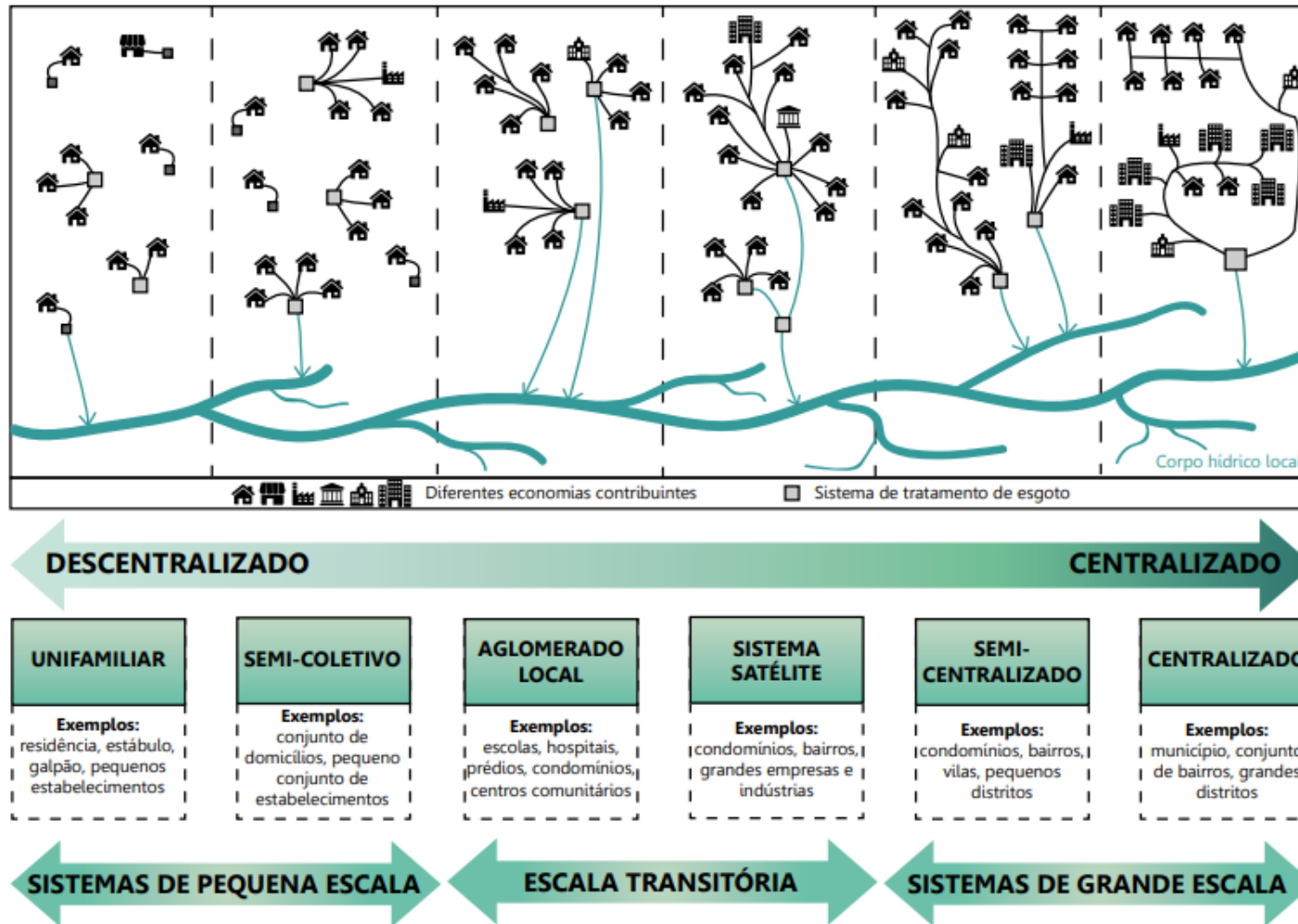
2033 (BRASIL, 2007; BRASIL, 2020). Nesse sentido, com vista a atingir essa meta até a data proposta, é fundamental analisar diferentes propostas para diferentes contextos.

Analisando o cenário em que os domicílios brasileiros estão inseridos, nota-se uma discrepância nas soluções empregadas entre o contexto urbano e rural. Enquanto que no primeiro caso, o percentual de acesso à rede geral de esgoto corresponde a 75,2% dos domicílios, no cenário rural apenas 7,7% utilizam dessa opção. Sobre a solução individual considerada adequada (fossa séptica), 32% dos domicílios rurais empregam essa tecnologia, enquanto que esse valor corresponde apenas a 13,3% dos domicílios urbanos. Importante frisar que, de acordo com o PLANSAB, a opção mais utilizada pelos domicílios rurais ainda são as fossas rudimentares correspondendo a uma percentagem de 48,6%, evidenciando o atendimento precário para a população inserida nesse cenário (BRASIL, 2013).

Sobre as abordagens nos sistemas de tratamento de esgotos, existe uma ampla gama de possibilidades que se enquadram entre dois extremos: pequenos sistemas descentralizados (unifamiliares) e grandes sistemas centralizados (grandes Estações de Tratamento de Esgoto – ETE). Existem diferentes propostas de classificação para os sistemas descentralizados, como ilustrado na Figura 1, no qual cada nível atende a diferentes características e volumes de águas residuárias. Tonetti et al. (2018) destacam duas esferas principais e mais comumente empregadas que se enquadram na abordagem descentralizada: sistemas unifamiliares (ou individuais), englobando famílias que habitam em um ou dois domicílios muito próximos; e sistemas semicoletivos, onde ocorre o tratamento do esgoto gerado por um pequeno agrupamento de casas ou espaços destinados ao comércio e prestação de serviços, como vilas, pequenas escolas e centros comerciais.

Nos sistemas descentralizados de tratamento de esgoto não há apenas uma unidade de tratamento (ETE) servindo uma população em determinada área, mas múltiplas opções com diferentes tecnologias. O tratamento descentralizado não se reduz a pequenas ETEs nem a determinado equivalente populacional, mas, principalmente, a se realizar próximo a fonte geradora. Dentre diversos pontos que se destacam com a abordagem descentralizada, cabe apontar a possibilidade de separação de contaminantes na fonte e limitada descarga de efluentes no sistema de coleta tradicional quando integrado soluções de pré-tratamento, tratamento e reúso (LIBRALATO et al., 2012).

Figura 1 - Representação do sistema de tratamento de esgoto conforme o nível de descentralização ou centralização.



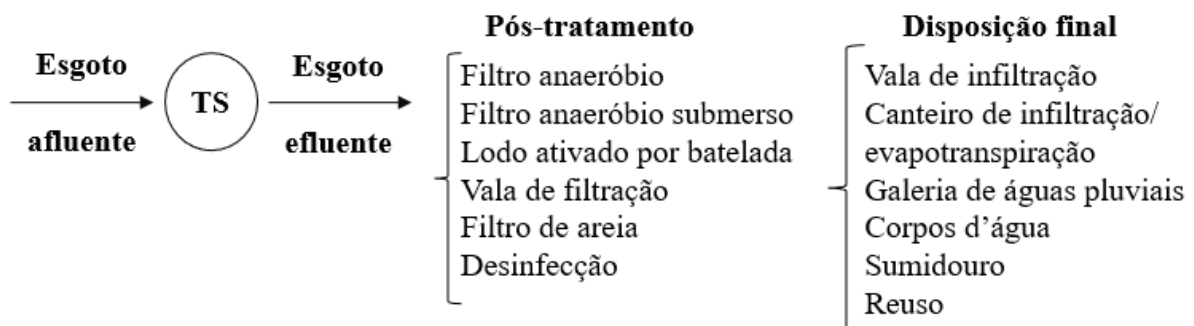
Fonte: Tonetti et al (2018).

A descentralização se mostra mais viável para regiões com menor densidade populacional, como comunidades em áreas rurais e periurbanas isoladas, ou locais que se beneficiam do tratamento no lote, como em empreendimentos industriais, comerciais e residenciais isolados. A definição de um programa de gestão que garanta a inspeção e manutenção regular é fundamental para garantir a eficiência desse sistema. Uma vantagem da descentralização é a redução máxima do componente “coleta” (que representa justamente o maior gasto em sistemas centralizados), fator importante já que em países em desenvolvimento o fator econômico é o critério mais importante na tomada de decisão (LIBRALATO et al., 2012; MASSOUD et al., 2009).

Projetos de instalação de sistemas de tratamento no lote são geralmente regulamentados pelo órgão ambiental competente e pelas concessionárias de abastecimento de água e tratamento de esgoto. Para tanto, deve-se observar além das legislações federais, estaduais e normas técnicas, as leis e diretrizes municipais, assim como plano diretor local (MEDEIROS, 2017).

Para orientar a concepção das tecnologias de tratamento em sistemas individuais, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta duas normativas: (i) NBR 7.229 (ABNT, 1993), que rege sobre o projeto, construção e operação de tanques sépticos (TS) como tecnologia de tratamento primário; e (ii) NBR 13.969 (ABNT, 1997), que apresenta tecnologias para o tratamento complementar, como ilustrado na Figura 2, além de alternativas para disposição final dos efluente líquidos pós-tratamento.

Figura 2 - Fluxograma de opções de tecnologias para o tratamento de esgoto doméstico no lote.



Fonte: Adaptado de ABNT (1997).

Assim como nos sistemas individuais, nos sistemas coletivos ou em cluster, como em loteamentos e em condomínios residenciais, pode-se adotar modalidades de sistema de tratamento no lote com a implementação de um sistema coletivo, atendendo toda comunidade residente, através de ETEs compactas compostas por tecnologias mais complexas, como lodos ativados em batelada, reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB) seguido de filtros aeróbios, além de reatores anaeróbios compartimentados (RAC) seguido de Wetlands Construídos, entre outros (MEDEIROS, 2017).

Enquanto que, atualmente, o objetivo principal dos serviços de esgotamento sanitário está na destinação segura das águas residuárias (principalmente através do afastamento da fonte geradora) e no seu descarte em sua forma menos nociva nos ambientes aquáticos, através dos preceitos da Economia Circular há uma mudança de prioridades. Dependendo das condições e prioridades do local, novos objetivos permeiam ações voltadas para a economia de água, maximização do reuso da água do reuso completo de todas as substâncias envolvidas (como nutrientes), maximização da produção agrícola, entre diversos outros aspectos envolvendo uso de energia e mitigação dos efeitos de mudanças climáticas nas cidades (MASI et al., 2018).

Como observado na Figura 2, na NBR 13.969 (ABNT, 1997) aponta-se o reuso como uma alternativa para destinação do efluente tratado. Para que a prática ocorra de modo seguro, a normativa estabelece que, na elaboração do projeto, é fundamental que ocorra a seleção de profissionais responsáveis pela manutenção e operação do sistema de reuso, além do fornecimento de manuais com especificações técnicas, procedimentos para operação adequada e treinamento prévio para qualificação profissional, principalmente para os empreendimentos que envolvem condomínios residenciais ou comerciais com grande número de pessoas.

#### 3.4. TRATAMENTO DE ESGOTOS COMO AÇÃO NECESSÁRIA À ECONOMIA CIRCULAR

Na escolha da tecnologia de tratamento mais adequada é fundamental a observação de diversos critérios, dentre eles o desempenho de tratamento requerido, as condições da área e as características do esgoto a ser tratado. Além disso, Massoud et al. (2009) apontam três vertentes fundamentais: viabilidade econômica, sustentabilidade ambiental e aceitação social. Quando observado o fator ambiental, alguns aspectos são levantados, como assegurar a proteção



ambiental e conservação de recursos, além de avaliar a possibilidade do reuso de água e reciclagem de nutrientes.

Segundo von Sperling (1995), a eficiência de remoção dos diferentes tipos de contaminantes presentes nos esgotos varia de acordo com o nível de tratamento e o respectivo mecanismo utilizado, o qual deve ser escolhido em observância da qualidade final da água residuária exigida de acordo com sua destinação – seja para lançamento no corpo receptor ou para reuso. Nesse sentido, o **tratamento preliminar** visa a remoção de sólidos grosseiros, utilizando de mecanismos físicos para esse fim, como gradeamento e desarenador. Já o **tratamento primário** objetiva a remoção de sólidos sedimentáveis, sólidos flutuantes e parte da matéria orgânica associada, o qual também ocorre através de mecanismos físicos e biológicos, como decantadores primários e decanto-digestores em soluções coletivas e tanque sépticos em soluções individuais.

No **tratamento secundário** é obtido um tratamento mais completo, com a remoção de matéria orgânica em suspensão e dissolvida, onde ocorre a predominância dos processos biológicos. Nesse nível também pode ocorrer a remoção de alguns nutrientes, através da nitrificação e desnitrificação biológica e precipitação de fósforo, por exemplo, e de alguns organismos patogênicos. Os principais sistemas utilizados em nível secundário são as lagoas de estabilização e suas variantes, sistemas anaeróbios (como reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente – UASB, e filtros anaeróbios), lodos ativados, reatores aeróbios e sistemas tipo wetlands construídos (von SPERLING, 1995).

Por fim, ainda é possível um refinamento dessa água residuária através do **tratamento terciário**, o qual objetiva a remoção de nutrientes e organismos patogênicos de forma mais específica, além de metais pesados e compostos não biodegradáveis. A remoção de organismos patogênicos ocorre principalmente através da desinfecção, a qual pode ocorrer em processos naturais, como em lagoas de maturação e polimento, ou artificial, através da cloração, ozonização, radiação ultravioleta ou de membranas (von SPERLING, 1995).

O cenário atual aponta que, em relação aos sistemas centralizados no Brasil, aproximadamente 30% dos efluentes são tratados apenas a nível primário ou primário avançado, e apenas 7% passam por algum processo de desinfecção, reforçando uma fragilidade na escolha das tecnologias empregadas, obtendo assim um efluente final com qualidade inferior (LIMA et al., 2020). Os mesmos autores reforçam a importância nessa tomada de decisão, não

apenas para atingir os parâmetros exigidos por lei para lançamento do efluente tratado em diferentes meios, mas também para produzir maiores volumes de água de reuso.

Para uma mudança efetiva, os arranjos tecnológicos dos sistemas precisam ser adequadamente projetados e compostos por tecnologias que permitam ciclos fechados e recuperação de recursos. Seguindo essa visão, as estações de tratamento de efluente (ETEs) migram da “abordagem fim de tubo”, para uma abordagem “orientada a recursos”, tornando-as estações de tratamento de água de reuso (ETAR), portanto fábricas (pro)ativas de recuperação de produtos com valor agregado (PAPA et al., 2017).

Em um cenário de escolha de tecnologias como ferramenta para gestão de recursos hídrico em cidades circulares, as Soluções Baseadas na Natureza – SBN se destacam a partir da sua capacidade de mitigação de impactos de enchentes e secas, manutenção do regime hidrológico natural, possibilidade de purificação de diversos tipos de águas residuárias (águas cinzas, pluviais e residuárias) direcionadas às propostas diferentes e pelo uso mais eficiente da água (ORAL et al., 2020), além da sua contribuição na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas através da redução de pegada de carbono e no estabelecimento de ecossistemas no ambiente urbano (STEFANAKIS et al., 2021).

### 3.5. WETLANDS CONSTRUÍDOS COMO SOLUÇÃO BASEADA NA NATUREZA

Wetlands construídos (WC) são sistemas naturais de tratamento de águas residuárias, projetados de forma a reproduzir e otimizar os processos naturais encontrados em ambientes alagados, como pântanos e mangues – portanto, uma Solução Baseada na Natureza. Esses sistemas podem ser empregados para tratamento de efluentes domésticos, industriais e agrícolas a nível primário, secundário ou terciário, de acordo com a qualidade final requerida, sendo comum sua associação com outras tecnologias de tratamento, como tanques sépticos, RAC ou UASB (SEZERINO et al., 2018; DOTRO et al., 2017; MOREIRA; DIAS, 2020).

Sua estrutura é composta por módulos impermeabilizados escavados ou construídos sobre o solo, preenchidos com um material filtrante (geralmente areia ou brita), o qual serve como meio de suporte para o crescimento das macrófitas e desenvolvimento do biofilme microbiano. De modo geral, o tratamento do efluente ocorre através de três processos: físico, com a filtração dos sólidos suspensos pelo meio suporte; químico, através da adsorção dos nutrientes; e biológico, pela depuração da matéria orgânica realizada pela comunidade

microbiológica e pela fitoextração realizada pelas macrófitas (SEZERINO et al., 2018; von SPERLING, 1995).

Além do tratamento da água residuária, a ecotecnologia promove uma variedade de outros serviços ecológicos, como promoção de habitat para vida selvagem, evapotranspiração e resfriamento local, armazenamento e gestão de água, paisagismo e introdução de áreas verdes em ambientes construídos. São considerados sistemas flexíveis, que necessitam de pouca manutenção e baixo custo de operação, além de serem apontados como uma alternativa para o tratamento descentralizado em áreas rurais e periurbanas (MASI et al, 2018; MOREIRA; DIAS, 2020).

Apesar de, até o presente momento, não serem tecnologias normatizadas conforme os critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o Brasil foi o país na América Latina na última década que apresentou maior percentual de publicações sobre a aplicabilidade da ecotecnologia, com um total de 32% dos artigos publicados, evidenciando a relevância da utilização dos WC em cenário nacional (RODRIGUEZ-DOMINGUES et al., 2020).

Os WC podem ser classificados de acordo com o fluxo hidráulico do esgoto na alimentação do sistema, como de escoamento superficial ou subsuperficial. Os WC de escoamento superficial (ou WC de fluxo livre – WC-FL) são unidades cuja alimentação ocorre acima da superfície do substrato, formando assim uma lâmina livre d'água. Já nos sistemas de WC de escoamento subsuperficial (WC-FSS) a alimentação ocorre dentro do meio filtrante, subdividindo-se de acordo com a direção do fluxo do afluente (DOTRO et al., 2017). O enfoque do estudo são as modalidades de WC-FSS, destacando-se: (i) WC Subsuperficial Horizontal (WCH); (ii) WC Vertical Descendente (WCVD); (iii) WC Vertical de Fundo Saturado (WCV-FS) e (iv) Sistemas Híbridos (SH), que consistem na combinação entre modalidades.

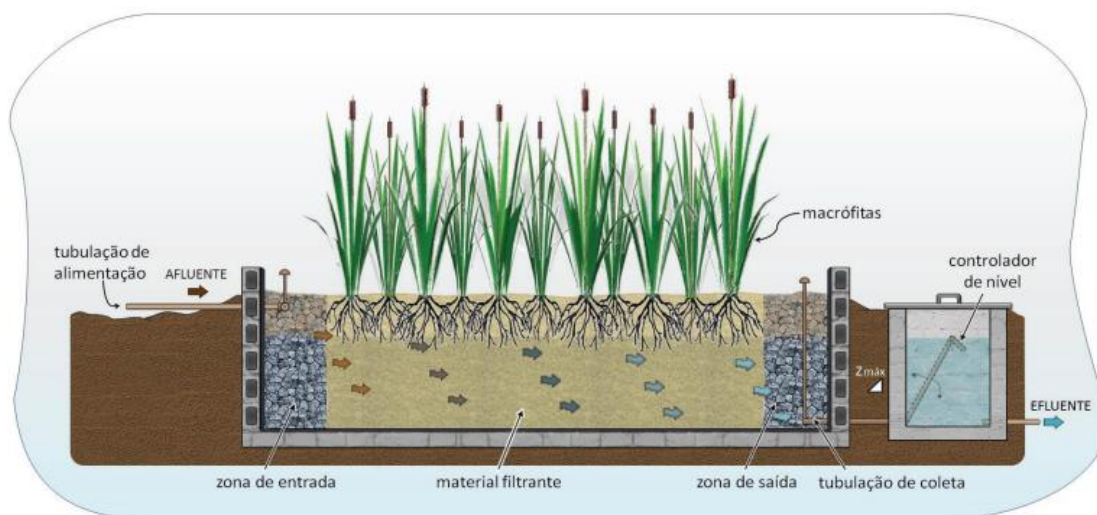
### **3.5.1. Modalidades de Wetland Construído de Escoamento Subsuperficial**

A modalidade mais simplificada é o Wetland Construído Horizontal (WCH), no qual a alimentação do afluente ocorre horizontalmente ao longo do meio suporte e no interior dessa camada filtrante, evitando assim a formação de lâmina d'água acima da superfície. Nesse sistema não há necessidade de bombeamento do efluente, pois a alimentação ocorre de forma contínua por gravidade. Os sistemas WCH (Figura 3) se mostram eficientes no tratamento de

esgotos domésticos, no qual a presença das macrófitas e do meio poroso favorece o desenvolvimento do biofilme microbiano, o qual age na remoção de matéria orgânica. Entretanto, nessa modalidade as remoções de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, são reduzidas (SEZERINO et al., 2018; STEFANAKIS; AKRATOS; TSIHRINTZIS, 2014). Apesar disso, sistemas de tratamento de esgotos domésticos compostos por WC são em sua maioria tanques sépticos seguidos por WCH (MOREIRA; DIAS, 2020).

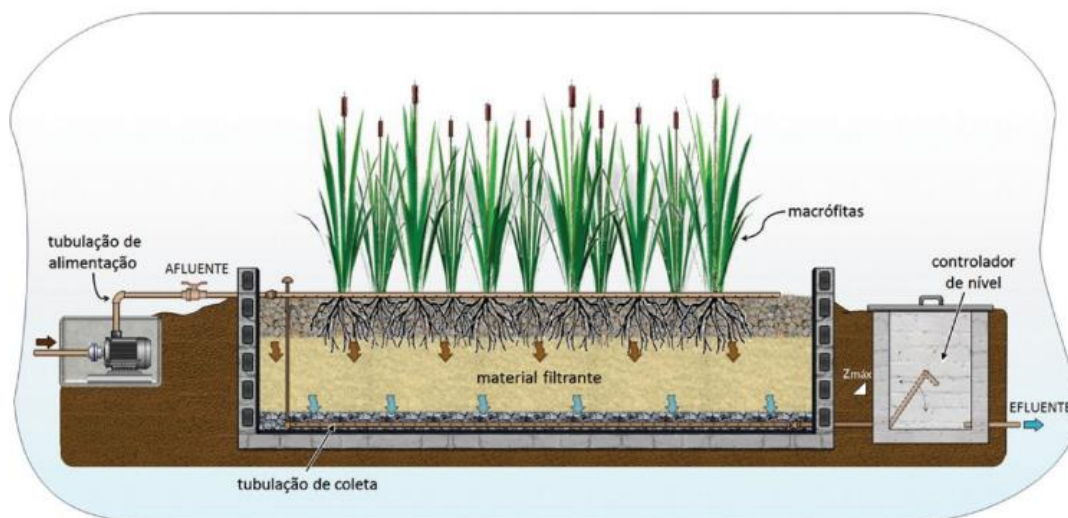
No Wetland Construído Vertical Descendente (WCVD), ilustrado na Figura 4, a aplicação do esgoto ocorre intermitentemente de forma uniforme na superfície, onde percola para o interior do meio filtrante. Tipicamente, esse filtro é preenchido com areia, cascalho e/ou brita e, ao fundo do sistema, o esgoto é recolhido por uma série de dutos. Após a passagem do efluente, os poros do filtro são ocupados naturalmente com ar, facilitando a manutenção de condições aeróbias no meio para os processos oxidativos que ocorrem na nitrificação e também para oxigenação da matéria orgânica (SEZERINO et al., 2018; von SPERLING, 2014). Devido a essa oxigenação, essa modalidade requer uma menor área de superfície quando comparado ao WCH (HERRERA-MELIÁN et al., 2018).

Figura 3 - Representação esquemática do perfil de um WCH.



Fonte: Sezerino et al. (2018).

Figura 4 - Representação esquemática do perfil de um WCVD.



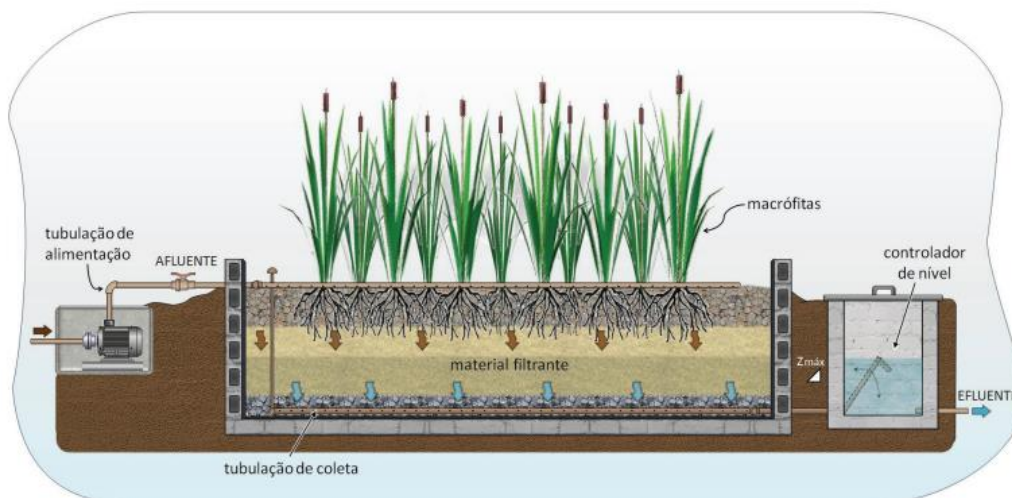
Fonte: Sezerino et al. (2018).

Entretanto, a remoção do nitrogênio total nos WCVD ainda é limitada devido à ausência de condições anóxicas/anaeróbias no meio, necessário para que ocorra a desnitrificação (SAEED; SUN, 2012), motivando a busca por modificações operacionais e de design nos sistemas, de modo a obter uma melhora de performance.

O Wetland Construído Vertical de Fundo Saturado (WCV-FS) possui a mesma dinâmica operacional dos WCVD, com alimentação intermitente do sistema e percolação vertical do esgoto, ocasionando o arraste de oxigênio para o interior do filtro. A particularidade do WCV-FS (Figura 5) consiste na sua modificação hidráulica, através da elevação da tubulação de saída na parte externa – chamado controlador de nível. Com isso, ocorre a saturação do fundo do meio filtrante, criando condições anóxicas/anaeróbias no fundo, permitindo uma maior remoção de matéria orgânica e desnitrificação na unidade (SEZERINO et al., 2018).

Desse modo, sem a necessidade de incremento adicional de energia (como na adição de aeradores) ou área (como para unidades adicionais, como nos sistemas híbridos), em uma única unidade há presença tanto de condições aeróbias mais próximas a superfície, promovendo a oxidação da matéria orgânica e nitrificação, quanto de condições anaeróbias, gerando um efluente com um elevado nível de remoção de poluentes (SEZERINO et al., 2018).

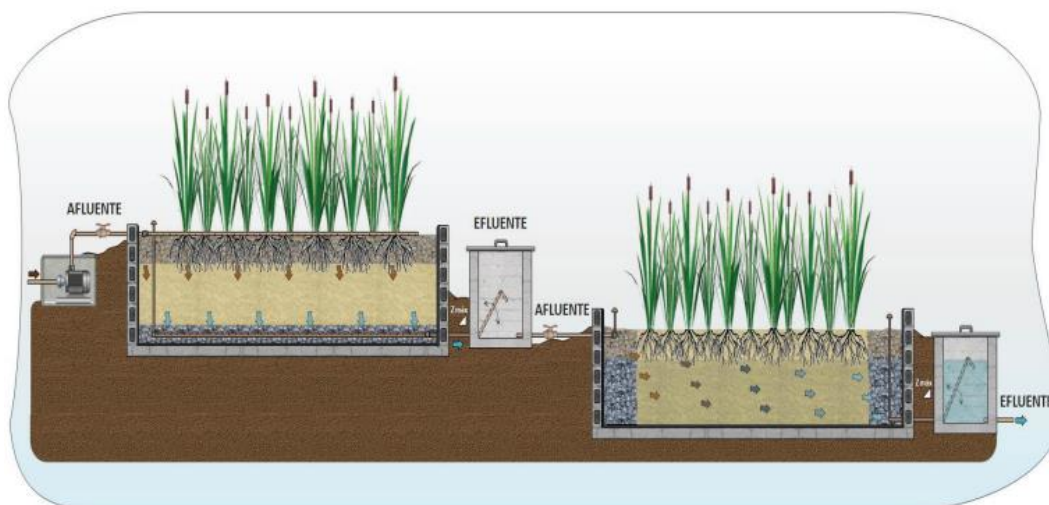
Figura 5 - Representação esquemática do perfil de um WCV-FS.



Fonte: Sezerino et al. (2018).

Os Sistemas Híbridos consistem na associação de duas modalidades de WC em sequência, a fim de otimizar a eficiência do tratamento (Figura 6). A combinação a ser realizada deve estar em observância com os poluentes a serem removidos (VYMAZAL, 2007). WCH tem sido comumente associado a WCVD para um aumento na capacidade de remoção de amônia, devido a sua reduzida capacidade de nitrificação por consequência da reduzida quantidade de oxigênio no meio filtrante (SEZERINO et al., 2018).

Figura 6 - Representação esquemática do perfil de um Sistema Híbrido da associação de um WCVD seguido de WCH.



Fonte: Sezerino et al (2018).

De acordo com Nivala et al. (2019), as taxas de remoção de poluentes aumentam de acordo com a complexidade de design do sistema, onde os sistemas intensificados (aerados ou com recirculação) possuem uma maior eficiência do que o WCVD, o qual, por sua vez, se mostrou mais eficiente do que o WCH. A performance também varia de acordo com diversos fatores, como os elementos escolhidos para compor o sistema (material filtrante, macrófitas e dimensionamento), condições de contorno (taxa de aplicação hidráulica e cargas aplicadas – de sólidos, nitrogenada e orgânica), além das condições climáticas da localidade, que influenciam diretamente em fatores como evapotranspiração e comportamento das macrófitas (SEZERINO et al., 2018).

Na Tabela 2 esquematizam-se as faixas esperadas de desempenho no tratamento de esgotos domésticos em WC de escoamento superficial. Nas modalidades WCH e WCVD discute-se sobre a eficiência global do sistema, empregando tratamento primário (com tanque séptico como tecnologia) e tratamento secundário (com UASB ou RAC como tecnologia) anterior ao wetland (von SPERLING; SEZERINO, 2018) e nas modalidades WCV-FS e SH discute-se sobre eficiência observada em dois anos de monitoramento junto à estação experimental do GESAD/UFSC (SEZERINO et al., 2018).

Tabela 2 - Desempenho de tratamento relacionado às diferentes modalidades de wetlands construídos de escoamento subsuperficial.

Parâmetros	DBO	DQO	SST	NH <sub>4</sub>	NT	PT	PO <sub>4</sub> <sup>3</sup>	C. Termo.
<b>WCH</b>								
Efluente Primário	> 85%	> 80%	> 85%	< 40%	< 50%	< 20%	-	1 a 3 log
Efluente Secundário	> 90%	> 85%	> 90%	< 40%	< 50%	< 20%	-	1 a 3 log
<b>WCVD</b>								
Efluente Primário	> 85%	> 80%	> 85%	> 85%	< 40%	< 20%	-	1 a 2 log
Efluente Secundário	> 90%	> 85%	> 90%	> 90%	< 40%	< 20%	-	1 a 2 log
<b>WCV-FS</b>	91 %	91%	84%	66%	45%	-	83%	-
<b>SH</b>	93%	98%	99%	93%	81%	-	96%	-

Fonte: von Sperling e Sezerino (2018); Sezerino et al. (2018).

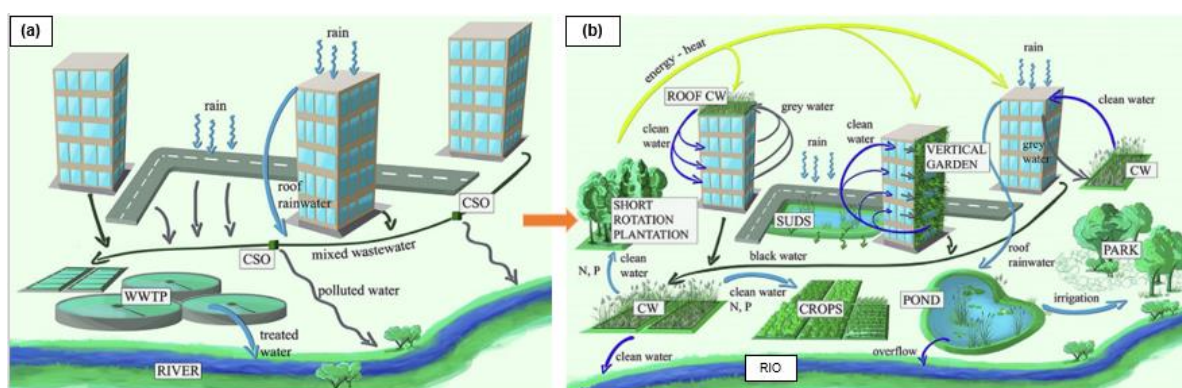
Entretanto, o desempenho não é o único fator a se considerar na tomada de decisão da escolha da tecnologia de tratamento, o fator econômico também é decisivo nesse momento. Ao

comparar os custos de construção (CAPEX) e operação e manutenção (OPEX) entre três modalidades de WC (WCH, WCV e combinados formando um sistema híbrido – SH) com duas tecnologias normatizadas (filtro anaeróbio – FAN e lodo ativado em batelada – LAB) em um cenário atendendo a 150 pessoas, Schroeder et al. (2022) apontam que o menor valor de OPEX foi obtido com o WCH e o maior no LAB. Entretanto, ao avaliar valores de CAPEX, o FAN foi a tecnologia mais econômica, enquanto que o SH a mais dispendiosa.

### 3.5.2. Wetlands Construídos no contexto da Economia Circular

Apesar dos WC serem atualmente uma tecnologia bem aceita no tratamento de águas residuárias, para seu emprego dentro de uma abordagem visando a gestão circular de recursos requer-se adaptações. A partir da inclusão dos preceitos da EC na gestão dos serviços de saneamento nas cidades, o método atual de tratamento de efluentes que visa a eliminação do máximo possível das substâncias contidas, descartando a água tratada com segurança no meio aquático, deve ser substituído pela coleta e processamento inteligentes de todos os recursos, portanto, água, nutrientes e energia, como ilustrado na Figura 7 (MASI; RIZZO; REGELSBERGER, 2018).

Figura 7 - Mudança da gestão “fim de tubo” nos serviços de saneamento para uma abordagem circular com recuperação de recursos (a) e integração das SBN no cenário urbano (b).



Fonte: adaptado de Masi, Rizzo e Regelsberger (2018).

Em estudo realizado por Langergraber et al. (2021), os WCs foram citados dentro de um conjunto de SBN como tecnologia facilitadora para a transição das cidades rumo a circularidade, atendendo a todos os critérios de relevância, quais sejam: (i) construção de



ambientes naturais; (ii) gestão da água urbana; (iii) recuperação de recursos; (iv) agricultura urbana. Os autores apontam a significância da ecotecnologia devido sua capacidade de reter águas pluviais, realizar o tratamento de esgotos e água cinzas, além da possibilidade de reuso da água e recuperação de nutrientes para irrigação.

Além disso, por abranger processos de remediação, tratamento e recuperação de recursos na sua composição, além da sua capacidade de tratamento, detenção, retenção e evapotranspiração de água, os WC são apontados como tecnologia que contribui fortemente às UCC<sub>1</sub> e UCC<sub>2</sub>, desafios para desenvolvimento da circularidade nas cidades que envolvem a gestão dos recursos hídricos (ORAL et al., 2021).

Acerca o reuso para fins de irrigação agrícola, Xan, Lavrnić e Toscano (2020) apontam que a qualidade da água residuária tratada em diversos sistemas compostos por WC implementados na União Europeia atendem às diretrizes estabelecidas, principalmente aos parâmetros físico-químicos (DBO e SST), com melhores resultados nos sistemas híbridos, nos WC aprimorados e na combinação com outras tecnologias, como desinfecção por UV e reatores anaeróbios. Entretanto, em relação aos parâmetros microbiológicos (*Escherichia coli*), há necessidade da adição de uma etapa de desinfecção para atender aos limites estabelecidos.

Sobre a recuperação de nutrientes, Kissler et al. (2020) apontam que os WC são a SBN mais empregada para essa prática, visando o aproveitamento da água recuperada para a fertirrigação de culturas. De modo a atender regulações mais restritas para reuso agrícola, os autores também recomendam que a ecotecnologia seja associada com outras tecnologias, como reatores anaeróbios.

#### 4. METODOLOGIA

Em observância com o grande volume de dados publicados acerca a implantação, operação e performance de sistemas compostos por wetlands construídos no tratamento de águas residuárias, a base metodológica do estudo centrou-se na revisão de literatura. Nesse sentido, o estudo objetiva investigar a inserção da ecotecnologia de wetlands construídos no contexto da economia circular através do reuso da água recuperada.

A pesquisa, portanto, mapeou as principais práticas exercidas mundialmente acerca o aproveitamento do esgoto doméstico ou sanitário tratado em wetlands construídos como fonte não potável de água, visando orientar a prática adequando-se a realidade brasileira. Além disso, foram levantados estudos de caso da aplicabilidade nacional da tecnologia no tratamento secundário de águas residuárias geradas nos contextos urbano ou rural, de modo a compreender a demanda requerida (observando as características do efluente gerado em cada cenário) e a performance de tratamento da ecotecnologia.

Através do compilado e análise dessas informações, buscou-se trabalhar no desenvolvimento de uma matriz para orientar a adoção dos wetlands construídos como unidade de tratamento secundário de esgotos e gerador de água de reuso atendendo aos parâmetros demandados pelas legislações nacionais de referência, considerando a realidade encontrada em cada cenário estudado.

##### 4.1. WETLANDS CONSTRUÍDOS COMO TECNOLOGIA GERADORA DE ÁGUA DE REUSO

A primeira fase da pesquisa consistiu na Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre casos de reuso da água residuária (com característica doméstica ou sanitária) tratados em sistemas compostos por wetlands construídos de escoamento subsuperficial. Segundo Moher et al (2000), a RSL busca reunir todas as evidências empíricas de modo a responder uma questão de pesquisa específica, evidências essas que devem se encaixar em critérios de elegibilidade pré-estabelecidos. Esse tipo de revisão utiliza métodos explícitos e sistemáticos, assim replicáveis, selecionados para minimizar o viés e fornecer resultados confiáveis.

Portanto, essa fase do estudo utilizou como base o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*). O método PRISMA consiste num

*checklist* com 27 itens no levantamento e processamento das informações e um fluxograma de quatro etapas (LIBERATI et al., 2009; GALVÃO; PANSANI; HARRAD, 2015) e é amplamente utilizado na elaboração de revisões sistemáticas na área da saúde.

Entretanto nota-se o emprego de sua forma simplificada em diversos estudos no campo da engenharia, como observado em Bär e Tavares (2017), Koefender (2020) e Lara et al. (2021). Nesse sentido, essa RSL empregou o fluxograma de quatro fases e utilizou os seguintes itens do *checklist*: (a) Elaboração da pergunta norteadora, (b) Seleção de banco de dados, (c) Critérios de inclusão e exclusão, (d) Verificação da qualidade de produção elegíveis – triagem, (e) Análise das produções incluídas e (f) Extração dos dados.

#### **4.1.1. Identificação e seleção preliminar dos dados bibliográficos**

Inicialmente, foi estabelecida a pergunta norteadora de modo a orientar a revisão sistemática, sendo essa: “Quais as principais práticas adotadas atualmente acerca o reuso de águas residuárias tratadas em sistemas compostos por wetlands construídos?”.

Ao empregar o termo “prática”, a pergunta norteadora objetiva a busca de dois tipos de informação:

- (a) Sobre o arranjo tecnológico: no tratamento de esgotos domésticos e sanitários, em qual nível de tratamento os wetlands construídos são mais empregados? Quais as principais modalidades empregadas? Quais outras tecnologias são empregadas para compor o arranjo tecnológico?
- (b) Sobre o reuso da água recuperada: observa-se a adoção da prática de forma mais significativa em cenário urbano ou rural? Quais os principais tipos de reuso empregados em cada cenário?

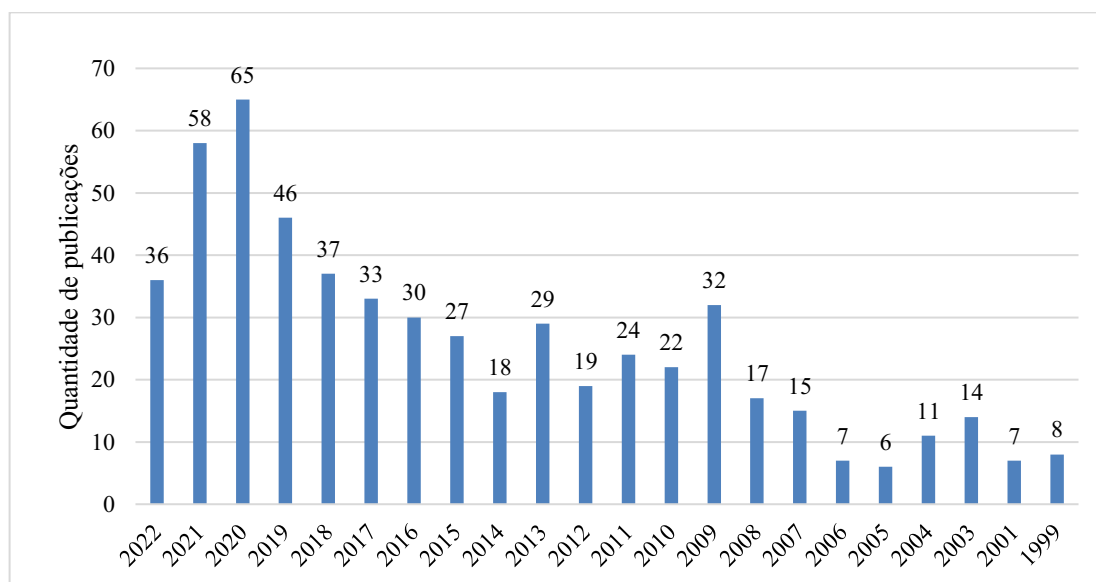
Com isso em vista, a busca foi realizada em inglês, adotando como base de dados as plataformas Web of Science e Scopus, utilizando como *string* de busca as palavras-chave descritas no Quadro 2. Em busca inicial, foram obtidos 1075 resultados ao aplicar o *string* de busca no campo “Todos os tópicos”. De modo a reduzir o volume de resultados, adotou-se a aplicação do *string* de busca nos campos “Título”, “Palavras-chave do autor” e “Resumo”.

Quadro 2 - String de busca para RSL de estudos sobre reuso de efluentes tratados em sistemas compostos por wetlands construídos.

Base de dados	String de busca
Web of Science, Scopus	(“constructed wetland” OR “treatment wetland”) AND (“reuse”) AND NOT (“industrial”)

Na plataforma Web of Science, em busca inicial, foram contabilizados 580 artigos utilizando as palavras-chave. Os países com mais publicações na temática foram Estados Unidos (73), China (72), Itália (69), Índia (41) e Espanha (36). Notadamente, os países que sofrem com a escassez de recursos hídricos. O Brasil ocupou a sétima posição, com um total de 26 publicações científicas na base de dados. Notou-se também que grande parte dos artigos foram publicados após 2009 (com contribuição significativa do ano de 2009), como ilustrado na Figura 8. Portanto, para refinar as publicações, foi realizado a restrição temporal dos artigos publicados após 2009, correspondendo a 491 publicações.

Figura 8 - Quantidade de publicações por ano na plataforma Web of Science em busca inicial.



Fonte: da autora.

Já na plataforma Scopus, com as palavras-chaves a busca contabilizou 602 publicações científicas. Os países com maiores contribuições foram Estados Unidos (77), Itália (76), China (67), Índia (49) e Espanha (42). O Brasil encontrou-se em sexta posição, com uma contribuição

de 32 publicações. Aplicando a mesma restrição temporal adotada na plataforma Web of Science (2009-2022), foram obtidos 500 artigos.

A etapa seguinte consistiu no processo de triagem, de modo a selecionar apenas os artigos que pudessem, potencialmente, contribuir para a pesquisa e para isso foram definidos critérios de inclusão e exclusão. Inicialmente, essa etapa ocorreu através da leitura de título, excluindo artigos que tratassem do tratamento de (i) de efluentes industriais, (ii) de esgoto doméstico, mas com enfoque em metais pesados, xenobióticos e PPCP (produtos farmacêuticos e de cuidado pessoal), (iii) águas pluviais e/ou (iv) lodo. Foram excluídos também artigos que tratavam do reuso de outro elemento que não fosse o efluente tratado, artigos de revisão ou que não tratassem da aplicabilidade de um sistema em escala real composto por wetlands construídos, portanto, pesquisas empíricas de dimensionamento ou propostas de aplicabilidade.

Em seguida, a triagem ocorreu através da leitura dos resumos. Foram utilizados os mesmos critérios de exclusão e inclusão, atentando-se na menção às principais informações relevantes ao estudo: (i) aplicabilidade (contexto rural ou urbano), (ii) arranjo tecnológico empregado e (iii) aplicação real ou potencial de reuso da água recuperada.

Essas etapas ocorreram nas próprias plataformas de busca Web of Science e Scopus, onde a análise dos títulos resultou na seleção de 240 e 184 artigos respectivamente e, após a verificação dos resumos, 159 e 139 seguiram para análise de elegibilidade. De modo a organizar os artigos selecionados para leitura final, esses foram exportados para o gerenciador bibliográfico Mendeley Desktop 1.19.8 ©. Durante essa etapa também foi realizada a eliminação de publicações duplicadas e seleção de publicações de acesso livre, resultando em 185 e 133 artigos científicos, respectivamente.

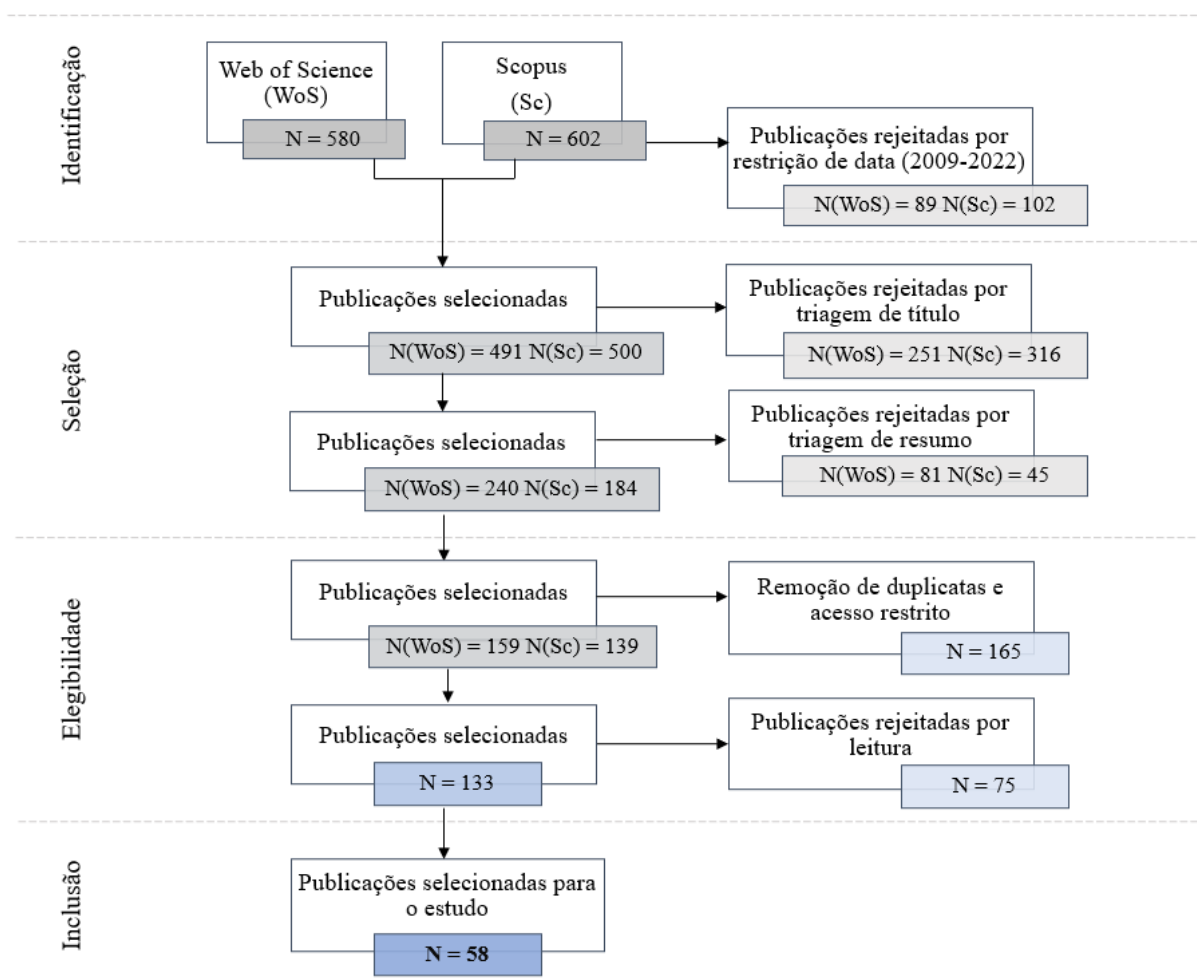
#### **4.1.2. Elegibilidade**

Essa etapa da revisão consistiu da avaliação de conteúdo das publicações científicas, selecionando as que apresentavam informações que poderiam efetivamente contribuir para o desenvolvimento da pesquisa.

A partir disso, foi realizada a leitura da metodologia e dos resultados das publicações, atentando-se a informações sobre configurações, critérios e parâmetros de projeto do sistema, além da performance obtida pelos wetlands construídos no tratamento das águas residuárias de

acordo com o arranjo tecnológico empregado. De mesmo modo, foi analisado o tipo de reuso empregado em cada estudo de caso, se aplicado ou em potencial, aplicação em cenário rural ou urbano, assim como as principais práticas. As publicações que não apresentavam esses resultados foram excluídas, resultando na seleção de 58 artigos. Essas etapas estão ilustradas na Figura 9.

Figura 9 - Visão geral das etapas adotadas no processo de seleção dos artigos da revisão sistemática baseado no método PRISMA.



Fonte: da autora.

#### 4.1.3. Extração de dados

Após as etapas de seleção, 58 publicações científicas compuseram o portfólio de estudos de caso sobre o reuso de águas residuárias tratadas em sistemas compostos por wetlands

construídos e suas informações serviram de base para responder às questões de pesquisa previamente definidas. A organização dessas informações foi realizada em planilhas no programa Microsoft Excel® (versão 2209).

Os artigos selecionados e seus dados bibliográficos constam em um quadro no Apêndice I. Na Tabela 3 apresentam-se os periódicos mais recorrentes na pesquisa e suas respectivas publicações incluídas no estudo.

Tabela 3 - Periódicos mais recorrentes e publicações científicas levantadas pela RSL.

Periódico	Autores	Total de pub.
Ecological Engineering	Gholipour e Stefanakis (2021); Zraunig et al. (2019); Ávila et al. (2013a); Ávila et al. (2013b); Vera e Márquez (2013); Gao e Hu (2012); Travis et al. (2012); Brix et al. (2011).	8
Water (Switzerland)	Licata et al. (2021); Morandi et al. (2021); Seres et al. (2021); Milani et al. (2020); Torrens et al. (2020); De Anda et al. (2018); Zurita e White (2014).	7
Science of the Total Environment	Omidinia-Anarkoli e Shayannejad (2021); Nguyen et al. (2020); Otter et al. (2020); Nivala et al. (2019); Russo et al. (2019).	5
Journal of Environmental Management	Estelrich et al. (2021); Saggai et al. (2017); Abed et al. (2016); Ayaz et al. (2015).	4
Journal of Water Process Engineering	Saúco et al. (2021); Silva et al. (2021); Gonçalves et al. (2021); Rahi et al. (2020).	4

#### 4.2. APLICABILIDADE DE WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS – EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS

A segunda fase da pesquisa ocorreu paralelamente à primeira, já que em ambas foi realizado o levantamento bibliográfico através da revisão de literatura. Nesta, entretanto, optou-se por adotar como método a revisão integrativa da literatura. Assim como a revisão sistemática,

a revisão integrativa é um procedimento que, através para o mapeamento, busca e avaliação crítica de dados, seguindo padrões de rigor metodológico, apresenta-se resultados condizentes com a realidade relevantes a uma questão ou tópico específico (BEYEA; NICOLL, 1998).

O diferencial desse tipo de análise consta na sua flexibilidade quanto aos critérios de análise, permitindo a construção de um levantamento amplo da literatura através da busca e seleção de estudos em variadas bases de dados, permitindo a inclusão simultânea de fontes teóricas, empíricas, acadêmicas e não acadêmicas, pesquisas experimentais e pré-experimentais (BROOME, 2000; WHITTEMORE; KNAFL, 2005). De modo a garantir a qualidade e veracidade dessa revisão integrativa, a metodologia utilizada foi baseada em Tranfield et al. (2003) com algumas adaptações, estruturada em três estágios com seis fases no total, sendo essas:

- Planejamento: (a) preparação do protocolo de revisão;
- Execução: (b) levantamento dos artigos nas bases de dados, (c) seleção dos artigos relevantes para estudo, (d) leitura e avaliação dos artigos, (e) categorização, extração e síntese dos dados;
- Resultados: (e) apresentação dos resultados.

As primeiras duas etapas serão descritas a seguir, enquanto que a última (Resultados) será apresentada na seção de “Resultados e Discussão” do estudo.

#### **4.2.1. Planejamento**

Foi adotado como pergunta norteadora para essa fase da pesquisa a seguinte:

“No cenário nacional, qual a aplicabilidade e performance dos wetlands construídos de escoamento subsuperficial (WC-FSS) no tratamento de esgotos domésticos e/ou sanitários gerados em cenário urbano, periurbano e rural?”

Busca-se, portanto, as seguintes informações:

- a) Sobre a aplicabilidade: nos cenários de estudo, quais modalidades de WC-FSS são mais empregados? Quais outras tecnologias são empregadas para compor o arranjo tecnológico?
- b) Sobre a performance: quais as características do efluente gerado em cada contexto? Qual a eficiência de tratamento da água residuária em cada sistema levantado? O



efluente tratado atende as exigências legais para seu lançamento em corpos d’água ou solo?

A busca adotou como base de dados a plataforma Web of Science e o Portal Brasileiro de Publicações e Dados Científicos em Acesso Aberto (Oasisbr). O Oasisbr permite a busca simultânea em revistas científicas, repositórios institucionais, repositórios temáticos, bibliotecas digitais e outras fontes de informação de natureza científica, tecnológica ou academicamente orientada, garantindo ao usuário o acesso a livros, capítulos de livros, teses, dissertações, artigos e publicações apresentadas em eventos. O portal conta com diversos critérios para coleta de fontes de informação, mas, em síntese, conta como fontes provedoras as revistas científicas que fazem parte da SciELO, teses e dissertações eletrônicas coletadas pela Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações – BDTD, assim como trabalhos de repositórios institucionais (monografias) e de conferências (anais eletrônicos).

Para a seleção das publicações, foram utilizadas as palavras-chave descritas no Quadro 3. Na base de dados Web of Science, a busca foi realizada no item ‘Tópico’ e no portal Oasisbr a busca foi realizada em ‘todos os campos’. Além disso, foram analisados os anais eletrônicos dos últimos sete Congressos Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, sendo o 25º realizado em 2009 e o 31º, a mais recente edição, em 2021. A busca nessas publicações ocorreu de forma manual a partir da leitura de título e resumo para a seleção.

Quadro 3 - String de busca utilizado nas bases de dados.

<b>Base de dados</b>	<b>String de busca</b>
Web of Science	(“constructed wetland” OR “treatment wetland”) (Tópico) AND (“domestic wastewater” OR “sanitary wastewater”) (Tópico) AND NOT (“industrial wastewater”) (Tópico) AND (BRAZIL) (Países/Regiões)
Oasisbr; Anais eletrônicos dos Congressos Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES (Ed. 25º - 31º)	(“wetlands construídos” OR “sistemas alagados construídos” OR “zona de raízes” OR “leito cultivado”) AND “esgoto (doméstico OR sanitário)”

#### 4.2.2. Execução

##### *- Levantamento dos artigos nas bases de dados*

Utilizando o *string* de busca na plataforma Web of Science foram levantados 49 artigos científicos. As instituições de ensino com maiores contribuições foram: Universidade Federal de Viçosa (7), Universidade Federal de Santa Cruz (6), Universidade Federal de Minas Gerais (6), Universidade Federal de Santa Catarina (6) e Universidade Estadual Paulista (5). Não foi realizado restrição temporal nessa busca.

Já na plataforma Oasisbr, a busca não obteve resultados quando utilizadas todas as palavras-chave. Portanto, a busca foi feita em partes através das combinações (“wetlands construídos” AND “esgoto (doméstico OR sanitário)”); “sistemas alagados construídos” AND “esgoto (doméstico OR sanitário)”); “zona de raízes” AND “esgoto (doméstico OR sanitário)”); “leito cultivado” AND “esgoto (doméstico OR sanitário)”), totalizando 397 resultados. Esse tipo de busca claramente resultou em publicações duplicadas, portanto essa etapa ocorreu de forma conjunta com a triagem por título e arquivamento do documento, eliminando assim repetições. Esse processo resultou em 166 documentos, dentre eles: 31 artigos científicos, 72 dissertações, 5 monografias de especialização, 21 teses e 37 trabalhos de conclusão de curso. Além disso, foram eliminados também os artigos já levantados pela busca na plataforma Web of Science, resultando em 159 documentos.

Em relação aos anais de publicações dos Congressos ABES, a busca manual foi realizada diretamente pelos títulos, já que não há uma plataforma de busca para pesquisa por termos e palavras-chave. Essa busca e seleção resultou em 79 trabalhos técnicos. A partir disso, procedeu-se as próximas etapas da pesquisa.

Por fim, através da leitura das edições do Boletim Wetlands Brasil, anais do Simpósio Wetlands Brasil, assim como leitura das publicações levantadas nas bases de dados da pesquisa, tomou-se conhecimento de outros sistemas que não foram encontrados na busca. Desse modo, como procedimento comum da revisão integrativa, foram incluídas na base de dados outras publicações levantadas através de pesquisa direcionada para os sistemas em questão em outras bases, como Google Scholar, totalizando mais 11 publicações.

*- Seleção dos artigos relevantes para estudo*

A etapa seguinte consistiu no processo de triagem, definindo critérios de inclusão e exclusão para selecionar as publicações que condiziam com o objeto da pesquisa. Como a triagem por título ocorreu em conjunto com o levantamento dos documentos (onde já foram aplicados os critérios de exclusão), essa etapa ocorreu através da leitura dos resumos excluindo publicações que reportassem o tratamento de (i) de efluentes industriais, (ii) de esgoto doméstico, mas com enfoque em metais pesados, xenobióticos e PPCP (produtos farmacêuticos e de cuidado pessoal), (iii) águas pluviais e/ou (iv) lodo. Foram excluídos também as publicações que tratavam os wetlands de escoamento superficial e sistemas de bancada, já que o foco da pesquisa são sistemas construídos em escala real.

Além disso analisou-se menção às principais informações relevantes ao estudo: (i) aplicabilidade (cenário rural, periurbano ou urbano), (ii) modalidade de WC-FSS e (iii) eficiências de tratamento. A partir dessa seleção, foram inclusas 153 publicações para a etapa de leitura e avaliação. Para organização desse material e sua posterior categorização, esses foram exportados para o gerenciador bibliográfico Mendeley Desktop 1.19.8 ©.

*- Leitura e avaliação dos artigos*

Para a última avaliação e seleção das publicações, foi realizada a leitura das seções “Metodologia” e “Resultados”, empregando como critérios de inclusão as informações fundamentais:

- a) informações sobre o efluente gerado no cenário (equivalente populacional (E.P.); vazão aplicada; taxa hidráulica aplicada; caracterização físico-química e microbiológica);
- b) arranjo tecnológico empregado;
- c) informações sobre o WC-FSS (modalidade; dimensionamento; tipo de substrato; macrófitas);
- e) eficiência de tratamento ou qualidade final da água residuária, principalmente em relação aos seguintes parâmetros:
  - pH;
  - Demanda Biológica de Oxigênio (DBO);
  - Demanda Química de Oxigênio (DQO);

- Turbidez;
- Sólidos Suspensos Totais (SST);
- Série Nitrogenada (NT, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N);
- Fósforo Total (PT) e Fósforo Ortofosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)
- Coliformes (Termotolerantes ou *E. Coli*).

Após as etapas de seleção, 50 publicações científicas foram selecionadas para compor o portfólio de estudos de caso que mapeiam a aplicabilidade e performance de WC-FSS no tratamento secundário de esgotos domésticos e/ou sanitários, no qual as informações pertinentes foram extraídas e serviram de base para responder às questões de pesquisa previamente definidas.

Os documentos selecionados e seus dados bibliográficos constam em um quadro no Apêndice II. Das publicações selecionadas, 12 foram publicadas em anais de eventos e 11 foram artigos publicados em revistas científicas. Na Tabela 4 apresentam-se as revistas científicas/anais de eventos e suas respectivas publicações incluídas no estudo.

Tabela 4 - Periódicos e publicações científicas levantadas pela revisão integrativa (Continua).

Periódico	Autores	Total de pub.
Anais 27 CBESA	Souza et al. (2013); Locastro et al. (2013); Rosa et al. (2013); Monteiro et al. (2013)	4
Anais 25 CBESA	Pitaluga et al. (2009); Santiago e Calijuri (2009).	2
Anais 28 CBESA	Rosa et al. (2015); Lima et al. (2015).	2
Research Society and Development	Almeida et al. (2020); Souza et al. (2020).	2
10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control	Phillip et al. (2006).	1
Anais 29 CBESA Fenasan 2017	Silva et al. (2017).	1
Anais IV Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação	Leite et al. (2020).	1
Anais XVII Silubesa	Carvalho et al. (2016).	1
ABES Engenharia Sanitária e Ambiental	Decezaró et al. (2021).	1
Ecological Engineering	Lutterback et al. (2018).	1

Tabela 4 - Periódicos e publicações científicas levantadas pela revisão integrativa  
(Continuação).

Periódico	Autores	Total de pub.
Engenharia na Agricultura	dos Santos e Roston (2016).	1
Irriga	Sérvulo et al. (2019).	1
IWA Water Practice & Technology	Sezerino et al. (2012).	1
Revista Acadêmica (Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Impresso)	Schirmer et al. (2020).	1
Revista Agrarian	Batista et al. (2013).	1
Revista GEOMAE	Parolin et al. (2012).	1
Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais – RICA	Sartor et al. (2021).	1

Os demais documentos selecionados foram teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso disponibilizados no repositório institucional de suas respectivas instituições de ensino, totalizando 27 publicações. Na Tabela 5 apresentam-se as instituições de ensino superior mais recorrentes na pesquisa e seus respectivos trabalhos acadêmicos incluídos no estudo.

Tabela 5 - Quantidade de trabalhos acadêmicos das instituições de ensino superior mais recorrentes na revisão integrativa.

Instituição de Ensino	Teses	Dissertações	TCC
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC		6	3
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES	1	2	
Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP		2	

*- Categorização, extração e síntese dos dados*

A organização das informações foi realizada em planilhas no programa Microsoft Excel ® (versão 2209). Para a organização e extração desses dados, os casos foram categorizados em diferentes abas que correspondiam aos diferentes contextos escolhidos como objeto da pesquisa, nos quais o tratamento no lote se apresenta uma solução mais viável do que

a adoção de uma solução centralizadas. Os cenários escolhidos para enquadramento inicial dos estudos de caso foram:

- Sistemas inseridos na zona urbana (U);
- Sistemas inseridos na zona rural (R);
- Sistemas inseridos na zona periurbana para atendimento de “bairros-cidades”, com E.P. acima de 1000 pessoas (B).

O IBGE considera como zonas urbanas as áreas que apresentam grande concentração de estruturas, edificações, domicílios e equipamentos urbanos, como pavimentações e redes elétricas e sanitárias. Nas áreas urbanizadas predominam as superfícies artificiais não agropecuárias e apresentam uma maior densidade demográfica. Já área rural é considerada aquela externa ao perímetro urbano, que corresponda a alguns setores censitários, tais quais aglomerações próximas do urbano, aglomerações isoladas adensadas ou menos adensadas, além de zonas sem aglomerações, portanto domicílios dispersos. Esses diferentes setores compreendem diferentes realidades, o que influencia na escolha de soluções empregadas para o esgotamento sanitário, tais como a predominância de fossas sépticas na região Sul, redes de esgoto no Sudeste e fossas rudimentares nas demais regiões quando analisados as aglomerações próximas da área urbana, em contraste com a forte predominância de fossas rudimentares em todas as regiões quando avaliadas aglomerações menos adensadas isoladas e domicílios dispersos. Notadamente, as áreas periurbanas são as zonas de transição entre espaços estritamente rurais e áreas urbanas (IBGE, 2011; BRASIL, 2019).

Além disso, dentro dos dois primeiros cenários (zona urbana e zona rural), foram selecionados sistemas descentralizados de pequena escala e de escala transitória (TONETTI et al., 2018), sendo categorizados em:

- Residencial unifamiliar (E.P. < 8 pessoas);
- Residencial multifamiliar (E.P. < 1000 pessoas);
- Sistemas semicoletivos ou aglomerados locais (conjunto de estabelecimentos, prédios comerciais, escolas).

Para o terceiro cenário (“bairros-cidade”) não houve esse tipo de categorização devido ao atendimento de um equivalente populacional superior aos demais. Estes diferentes contextos estão ilustrados nas Figuras 10, 11, 12 e 13.

Figura 10 - WCV-FS como tratamento secundário de esgoto doméstico gerado em loteamento multifamiliar localizado em Palhoça/SC.



Fonte: da autora.

Figura 11 - WCV como tratamento secundário de esgoto sanitário gerado em prédio comercial localizado em Florianópolis/SC.



Fonte: da autora.

Figura 12 - WCV como tratamento secundário de esgoto sanitário de bacias de escoamento de duas zonas da cidade, ou “bairro-cidade”, localizado em Meleiro/SC.



Fonte: da autora.

Figura 13 - WCH como tratamento secundário de esgoto sanitário gerado em pousada rural localizada em Tubarão/SC.

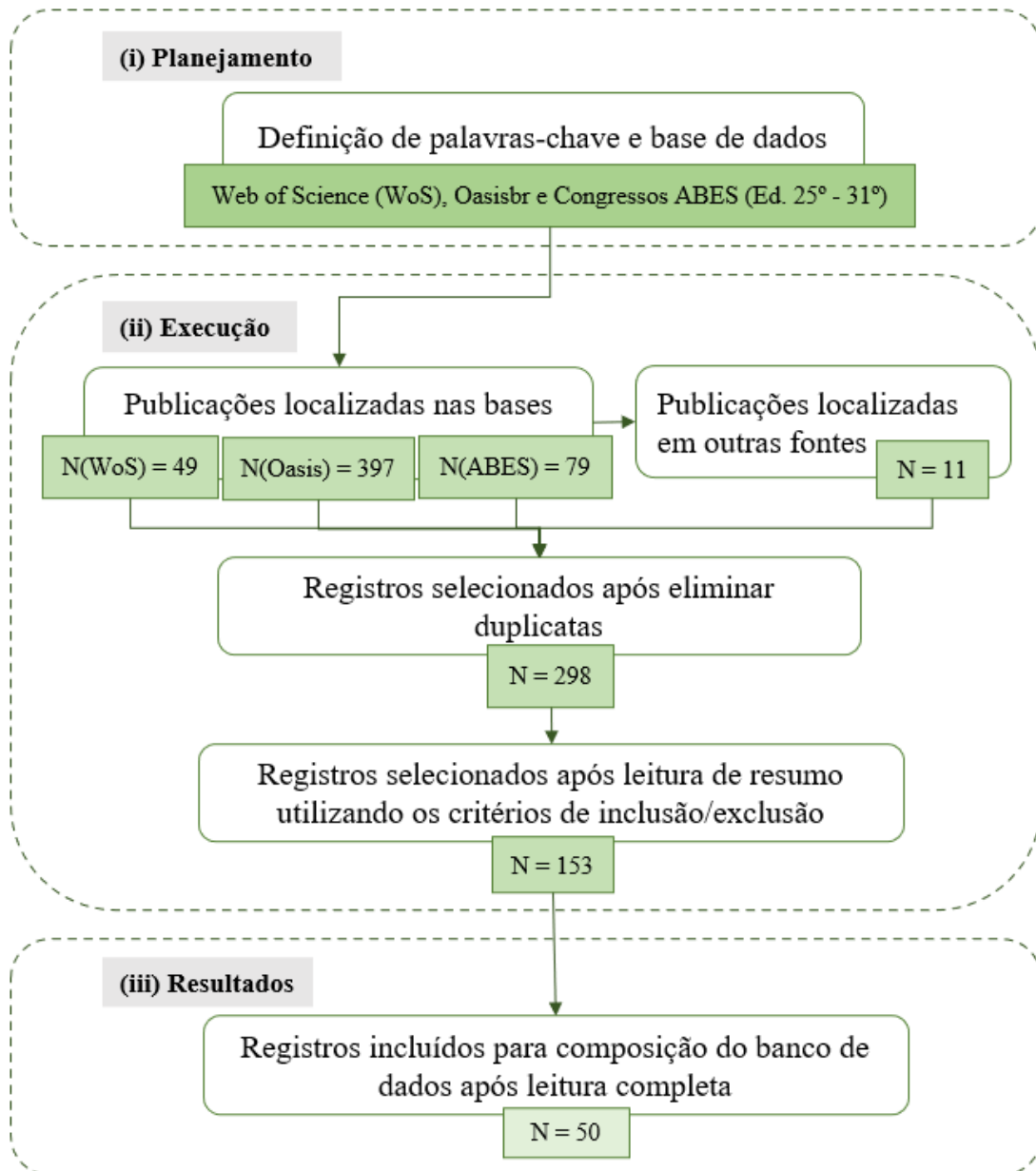


Fonte: Acervo GESAD.



Sendo assim, todas as etapas e quantidade de publicações levantadas, selecionados e incluídas para essa etapa da pesquisa, assim como sua categorização, estão ilustradas na Figura 14.

Figura 14 - Visão geral da abordagem metodológica adaptada de Tranfield et al. (2003) adotada no processo de seleção dos artigos da revisão integrativa.



Fonte: da autora.

### 4.2.3. Visitas técnicas

Além do levantamento bibliográfico, foram realizadas visitas técnicas em sistemas implantados em escala real, para compreender o contexto e a realidade espacial de diferentes sistemas. Desse modo, observou-se em campo a viabilidade da adoção da prática do reuso em sistemas descentralizados de tratamento de esgotos domésticos e/ou sanitários.

## 4.3. INTERPRETAÇÃO DAS INFORMAÇÕES LEVANTADAS

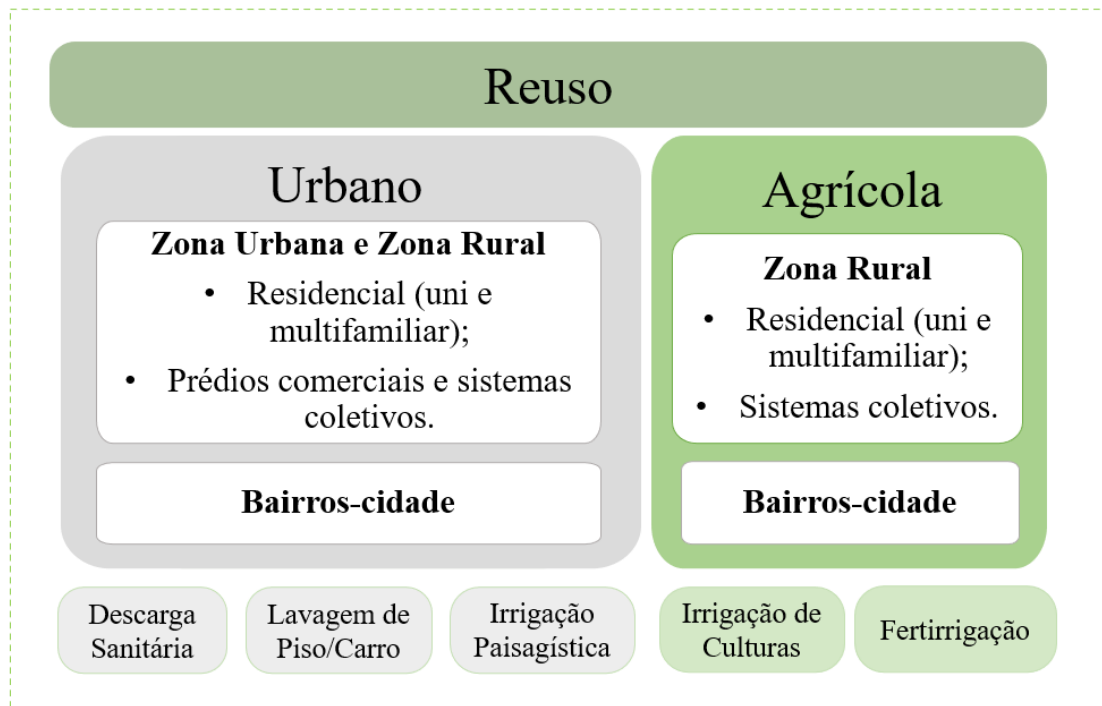
Após o compilado e ordenamento de dados obtidos a partir do levantamento bibliográfico, elaborou-se gráficos, tabelas e figuras relacionadas à interpretação das informações levantadas. Em relação aos estudos de caso com reuso da água recuperada, foi elaborado um quadro conceitual elencando as principais práticas observadas nos estudos de caso com reuso do efluente tratado em sistemas com Wetlands construídos, de modo a orientar a prática no Brasil.

Já em relação as experiências brasileiras, inicialmente avaliou-se se os sistemas atenderam os padrões exigidos pelo órgão ambiental para sua destinação ambientalmente adequada. Além disso, foram analisados o desempenho obtido em cada cenário, com as diferentes características de projeto em WC-FSS e as variáveis operacionais.

A pesquisa seguiu para a avaliação da adequação da qualidade da água recuperada obtida no tratamento nas diferentes modalidades de WC-FSS e nos diferentes contextos, quanto aos parâmetros recomendados para reuso pelas legislações nacionais. Nesse sentido, observando as diferentes classificações apresentadas pelos documentos de referência, os usos foram definidos para dois fins de acordo com os contextos nos quais estão inseridos, para tanto, reuso urbano ou reuso rural.

O reuso urbano foi considerado em todos os cenários, englobando usos para fins domésticos, como para uso em descargas de bacias sanitárias, lavagem de pisos, rega de jardins e para usos para fins urbanos, como lavagem de logradouros e irrigação paisagística. Já o reuso agrícola foi direcionado para os sistemas localizados em cenário rural ou nos bairros-cidade, por sua instalação em zonas periurbanas comumente próximas a cultivos agrícolas, direcionando o aproveitamento da água de reuso para irrigação e fertirrigação de culturas. Essas potencialidades de reuso da água recuperada estão esquematizados na Figura 15.

Figura 15 - Representação de afinidade sobre as potencialidades de reuso da água recuperada nos diferentes contextos.

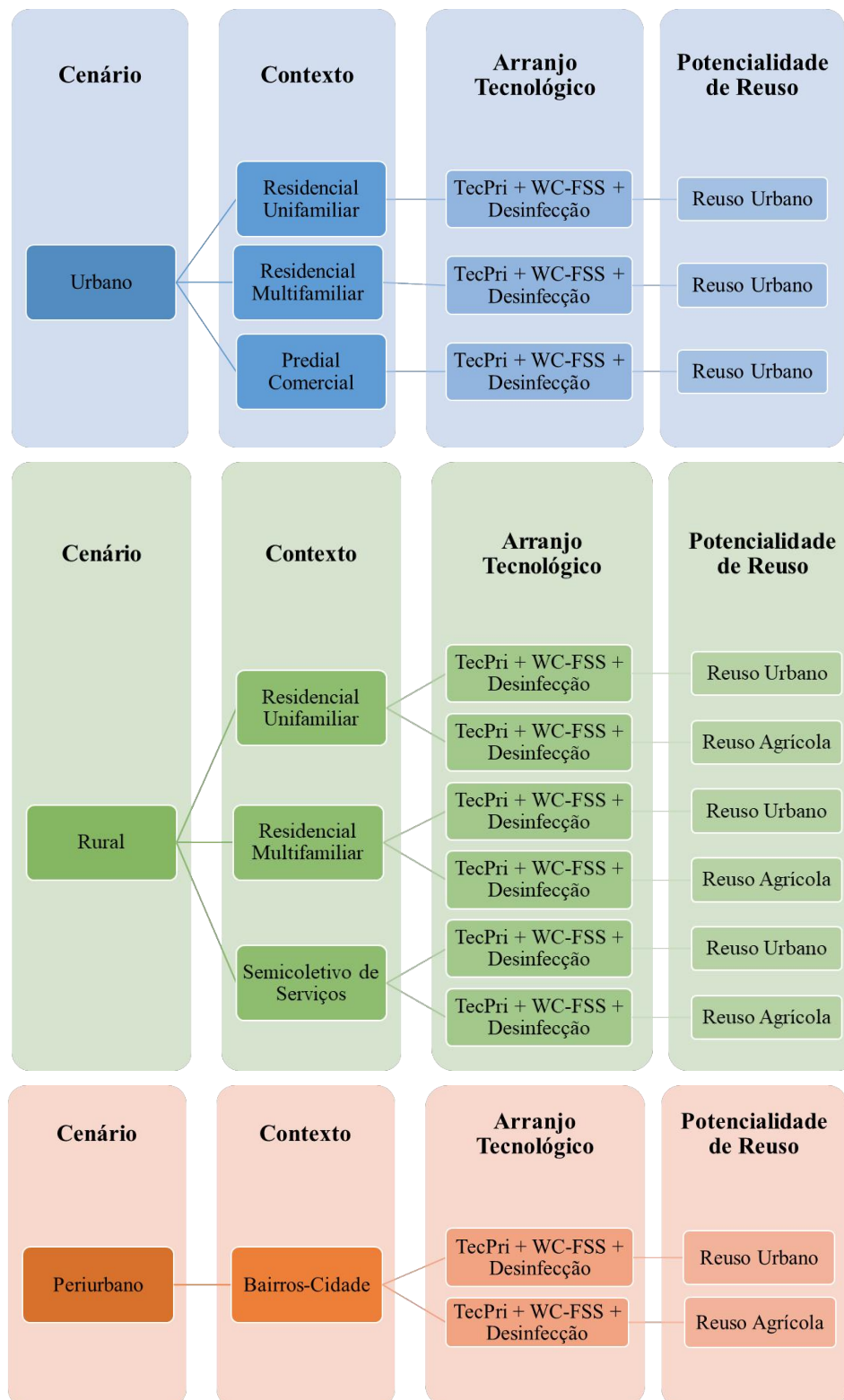


Fonte: da autora.

#### 4.4. POTENCIALIDADE DE REUSO DA ÁGUA RECUPERADA NOS DIFERENTES CONTEXTOS

Por fim, foi elaborado uma matriz com recomendações para aplicabilidade do WC como gerador de água de reuso em observância com a realidade brasileira. Para isso, utilizou-se como base as informações levantados pelas revisões literatura, guiando-se de acordo com a qualidade dos esgotos gerados dos diferentes contextos e com as eficiências de remoção de poluentes obtidas pelas diferentes modalidades de wetlands construídos de escoamento subsuperficial inseridos nos arranjos tecnológicos, além do compilado de informações levantadas sobre os estudos de caso onde já é realizado o aproveitamento do efluente tratado como água de reuso no cenário internacional, de modo a orientar a prática. Essa matriz considera a tecnologia primária (TecPri), modalidade de WC-FSS e etapa de desinfecção mais adequados para cada contexto, de acordo com o tipo de reuso e cenário aplicado, conforme destacado na Figura 16.

Figura 16 - Representação dos diferentes contextos no quais o tratamento de esgoto dá-se por meio de WC e seus respectivos potenciais para reuso do efluente tratado.



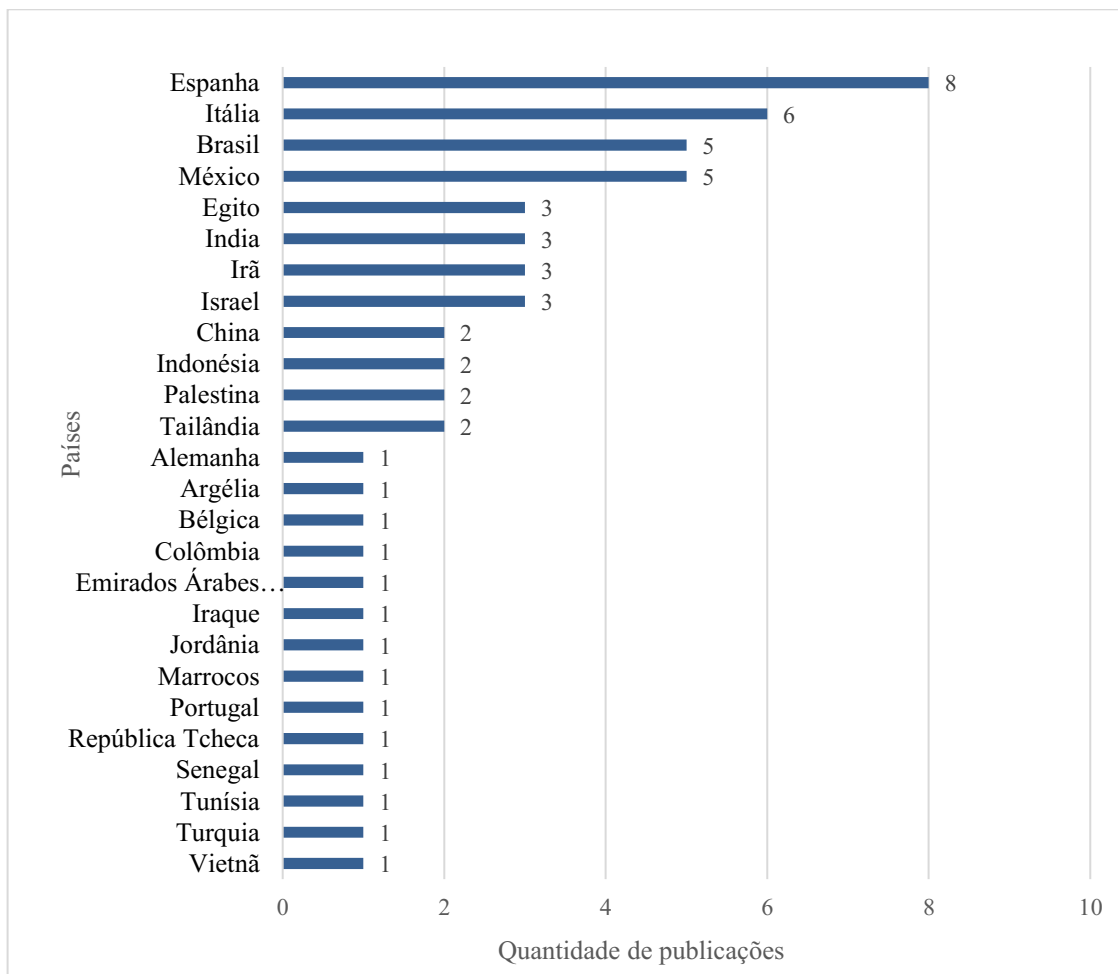
Fonte: da autora.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. INVENTÁRIO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS COMO TECNOLOGIA GERADORA DE ÁGUA DE REUSO

As 58 publicações selecionadas para compor o banco de dados de estudos referente ao reúso da água recuperada em sistemas compostos por wetlands construídos distribuem-se entre 26 países, com produções em maior quantidade na Espanha (8), Itália (6), Brasil (5) e México (5), como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Relação de países e quantidade de publicações levantadas na Revisão Sistemática da Literatura (RSL).



Fonte: da autora.

No total, 72 sistemas foram contabilizados entre as publicações selecionadas, sendo apenas 18 localizados em cenário urbano, para o tratamento de águas residuárias geradas em restaurante (LAKHO et al., 2021), campus universitários (ZÚÑIGA et al., 2016; GHOLIPOUR e STEFANAKIS, 2021; GONÇALVES et al., 2021), hotéis (ZRAUNIG et al., 2019; ESTELRICH et al., 2021), residências unifamiliares (QOMARIYA et al., 2018) e multifamiliares (MORANDI et al., 2017; AYAZ et al., 2015), entre outros estabelecimentos. Dados gerais sobre esses sistemas estão discorridos na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados gerais sobre sistemas de tratamento de águas residuárias em cenário urbano.

Cenário Urbano								
WC-FSS	Núm. Sistema	Escala	País	Efluente (origem)	E.P.	TAH (mm/d)	Q (m <sup>3</sup> /d)	Referência
<b>WCH</b>	1	Real	Indonésia	doméstico	-	-	-	Qomariya et al. (2018)
	2	Real	México	doméstico	4	24	0,1	Zúñiga et al. (2016)
	3	Mesocosmo	Egito	universitário	-	154	0,15	Ezzat e Moustafa (2021)
	4	Piloto	México	comercial	150	22	7,5	De Anda et al. (2018)
	5	-	Marrocos	doméstico	150	96	1,2	Laaffat et al. (2019)
	6	Piloto	México	doméstico	178	-	-	Herrera-López et al. (2021)
	7	Piloto	Espanha	hotelaria	-	100	0,75	Zraunig et al. (2019)
	8	Piloto	Espanha	hotelaria	-	278	2	Estelrich et al. (2021)
<b>WCV</b>	9	Laboratório	Índia	doméstico	-	137	0,04	Pillai e Vijayan (2012)
	10	-	Brasil	universitário	16	600		Gonçalves (2021)
	11	Piloto	Israel	doméstico	-		0,3	Sklarz et al. (2009)
	12a	Real	Alemanha	doméstico	-	18,2	18,2	Morandi et al. (2021)
	12b	Real	Alemanha	doméstico	-	18,2	18,2	
	13	Piloto	Bélgica	comercial	135	65	13,5	Lakho et al. (2021)
<b>SH</b> (WCH - WCV)	14	Piloto	Turquia	doméstico	30	139 <sup>1</sup> 182 <sup>2</sup>	2,5	Ayaz et al. (2015)
	15	Piloto	Irã	sanitário de ETE	-	53	-	Haghshenas-Adarmanabadi et al. (2016)
	16	Piloto	Índia	doméstico	-	172 <sup>1</sup> 357 <sup>2</sup>	0,25	Thalla et al. (2019)
(WCV-FS - WCH)	17	Piloto	Irã	doméstico	200	200 <sup>1</sup> 80 <sup>2</sup>	20	Gholipour e Stefanakis (2021)

Legenda: WC-FSS = Wetland construído de fluxo subsuperficial; E.P. = equivalente populacional; TAH = Taxa de Aplicação Hidráulica; Q = vazão aplicada; WCH = Wetland construído de fluxo horizontal; WCV = Wetland construído de fluxo vertical; SH = Sistema híbrido; WCV-FS = Wetland construído de fluxo vertical com fundo saturado; <sup>1</sup> = TAH no primeiro módulo; <sup>2</sup> = TAH no segundo módulo.

Entre os sistemas, 08 optaram pelo emprego de WCH, 06 sistemas pelo uso de WCV e apenas 04 sistemas adotaram sistemas híbridos (SH), sendo 03 associando módulos de WCH e de WCV, e 01 sistema utilizando um módulo de WCV-FS seguido por um WCH. As vazões de afluente variaram entre 0,1 e 7,5 m<sup>3</sup>/dia em WCH, 0,04 e 18,2 m<sup>3</sup>/dia em WCV e 0,25 e 20 m<sup>3</sup>/dia nos SH.

Já as Taxas de Aplicação Hidráulica (TAH) variaram entre 18,2 e 600 mm/dia nos sistemas de módulo único, enquanto que nos SH diferentes TAH foram aplicadas entre os módulos nos sistemas nº 14, 16 e 17, e um TAH global de 53 mm/dia no sistema nº 15 (conforme enumerado na Tabela 6). Em relação ao uso de WCV, Platzer (1999) recomenda uma TAH de 100 a 120 mm/dia em regiões de clima frio e um limite de 250 mm/dia para regiões de clima quente, sendo esse valor excedido no sistema nº 10 (Tabela 6) com 600 mm/dia. Os autores justificam essa TAH elevada devido a reduzida carga orgânica aplicada no sistema, com um valor máximo de 24,6 g DBO/m<sup>2</sup>.dia, o qual se mostra dentro da faixa recomendada para uso de WCV na América Latina – entre 15 e 32 g DBO/m<sup>2</sup>.dia (GONÇALVES et al., 2021). Já Hoffman et al. (2011) apontam valores de TAH entre 60 e 80 mm/dia adequados para WCH em regiões de clima quente, como na América Latina. Apesar dos sistemas nº 3 e 8 (Tabela 6) operarem com valores bem mais elevados, os autores apontaram estabilidade na performance de ambos (EZZAT; MOUSTAFA, 2021; ESTELRICH et al., 2021).

Dentre os WCH, o módulo com a maior área superficial (336m<sup>2</sup>) foi observada no sistema nº 4 (Tabela 6), para o tratamento de esgoto doméstico de alta carga gerado em uma instituição de pesquisa em alimentos no México, cujo WCH é precedido pela associação de tanque séptico e filtro anaeróbio, além de contar com uma etapa de desinfecção a sua jusante (DE ANDA et al., 2018). Já o sistema nº 13 (Tabela 6) estudado por Lakho et al. (2021) apresentou a maior área superficial dentre os WCV com 60m<sup>2</sup>, cujo arranjo tecnológico é precedido por um tanque séptico, além de contar posteriormente com dez etapas (entre microfiltros, filtro de carvão ativado e osmose reversa) para produção de água potável a partir do efluente tratado no WCV. Por fim, o sistema nº 17 (Tabela 6) apresentou a maior área superficial dentre todos os sistemas estudados em cenário urbano, com um módulo de WCV-FS de 200m<sup>2</sup> seguido por um WCH de 250m<sup>2</sup>, o qual seguiu o valor recomendado de 1,25m<sup>2</sup>/P.E. de Akrotos e Tsihrintzis (2007), para o tratamento de esgoto gerado em campus universitário (GHOLIPOUR e STEFANAKIS, 2021).

Acerca os estudos inseridos em cenário rural, é notável sua predominância dentre as publicações levantadas com um total de 55 sistemas, os quais se encontram descritos na Tabela 7. Foram contabilizados 29 sistemas empregando o WCH no tratamento das águas residuárias, 12 sistemas utilizando WCV, dentre os quais algumas particularidades, como no sistema nº 47 (Tabela 7) com a aplicação de um módulo de WCV-SF seguido de um WCV operando com recirculação do efluente tratado, e no sistema nº 48 (Tabela 7) com um módulo de WCFL após o WCV. Por fim, 14 sistemas optaram pelos SH, com diversos tipos de configurações.

Tabela 7 - Dados gerais sobre sistemas de tratamento de águas residuárias em cenário rural.

(Continua).

Cenário Rural								
WC-FSS	Núm. Sistema	Escala	País	Efluente (origem)	E.P.	TAH (mm/d)	Q (m³/d)	Referência
WCH	18	Piloto	Itália	doméstico	-	146	0,1	Collivignarelli et al. (2020)
	19	-	Indonésia	doméstico	-	-	-	Qomariyah et al. (2016)
	20	Piloto	Espanha	doméstico	-	26	0,2	Andreo-Martínez et al. (2017)
	21	-	Brasil	doméstico	-	-	-	Quartaroli et al. (2018)
	22	Piloto	Argélia	doméstico	-	38	15	Saggaï et al. (2017)
	23a	-	Itália	sanitário de ETE	-	-	860	Licciardello et al. (2018)
	23b	-	-	sanitário de ETE	-	-	860	-
	24	Piloto	Egito	sanitário	-	69	-	El-Khateeb et al. (2009)
	25a	Microcosmo	Palestina	doméstico	47	308	0,1	Abed et al. (2016)
	25b	Microcosmo	Palestina	sanitário de ETE	50000	308	0,1	-
	25c	Microcosmo	Palestina	doméstico	10000	308	0,1	-
	26	Real	China	doméstico	-	-	350	Gao e Hu (2012)
	27	Piloto	Portugal	doméstico	-	34	0,04	Pinho e Mateus (2021)
	28	-	México	sanitário de ETE	-	69	0,2	Zurita e White (2014)
	29	-	Índia	doméstico	-	-	-	Mishra et al (2018)
	30	Piloto	Colômbia	doméstico	-	80	-	Casierra-Martínez et al. (2016)
	31	Real	Israel	sanitário	-	-	175	Tencer et al. (2009)
	32	-	Brasil	-	-	-	0,1	Silva et al. (2020)
	33a	-	China	doméstico	5 casas	250	121	Li et al. (2021)
	33b	-	-	-	-	250	121 L/cap.d	-
	33c	-	-	-	-	250	121 L/cap.d	-
	34a	-	Tailândia	hoteleiro	-	-	-	Liamlaem et al. (2019)



Tabela 7 - Dados gerais sobre sistemas de tratamento de águas residuárias em cenário rural.  
(Continuação).

Cenário Rural									
WC-FSS	Núm. Sistema	Escala	País	Efluente (origem)	E.P.	TAH (mm/d)	Q (m <sup>3</sup> /d)	Referência	
WCH	34b			hoteleiro	-	-	-		
	34c			hoteleiro	-	-	-		
	35	Piloto	Itália	sanitário	-	60	3	Licata et al. (2021)	
	36	Real	Tunísia	sanitário	-	-	520	Ergaieg e Miled (2021)	
	37a	Piloto	Itália	sanitário de ETE	-	30	3	Licata et al. (2019)	
	37b	Piloto		sanitário de ETE	-	60	6		
	38	-	Itália	sanitário	-	120	240	Russo et al. (2019)	
	WCV	39	Piloto	Iraque	sanitário	-	107	90L/cap	Rahi et al. (2020)
40		-	Palestina	doméstico	40	222	4	Afifi et al. (2015)	
41		Real	Emirados Árabes Unidos	doméstico	-	-	25	Paleologos et al. (2019)	
42		Piloto	México	doméstico	-	-	-	Muñoz-Nava e Baumann (2017)	
43a		-	Espanha	sanitário de ETE	-	80	4	Otter et al. (2020)	
43b				sanitário de ETE	-	-	-		
44		Piloto	Brasil	doméstico	-	200	38,4	Santos et al. (2020)	
45		Demo	Espanha	sanitário de ETE	150	120	24	Sáuco et al. (2021)	
46a		Real	Jordânia	sanitário de ETE	25	108	2,2	Nivala et al. (2019)	
46b					40		3,2		
(WCV-SF – WCVr)		47	-	Israel	doméstico + produção de queijo	7	87	2,6	Travis et al. (2012)
(WCV – WCFL)		48	Piloto	Vietnã	doméstico	-	60	-	Nguyen et al. (2020)
SH (WCH – WCV)	15	Piloto	Irã	sanitário de ETE	-	53	-	Haghshenas-Adarmanabadi et al. (2016)	
	49	Piloto	Egito	doméstico	-	37 <sup>1</sup> 44 <sup>2</sup>	0,4	Abdel-Shafy et al. (2017)	
	50a	Piloto	Irã	sanitário de ETE	-	135 <sup>1</sup> 538 <sup>2</sup>	-	Omidinia-Anarkoli e Shayannejad (2021)	
	50b				-	95 <sup>1</sup> 38 <sup>2</sup>	-		
	28b	Piloto	México	doméstico	-	145	0,2	Zurita e White (2014)	
	(WCV – WCH)	28c				-	68	0,2	
(WCV – WCFL – WCH)	51	Real	Brasil	doméstico	-	381	-	Silva et al. (2021)	
(WCH – WCV – WCV-FS)	52	Real	República Tcheca	doméstico	150	100 <sup>1</sup> 185 <sup>2</sup> 171 <sup>3</sup>	16,5	Seres et al. (2021)	
(WCV – WCH – WCFL)	53	Piloto	Itália	vinhedo	-	21	3	Milani et al. (2020)	
	54	Real	Tailândia	sanitário			400	Brix et al. (2011)	
	55	Piloto	Espanha	sanitário	-		0,2	Ávila et al. (2013b)	
	56	Experimental	Espanha	sanitário	-		14	Ávila et al. (2013a)	

Tabela 7 - Dados gerais sobre sistemas de tratamento de águas residuárias em cenário rural.  
(Continuação).

Cenário Rural								
WC-FSS	Núm. Sistema	Escala	País	Efluente (origem)	E.P.	TAH (mm/d)	Q (m <sup>3</sup> /d)	Referência
(WCV-SF – WCH)	57	Piloto	Espanha	doméstico	100		12,5	Vera e Márquez (2013)
(WCV-FS – WCV – WCH)	58	Piloto	Senegal	sanitário	50	180	5	Torrens et al. (2020)

Legenda: WC-FSS = Wetland construído de fluxo subsuperficial; E.P. = equivalente populacional; TAH = Taxa de Aplicação Hidráulica; Q = vazão aplicada; WCH = Wetland construído de fluxo horizontal; WCV = Wetland construído de fluxo vertical; WCV-SF = Wetland construído de fluxo vertical em sistema francês; WCVr = Wetland construído de fluxo vertical com recirculação; WCFL = Wetland construído de fluxo livre; SH = Sistema híbrido; WCV-FS = Wetland construído de fluxo vertical com fundo saturado; <sup>1</sup> = TAH no primeiro módulo; <sup>2</sup> = TAH no segundo módulo; <sup>3</sup> = TAH no terceiro módulo.

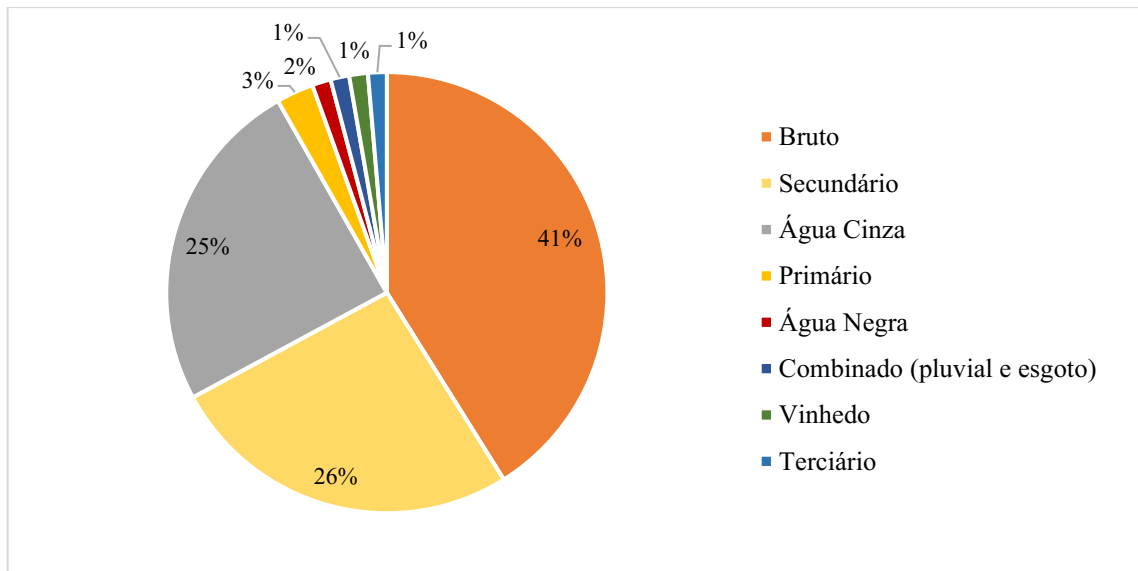
As vazões de efluente variaram entre 0,1 e 860 m<sup>3</sup>/dia nos WCH, 2,6 e 38,4 m<sup>3</sup>/dia nos WCV e 0,2 e 400 m<sup>3</sup>/dia nos SH. As maiores áreas superficiais, equivalentes a 2000 m<sup>2</sup>, foram observadas em dois sistemas: no sistema n° 23 (Tabela 7), WCH seguido por dois diferentes conjuntos de etapas de pós-tratamento para refinar o efluente sanitário de ETE municipal tratado a nível secundário com uma vazão de 860 m<sup>3</sup>/dia; e no sistema n° 38 (Tabela 7), também um WCH projetado para tratamento de efluente secundário de ETE a uma vazão de 240 m<sup>3</sup>/dia, seguido por uma lagoa de maturação. Além disso, cabe citar o famoso sistema "flower e butterfly" na ilha turística de Koh Phi Phi, na Tailândia, um SH composto por uma sequência de 3 WCV que ocupam 2300 m<sup>2</sup>, 3 WCH ocupando 750 m<sup>2</sup> e 3 WCFL com uma área total de 750 m<sup>2</sup>, distribuídos em formato de flor e borboleta, agregando valor estético ao sistema construído – nesse estudo, sistema n° 54 (Tabela 7) (BRIX et al., 2011).

Os valores de TAH variaram entre 30 e 308 mm/dia nos WCH, 60 e 222 mm/dia nos WCV e 37 e 538 mm/dia entre os diferentes módulos dos SH. Assim como observado em cenário urbano, diversos sistemas operaram com valores considerados superiores ao recomendado pela literatura (PLATZER, 1999; HOFFMAN et al., 2011) principalmente sistemas n° 25 e n° 33 (Tabela 7), com WCH operando a 308 mm/dia e 250 mm/dia, respectivamente, e sistema n° 50a (Tabela 7), um SH com seu segundo módulo de WCV operando a 538 mm/dia.

Em relação ao tipo de água residuária tratada nos sistemas em estudo (tanto em cenário urbano como rural), 41% dos arranjos receberam efluente bruto, com algum tipo de tratamento preliminar como caixa de areia, caixa de gordura e gradeamento, ou não. Nesse cenário, 4 sistemas utilizaram os WC-FSS como unidade tecnológica para tratamento primário e secundário (sistemas n° 28, 30, 39, 48) (Tabela 7), 2 para tratamento terciário (sistemas n° 2 e

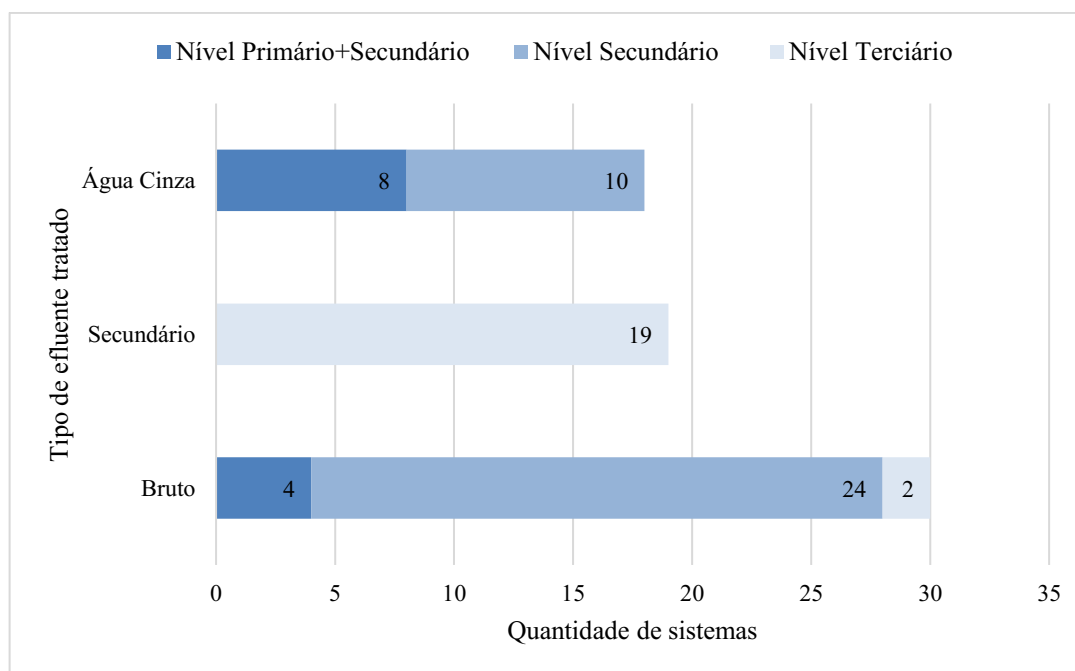
31) (Tabela 7) e a maioria para tratamento secundário – 24 sistemas, entre eles nº 3, 13, 14, 17, 21 e 34a (Tabela 7) Já 26% dos arranjos realizaram o tratamento de efluentes secundários, admitindo os WC-FSS como unidade de tratamento terciário, como nos sistemas nº 15, 16, 35, 42 e 50 (Tabela 7). O tratamento de água cinza foi realizado em 25% dos sistemas, no qual a ecotecnologia foi utilizada a nível primário em 8 sistemas e a nível secundário em 10 sistemas. Todas essas informações estão ilustradas nas Figuras 18 e 19. Outros tipos de águas residuárias também foram empregadas para tratamento nos sistemas, como esgoto primário (2), água negra (1), esgoto terciário (1), esgoto combinado de rede pluvial e de esgoto (1) e esgoto gerado em vinhedo (1).

Figura 18 - Tipos de águas residuárias tratadas nos sistemas wetlands inventariados.



Fonte: da autora.

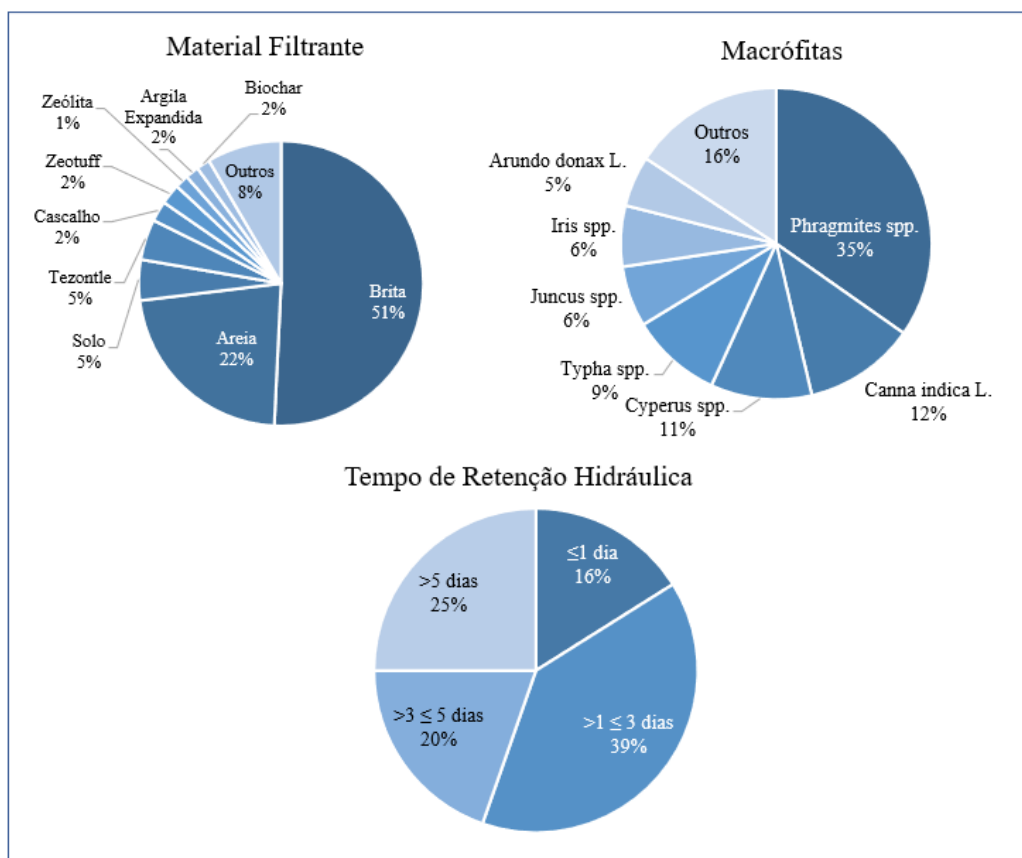
Figura 19 - WC-FSS empregados em diferentes níveis de tratamento.



Fonte: da autora.

A análise de alguns dos elementos que compõe os wetlands construídos estão ilustrados na Figura 20. O material filtrante mais empregado foi a brita, sendo utilizada em 51% dos sistemas, seguida por areia (22%), solo (5%) e tezontle (5%), uma rocha vulcânica porosa usada extensivamente no México (DE ANDA et al., 2018). Em relação às macrófitas, *Phragmites* spp são as mais empregadas, seguidas por *Canna indica* spp. (muito utilizada para paisagismo), e *Cyperus* spp. Acerca o tempo de retenção hidráulica (TRH), a maioria dos sistemas empregaram um tempo médio, com 39% aplicando um TRH entre 1 e 3 dias e 20% entre 3 e 5 dias. Por outro lado, 16% dos sistemas atuaram com um TRH inferior a 1 dia e 25% com um TRH superior a 5 dias, com um valor máximo de 11,8 dias no sistema nº 4. Os autores apontam que a escolha de um TRH com praticamente duas vezes o recomendando pela literatura para WCH, entre 2 e 7 dias (ROSSEAU et al., 2004), justifica-se pelo tratamento de um esgoto doméstico classificado como forte (DE ANDA et al., 2018).

Figura 20 - Variação da composição de alguns elementos dos WC-FSS levantados pela RSL.



Fonte: da autora.

De acordo com o apresentado na Figura 19, os WC-FSS são majoritariamente empregados para tratamento secundário nos sistemas levantados. De acordo com Dotro et al. (2017), a aplicação dos WC-FSS a nível secundário é preferencial, recebendo um efluente tratado a nível primário (ou pelo menos pós-gradamento no caso de WCV-SF) com uma reduzida quantidade de material particulado, de modo evitar colmatção do meio filtrante, preservando a adequada performance da tecnologia e contribuindo na remoção de poluentes. Nesse sentido, os tanques sépticos foram empregados como tecnologia primária na maioria dos sistemas, principalmente em cenário rural, condizente com o apontado por Moreira e Dias (2020). Outras tecnologias também foram empregadas, como tanques de sedimentação, tanque Imhoff e reator anaeróbio compartimentado (RAC). Esses e outros arranjos tecnológicos estão contabilizados e descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Arranjos tecnológicos mais frequentes nos sistemas estudados.

Arranjo Tecnológico	Cenário Urbano			Cenário Rural			Total de Sistemas
	WCH	WCV	SH	WCH	WCV	SH	
WC	2	3	2	10	4	5	26
TImh + WC						2	2
TSed + WC	1			1		2	4
TS + WC		1		3	5	1	10
RAC + WC	1		1		1		3
TecPri + WC	2	1		4		1	8
2 TecPri + WC	2			2		2	6
UASB + WC			1	1			2
WC + LE				6		2	8
TecSec + WC				2	2		4
Etapa de desinfecção	2	2		8	4	2	18

Legenda: WC = Wetland Construído; TImh = Tanque Imhoff; TSed = tanque de sedimentação; TS = tanque séptico; RAC = Reator Anaeróbio Compartimentado; TecPrim = outra tecnologia de tratamento primário; 2 TecPri = associação de duas tecnologias de tratamento primário; LE = lagoa de estabilização; TecSec = outra tecnologia de tratamento secundário.

Interessante observar que a maioria dos sistemas empregaram os wetlands de forma individual, sem a adição de outras tecnologias primárias ou secundárias envolvidas. No caso do cenário urbano tais sistemas operavam no tratamento de águas cinzas e a vazões inferiores a 1,2 m<sup>3</sup>/dia para os WCH e WCV e no tratamento de efluente secundário nos SH. Já em cenário rural, essa aplicação foi empregada para tratamento de todos os tipos de efluentes, mas com vazões inferiores a 6m<sup>3</sup>/dia em WCH, inferior a 4 m<sup>3</sup>/dia em WCV e inferior a 5,3m<sup>3</sup>/dia nos SH. Outro aspecto importante observado é em relação a inserção de uma etapa de desinfecção nos sistemas, fundamental para a redução da presença de microrganismos patogênicos no efluente tratado, permitindo seu reuso de forma segura (GHASEMI-ZANIANI et al., 2017). Desinfecção através de cloração (DE ANDA et al., 2018; QUARTAROLI et al., 2018), inclusive gerada in loco no momento da aplicação de modo a evitar a formação de trihalometanos (MISHRA et al., 2018; OTTER et al., 2020), através de UV (LAAFFAT et al., 2019; CASIERRA-MARTINEZ et al., 2016; SKLARZ et al., 2009), SODIS (SANTOS et al., 2020), ozonização (SAÚCO et al., 2021) e lagoas de maturação (SERES et al., 2021; RUSSO et al., 2019; BRIX et al., 2011) foram as principais intervenções observadas nos estudos.

A composição dos efluentes tratados nos sistemas localizados em cenário urbano, com seus valores médios de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, assim como seus valores máximos e mínimos, estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição do efluente recebido pelos sistemas (água cinza, esgoto bruto e secundário) e após o tratamento em diferentes etapas.

Parâmetros	Cenário Urbano					
	Água Cinza	Bruto	Secundário	Entrada WC	Saída WC	Efluente final
SST (mg/L) – média	108,6	211,7	338,5	125,5	13,8	12,4
(mín - máx)	(8 - 440,25)	(47,8 - 466)		(8 - 440,25)	(0,8 - 42)	(0,8 - 36,3)
Turbidez (UT) – média	64,9	94,8		65,2	12,1	12,0
(mín - máx)	(24,8 - 118)	(30 - 150,56)		(13,6 - 118)	(1 - 56)	(1 - 56)
pH – média	7,56	7,62	7,9	7,68	7,29	7,29
(mín - máx)	(5,9 - 8,4)	(7,45 - 7,64)		(5,9 - 8,4)	(6,8 - 7,9)	(6,4 - 8,02)
DBO (mg/L) – média	202,3	213,7	345,0	149,6	16,1	16,1
(mín - máx)	(44,2 - 811,7)	(37,7 - 505)		(30,7 - 811,7)	(1,2 - 42,7)	(1,2 - 42,7)
DQO (mg/L) – média	433,9	560,0	900,0	355,2	38,3	36,9
(mín - máx)	(77,2 - 2109)	(259,1 - 987,9)		(84 - 2109)	(6 - 121)	(0,01 - 121)
NT (mg/L) – média	20,7	196,6		47,1	25,6	25,9
(mín - máx)	(6,8 - 28,3)			(6,8 - 229,7)	(1,6 - 100,5)	(1,6 - 103,06)
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L) – média	14,7	33,1	35,0	19,4	4,6	3,6
(mín - máx)	(3,6 - 13,9)	(20,1 - 51)		(3,6 - 35)	(0,04 - 12,2)	(0,04 - 11,7)
PT (mg/L) – média	1,5	12,0	4,3	4,1	1,9	1,2
(mín - máx)	(0,8 - 1,9)			(0,8 - 11)	(0,05 - 6,2)	(0,05 - 5,3)
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L) – média	1,1	7,6		4,4	2,3	2,3
(mín - máx)	(0,3 - 2,9)	(0,18 - 13,4)		(0,1 - 10,4)	(0,04 - 5)	(0,04 - 5)
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL) – média	2,8 x 10 <sup>6</sup>	2,5 x 10 <sup>7</sup>		3,5 x 10 <sup>6</sup>	6,69 x 10 <sup>3</sup>	83,3
(mín - máx)	(1510 - 10 <sup>7</sup> )	(42000 - 10 <sup>7</sup> )		(1510 - 10 <sup>7</sup> )	(0 - 10 <sup>5</sup> )	(0 - 480)
C. Termo (NMP/100mL) – média		1,7 x 10 <sup>7</sup>	6,4 x 10 <sup>4</sup>	8,81 x 10 <sup>4</sup>	4,7 x 10 <sup>3</sup>	4,4 x 10 <sup>2</sup>
(mín - máx)		(10 <sup>3</sup> - 10 <sup>7</sup> )	(27 - 10 <sup>5</sup> )	(27 - 10 <sup>7</sup> )	(5,5 - 10 <sup>5</sup> )	(5,5 - 1000)

A água cinza foi o tipo de afluente presente na maioria dos sistemas, (sistemas nº 1, 5, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 – Tabela 6), com alguns sistemas atingindo valores extremos de SST, DBO e DQO, como no sistema nº 1 (Tabela 6), com 440,25 mg/L, 811,7 mg/L e 2109 mg/L respectivamente, devido aos hábitos da residência unifamiliar estudada, localizada em Surakarta, na Indonésia (QOMARIYAH et al., 2018). Em relação ao efluente bruto, tratado nos sistemas nº 2, 3, 4, 6, 13, 14 e 17 (Tabela 6), houve uma variedade de valores dentre os sistemas, devido às diferentes origens – doméstica, comercial e universitário. Por fim, efluente secundário foi objeto de tratamento apenas nos sistemas nº 15 e 16 (Tabela 6), os quais apresentaram as maiores concentrações de poluentes, mesmo após tratamento realizado previamente, sendo esses provenientes de ETE realizando tratamento de esgoto sanitário municipal e de campus universitário, respectivamente.

Os efluentes brutos passaram por uma etapa de tratamento primário antes de serem direcionados aos wetlands, contribuindo com a eficiência global de tratamento, ao contrário das águas cinzas, que foram direcionadas diretamente. Nota-se que, em relação aos parâmetros físico-químicos, os valores obtidos após os WC se encontraram iguais ou muito próximos dos valores obtidos após todas as etapas de tratamento. Por outro lado, os parâmetros microbiológicos obtiveram redução entre tais etapas, cerca de 2 unidades logarítmicas para *E coli* e 3 unidades logarítmicas para coliformes termotolerantes, com um efluente final com valores máximos de 480 NMP/100mL e 1000 NMP/100mL respectivamente.

A eficiência do tratamento das águas residuárias nos sistemas em cenário urbano estão descritos na Tabela 10, com valores de média e desvio padrão para o desempenho do WC de forma individual, além do desempenho global – considerando tecnologias complementares empregadas no arranjo tecnológico.

Observa-se melhores desempenhos globais de remoção de sólidos (SST) e matéria orgânica (DBO e DQO) nos SH, seguido por WCH e WCV, com uma média de 93,11%, 91,9% e 92,6% para o primeiro, com 90,5%, 90,7% e 90,8% para o segundo e 79,3%, 81,8% e 89,4% para o último. Em relação a remoção de nutrientes, nota-se uma disparidade em relação a NT e  $\text{NH}_4$  entre os sistemas. Nota-se uma elevada remoção de  $\text{NH}_4$  obtida pelos WCV, com uma remoção média de 90,2%, com destaque para os sistemas nº 11 e 12 (Tabela 6), com eficiências de 91,9% e 97,12% respectivamente, sendo o primeiro um WCV com recirculação e o segundo um WCV compartimentado. Em relação aos WCH, uma eficiência média de 80,1% foi atingida por essa modalidade, com destaque para o sistema nº 8 (Tabela 6), um WCH aerado de 4 módulos posicionados em cascada com uma eficiência de 98,9% de remoção de  $\text{NH}_4$ . Nos SH, os valores se mantiveram entre 55,6% e 72,2% para remoção de  $\text{NH}_4$ , mas uma média de 80% para remoção de PT – a mais elevada dentre as demais modalidades. Nota-se uma baixa eficiência de 16,9% para remoção de  $\text{P-PO}_4^3$  em WCH, valor que foi afetado pelo sistema nº 7 (Tabela 6), com uma eficiência de negativa de -60,3% (de 0,34 mg/L para 0,54 mg/L). Os autores atribuem essa performance à reduzida quantidade de fosfato na água cinza, oferecendo um valor escasso para as macrófitas, as quais em conjunto com a ação de adsorção da argila expandida no meio filtrante podem ter elevado a concentração de  $\text{P-PO}_4^3$  na saída do sistema (ZRAUNIG et al., 2019). Apesar disso, os valores de efluente final ainda foram condizentes com as diretrizes nacionais para reuso de água residuária.



Tabela 10 - Eficiência na remoção de poluentes das águas residuárias em cenário urbano.

Parâmetros	WCH		WCV		SH	
	% WC	% Final	% WC	% Final	% WC	% Final
SST (mg/L)	84 ± 16,9	90,5 ± 7	77,4 ± 17	79,3 ± 8,3	90,3 ± 6,7	93,11 ± 6
Turbidez (UT)	92,1 ± 4,3	94,8	72,1 ± 32	93,7 ± 6,5		
DBO (mg/L)	84,1 ± 19,2	90,7 ± 10,7	81 ± 24,6	81,8 ± 17,2	85,8 ± 6	91,9 ± 3,4
DQO (mg/L)	81,8 ± 15,5	90,8 ± 7,2	84,9 ± 11,6	89,4 ± 8,1	85,4 ± 11,2	92,6 ± 6,3
NT (mg/L)	57,6 ± 14,2	55,4 ± 15,1	23,8 ± 15,3	23,8 ± 15,3		
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	80,1 ± 16,5	84,6 ± 15,4	90,2 ± 5,8	90,8 ± 7	66,2 ± 7,8	77,1 ± 10,5
PT (mg/L)	45,7 ± 6,1	52,8 ± 4	57,9 ± 36,9	74,7 ± 32	80 ± 14,1	91
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	16,9 ± 70,4	39 ± 72	42,5 ± 44	66,4 ± 33	45,7 ± 10,1	52,3 ± 15,7
<i>E. coli</i> (NMP/100mL) <sup>1</sup>	1,5 ± 1,1	4,2 ± 1,8	1,9 ± 1,5	5,0 ± 1,3	-	-
C. Termo (NMP/100mL) <sup>1</sup>	1,6 ± 0,9	3,9 ± 3,2	-	-	1,3 ± 0,7	1,7 ± 0,9

Legenda: <sup>1</sup> = unidades logarítmicas removidas.

Em relação aos efluentes tratados em sistemas localizados em cenário rural, seus valores médios, máximo e mínimos de parâmetros físico-químicos e microbiológicos estão descritos na Tabela 11. Ao comparar com o cenário urbano, nota-se um efluente bruto e secundário com menores concentrações de matéria orgânica e sólidos, mas com uma maior concentração de nutrientes. Nota-se que a concentração de todos os parâmetros reduziu de forma mais expressiva após o tratamento nos WC-FSS do que em relação ao efluente final, sendo o último com uma redução mais significativa apenas de DBO e menos expressiva de nutrientes.

Além disso, percebe-se um valor médio superior de SST do efluente final quando comparado ao efluente tratado pelo WC, com uma influência direta dos sistemas nº 28a e 52 (Tabela 7), os quais empregaram uma lagoa de maturação após um WCV e um SH, respectivamente. O efluente tratado pelas diferentes modalidades de Wetland em tais sistemas apresentaram concentrações de 12,3 mg/L e 7,9 mg/L, respectivamente, e um efluente final com concentrações de 138,3 mg/L e 101 mg/L, valores influenciados pela formação de algas nas lagoas (SERES et al., 2021; ZURITA e WHITE, 2014), o que também afetou valores de matéria orgânica no sistema nº 28a (Tabela 7), com concentrações de DBO indo de 27,3 mg/L para 55,5 e DQO de 96,9 mg/L para 277,8 mg/L. Nesse estudo conduzido por Zurita e White (2014), outros dois sistemas foram estudados, um SH composto por WCH seguido de WCV e outro SH composto por WCV seguido de WCH, no qual os autores concluíram que não houve diferença significativa entre os dois SH, onde ambos obtiveram uma performance de remoção de

poluentes que permite o reuso seguro da água residuária tratada segundo as diretrizes da OMS e da legislação mexicana.

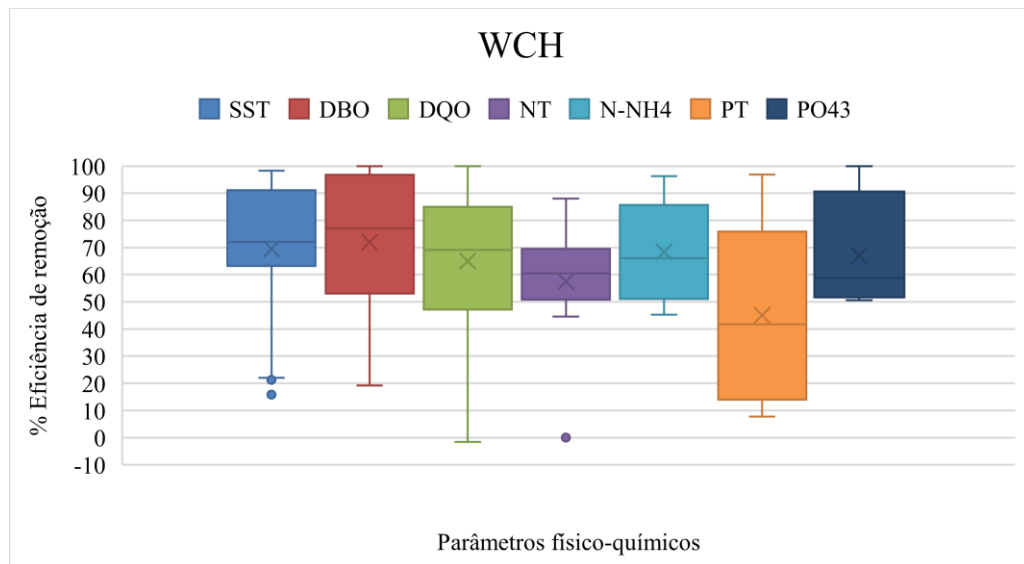
Tabela 11 - Composição do efluente recebido pelos sistemas (água cinza, esgoto bruto e secundário) e após o tratamento em diferentes etapas.

Cenário Rural						
Parâmetros	Água Cinza	Bruto	Secundário	Entrada WC	Saída WC	Efluente final
SST (mg/L) – média (mín - máx)	81,3 (27 - 300)	238,9 (32 - 520)	194,9 (39 - 719)	122,6 (1,1 - 630)	14,9 (0 - 177)	22,1 (0 - 177)
Turbidez (UT) – média (mín - máx)	65,1 (31 - 98)	162,9 (15 - 443)	293,2 (11,4 - 761)	89,3 (19 - 273)	16,7 (0 - 91,5)	16,1 (0 - 91,5)
pH – média (mín - máx)	7,5 (6,47 - 8,3)	7,2 (5,5 - 8,2)	7,6 (6,74 - 8,3)	7,4	7,3 (6,4 - 8)	7,4 (6,4 - 8,3)
DBO (mg/L) – média (mín - máx)	296,4 (46 - 673)	251 (32 - 840)	199,3 (16 - 697)	203,4 (4,8 - 840)	41,2 (4,2 - 240)	25,7 (3 - 122)
DQO (mg/L) – média (mín - máx)	487,7 (97 - 1119)	687,6 (87 - 2700)	451,3 (46 - 1257)	373,9 (25 - 1119)	78,8 (14,3 - 400)	74,2 (14,3 - 278)
NT (mg/L) – média (mín - máx)	12,35 (11 - 12,8)	79,4 (32 - 139,5)	90,1 (20,4 - 188)	63,3 (3,5 - 139,5)	29,7 (0,9 - 113,6)	26,7 (0,9 - 113,6)
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L) – média (mín - máx)	9,6 (3,6 - 11,6)	65,43 (20,2 - 128,2)	53,2 (9,4 - 131)	45,7 (2,2 - 128,2)	9,3 (0,2 - 103,1)	7,2 (0,2 - 42,1)
PT (mg/L) – média (mín - máx)	2,1 (0,6 - 3,3)	14,6 (2 - 60)	6,6 (1,5 - 15)	22,2 (0,6 - 92)	8,1 (0,1 - 37)	7,6 (0,1 - 37)
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L) – média (mín - máx)	7	3,9	18,1 (4,5 - 70,9)	9,7 (3,9 - 68,7)	4,0 (1,4 - 12,8)	3,4 (0 - 4,8)
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL) – média (mín - máx)	2,40 x 10 <sup>5</sup>	1,05 x 10 <sup>9</sup> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>9</sup> )	2,2 x 10 <sup>6</sup> (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>7</sup> )	5,7 x 10 <sup>6</sup> (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>8</sup> )	1,7 x 10 <sup>5</sup> (0 - 10 <sup>5</sup> )	1,5 x 10 <sup>5</sup> (0 - 10 <sup>5</sup> )
C. Termo (NMP/100mL) – média (mín - máx)	6,26 x 10 <sup>4</sup> (1047 - 10 <sup>5</sup> )	8,67 x 10 <sup>10</sup> (10 <sup>3,98</sup> - 10 <sup>11</sup> )	8,48 x 10 <sup>8</sup> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>9</sup> )	5,70 x 10 <sup>8</sup> (10 <sup>3,98</sup> - 10 <sup>9</sup> )	1,22 x 10 <sup>7</sup> (18 - 10 <sup>8</sup> )	9,72 x 10 <sup>6</sup> (0 - 10 <sup>8</sup> )

Acerca as eficiências globais de remoção de poluentes físico-químicos nos sistemas localizados em cenário rural, de acordo com a modalidade de WC-FSS empregado nos arranjos estão ilustradas nas Figuras 21, 22 e 23. A média calculada de remoção SST, DBO e DQO nos sistemas operando com WCH foram de 70,7%, 72% e 65,3%, sendo o último parâmetro influenciado diretamente pelo sistema nº 28a (Tabela 7), com uma remoção de -1,6%, devido a formação de algas na lagoa de maturação (ZURITA e WHITE, 2014). Já em relação a remoção de nutrientes, valores de 64% para NT, 68,5% para NH<sub>4</sub>, 45,1% para PT e 67,1% para PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> foram calculados. Em comparação a performance de WCH em cenário urbano, uma melhor performance foi observada na remoção de NT e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> no cenário rural. Destaque para o sistema nº 21 (Tabela 7), um WCH aerado preenchido parcialmente com escória granulada de alto forno

(Blast Furnace Slags - BFL) com uma remoção de 91,5% de NT e 96,9% para PT, além de valores acima de 92% para SST, DBO e DQO (ANDREO-MARTINEZ et al., 2017).

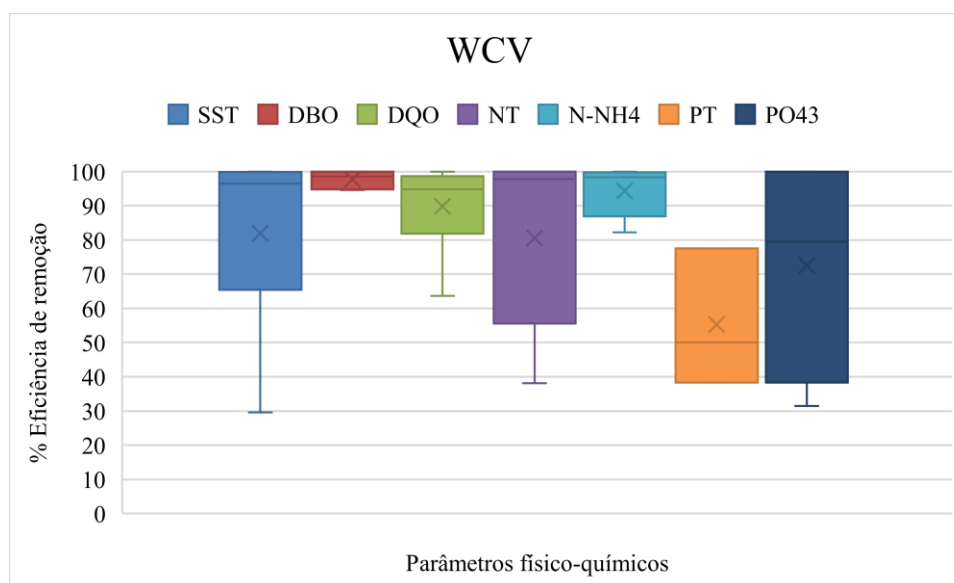
Figura 21 - Eficiência de remoção de poluentes físico-químicos em arranjos compostos por WCH em cenário rural.



Fonte: da autora.

O compilado de eficiências de tratamento dos 10 sistemas adotando WCV no seu arranjo tecnológico encontra-se na Figura 22. Uma remoção média de 88,5%, 86,6% e 92,7% foi calculada para SST, DBO e DQO respectivamente, valores superiores aos obtidos pelos sistemas com WCH. Em relação a remoção de nutrientes (NT,  $\text{NH}_4^+$ , PT,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) foi obtida uma remoção média de 80,5%, 96%, 55,3% e 72,6%, também superiores às obtidas pelos arranjos com WCH. O sistema nº 43a (Tabela 7), localizado numa ETE na Espanha, composto por um WCV de 50m<sup>2</sup> para o tratamento terciário de esgoto sanitário tratado em sistema de lodos ativados e filtro de areia, contabilizou a melhor performance entre os WCV – 99% para SST, 98% para DBO, 97% para DQO, 97% para NT, 90% para  $\text{NH}_4$ . Além disso, através da cloração do efluente tratado, foi obtido uma redução de 4,9 unidades logarítmicas de coliformes totais e 3,2 unidades logarítmicas de *E. coli* (OTTER et al., 2020).

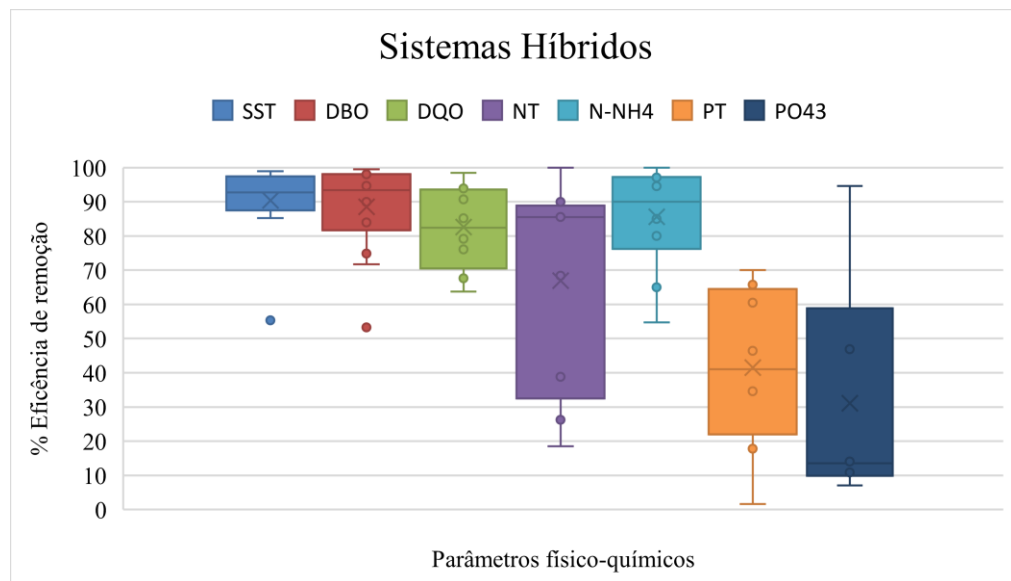
Figura 22 - Eficiência de remoção de poluentes físico-químicos em arranjos compostos por WCV em cenário rural.



Fonte: da autora.

Por fim, 12 sistemas empregaram Sistemas Híbridos no tratamento de suas águas residuárias, com valores de eficiência de remoção de poluentes ilustrados na Figura 23. A remoção média calculada nesses sistemas foi de 90,6% de SST, 90,3% de DBO, 84,7% de DQO, 64,4% de NT, 84,2% de  $\text{NH}_4^+$ , 34% de PT e 41,3% de  $\text{PO}_4^{3-}$ . Destaque para o sistema n° 58 (Tabela 7), estudado por Torrens et al. (2020), tratando efluente bruto gerado em campus universitário localizado no Senegal, com um SH composto por três etapas (WCV-FS, WCV e WCH) que obteve uma eficiência de remoção de 98% de SST, 99% de DBO, 94% de DQO, 87% de NT, 97% de  $\text{NH}_4$  e 95% de  $\text{PO}_4^3$ , além de remoção de 7 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes, obtendo-se uma água recuperada própria para reuso agrícola atendendo as normas diretrizes do Senegal, da União Europeia e da OMS.

Figura 23 - Eficiência de remoção de parâmetros físico-químicos em arranjos compostos por SH em cenário rural.

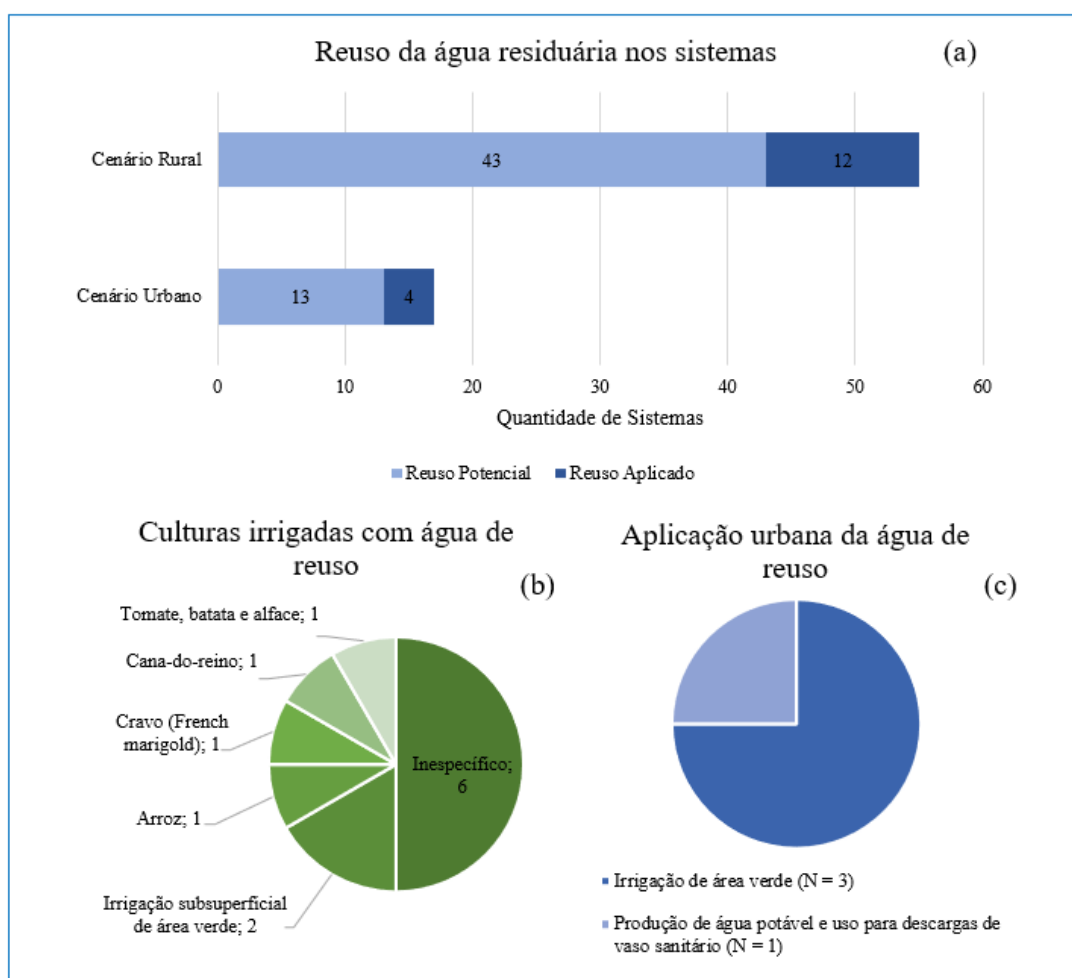


Fonte: da autora.

Acerca o reuso do efluente tratado, observa-se que a maioria dos sistemas avaliou apenas o reuso em potencial da água recuperada, analisando se os limites de qualidade propostos por diversas legislações de referência internacionais (como OMS, USEPA e diretrizes nacionais) eram atendidos, total ou parcialmente, como ilustrado na Figura 24. Apenas 12 sistemas no cenário rural realizaram de fato a aplicação da água de reuso para algum fim, em sua totalidade para a irrigação de áreas verdes ou de diferentes culturas agrícolas, entre elas arroz, cana, flor de corte (cravo), tomate, batata e alface. Já no cenário urbano, apenas 4 sistemas executaram o aproveitamento da água recuperada, com 3 sistemas realizando a irrigação de áreas verdes e apenas um sistema direcionando esse efluente tratado para uso em descargas sanitárias e também para produção de água potável com o complemento de outra linha de tratamento.

Finalmente, no Quadro 4 encontram-se as principais informações levantadas pela RSL acerca as principais práticas analisadas mundialmente sobre o reuso da água residuária tratada em sistemas compostos por wetlands construídos.

Figura 24 - Avaliação do reuso do efluente tratado nos sistemas avaliados, de acordo com (a) reuso potencial ou reuso aplicado, (b) aplicação agrícola e (c) aplicação urbana.



Fonte: da autora.

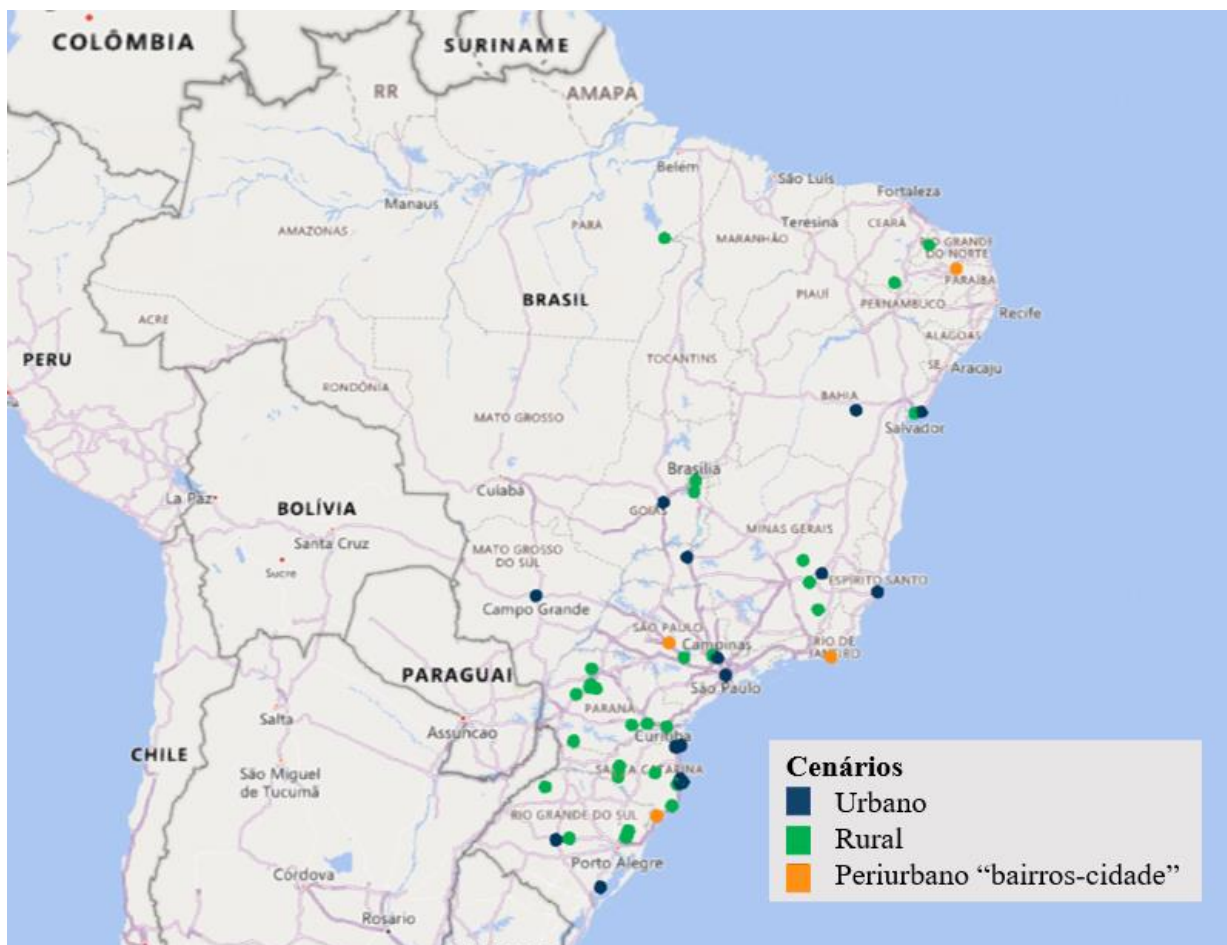
Quadro 4 - Quadro conceitual sobre os principais aspectos acerca o reuso do efluente tratado em sistemas com Wetlands Construídos.

Aspectos	Cenário Urbano	Cenário Rural
Efluente tratado com maior frequência	Água cinza	Esgoto bruto
Faixa de vazão (m <sup>3</sup> /dia)	0,04 – 20	0,04 – 860
Modalidade mais empregada	WCH	WCH
Nível de tratamento de WC-FSS mais empregado	Secundário	Secundário
Arranjo tecnológico mais empregado	RAC + WC	TS + WC / WC + LE
Tipo de reuso mais empregado	Irrigação de áreas verdes	Irrigação subsuperficial de áreas verdes

## 5.2. EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS NO EMPREGO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS E SANITÁRIOS

Ao todo, 50 publicações foram selecionadas para compor o banco de dados sobre a situação atual nacional acerca dos sistemas que empregam os wetlands construídos em escala real para tratamento de esgoto doméstico, totalizando 65 sistemas. A maioria desses sistemas se encontra inserida em cenário rural (39 sistemas), seguido por 21 sistemas inseridos em cenário urbano e 5 sistemas na zona periurbana para o atendimento de “bairros-cidade”. A distribuição geográfica desses sistemas está ilustrada na Figura 25, assim como sua inserção nos diferentes cenários objeto da pesquisa.

Figura 25 - Distribuição geográfica de sistemas compostos por wetlands construídos em escala real para o tratamento de esgoto doméstico em cenário nacional.



Fonte: da autora.

Observa-se a predominância de sistemas localizados nas regiões Sul e Sudeste, totalizando 41 e 14 sistemas, respectivamente. As demais regiões contam com uma menor quantidade de wetlands instalados em escala real, com 5 na região Nordeste, 4 na região Centro-Oeste e apenas 1 sistema em zona rural da região Norte. De acordo com os dados mais recentes apresentados pelo Atlas Esgotos, a população residente das regiões Norte e Nordeste são as que mais carecem do atendimento de serviços de esgotamento sanitário quando comparado às outras regiões, onde o tratamento do esgoto sanitário é oferecido a apenas 12% e 32% da população, respectivamente (ANA, 2017).

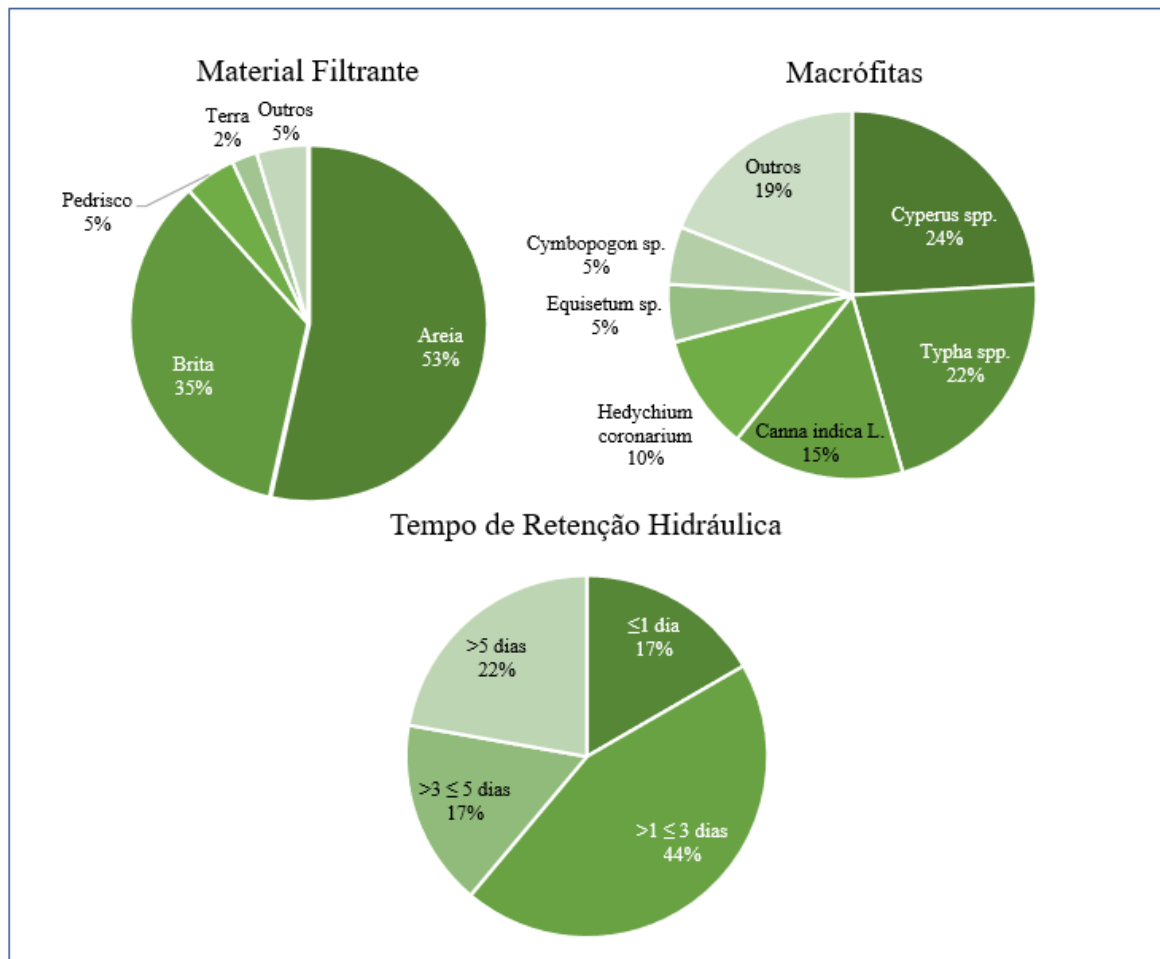
Em relação aos elementos que compõe os wetlands, ilustrados na Figura 26, não há uma grande variedade de materiais utilizados para compor a camada filtrante dos sistemas, com a predominância de areia (53%) e brita (35%), além de alguns poucos sistemas empregando pedrisco (5%), terra (2%) e outros materiais (5%), como resíduo de cerâmica (LEAL, 2019) e casca de arroz carbonizada (TIMM, 2015). Acerca as macrófitas utilizadas, *Cyperus* spp. (usualmente *Cyperus papyrus* – o papiro, ou *Cyperus alternifolius* – a sombrinha-chinesa) foi a espécie mais empregada, presente em 24% dos sistemas, seguido pela *Typha* spp. (taboa) em 22% e pela *Canna indica* L. (cana-do-brejo/biri) em 15%. Sobre o TRH empregado, poucos sistemas discutiram sobre esse dado, no qual a maior parcela adotou um tempo de duração média, com 44% aplicando um intervalo entre 1 e 3 dias e 17% adotando entre 3 e 5 dias. Um TRH inferior a 1 dia foi empregado em 17% dos sistemas e 22% adotaram um tempo superior a 5 dias, como relatado por Lutterback et al. (2018) com 10,17 dias, Rodrigues (2012) com 9,72 dias e Sérvulo et al. (2019) com 7,34 dias, os quais localizam-se em cenário rural.

Ao comparar as características dos sistemas implantados em cenário nacional com os sistemas que objetivam o reuso do esgoto tratado (Figura 20), observa-se que os materiais mais utilizados para preencher o leito filtrante foram os mesmos, brita e areia. Entretanto, nos sistemas que objetivam o reuso do esgoto tratado, há uma maior variedade de materiais empregados, como o biochar, um material altamente adsorvente, especialmente de nitrogênio (NGUYEN et al., 2020a), a zeólita, mineral também altamente adsorvente que aprimora a resiliência e fertilidade do solo e, conseqüentemente, desenvolvimento das macrófitas e remoção de poluentes (EZZAT e MOUSTAFA, 2021; MORANDI et al., 2021) e a argila expandida, responsável pela promoção de melhor desenvolvimento do biofilme e prevenção de colmatação do filtro (ZRAUNIG et al., 2019; ESTELRICH et al., 2021). Acerca o TRH empregado, condições semelhantes foram adotadas em ambos os cenários, com a preferência



de um período entre 1 e 3 dias. Por fim, acerca as macrófitas, *Canna indica* spp. e *Cyperus* spp. foram espécies recorrente em ambos os casos, mas com forte presença de *Typha* spp. nos sistemas nacionais e predominância de *Phragmites* spp. nos internacionais.

Figura 26 - Variação da composição de alguns elementos dos WC-FSS em cenário nacional.



Fonte: da autora.

Os arranjos tecnológicos mais empregados nos sistemas de aplicabilidade nacional estão contabilizados na Tabela 12, a qual evidencia a predominância do uso de tanques sépticos associados aos wetlands construídos, tanto em cenário urbano quanto rural, correspondendo a 6 e 21 sistemas, respectivamente. Avaliando em conjunto ao comparar com os sistemas que visam o reúso, esse arranjo (TS+WC) condiz com a opção mais empregada nos sistemas em

cenário rural, enquanto que em cenário urbano houve uma maior distribuição entre tecnologias primárias empregadas.

Tabela 12 - Arranjos tecnológicos mais frequentes nos sistemas estudados no cenário nacional.

Arranjo Tecnológico	Cenário Urbano			Cenário Rural			Total de Sistemas
	WCH (8)	WCV (11)	SH (2)	WCH (24)	WCV (13)	SH (2)	
WC	1	1	1	4	3		10
TS + WC	2	4		12	7	1	26
RAC + WC		3		1			4
FAN + WC	1	1					2
TS + FAN + WC		1	1	4	2		8
TecPri + WC	2					1	3
LAB + WC					1		1
UASB + WC	1			1			2
FB + WC	1	1					2
TecPri + TecSec + WC				2			2
Etapa de desinfecção	2	7	1	2		1	13

Legenda: WC = Wetland construído; TS = Tanque séptico; RAC = Reator anaeróbico compartimentado; TecPrim = outra tecnologia de tratamento primário; FAN = Filtro anaeróbico; LAB = Lodos ativados em batelada; FB = Filtro biológico; TecSec = outra tecnologia de tratamento secundário.

Além do tanque séptico, outras tecnologias também foram empregadas para tratamento primário do esgoto gerado em cenário urbano, como RAC, filtros anaeróbios e associação de tanque séptico com filtro anaeróbico (TS+FAN). Em cenário nacional, os wetlands foram empregados predominantemente como tecnologia de tratamento secundário, com poucos casos implantando a tecnologia para tratamento terciário do esgoto, quais sejam: após lodo ativado em bateladas (LAB) em um local de eventos em zona rural (DOS SANTOS e ROSTON, 2016), após UASB em loteamento multifamiliar (FERREIRA, 2013) e em uma propriedade rural, visando o reaproveitamento da água recuperada nesta (LUTTERBACK et al., 2018) e após variantes de filtros biológicos (CARVALHO et al., 2016; OLIVEIRA, 2015; ROSA et al., 2015).

Poucos sistemas empregaram os wetlands de forma individual, com apenas 2 casos em cenário urbano para tratamento de águas cinzas provenientes de uma dependência da Escola Politécnica da USP, com vazão aproximada de 0,35m<sup>3</sup>/d (MONTEIRO, 2009) e de águas cinzas com vazão aproximada de 0,25 m<sup>3</sup>/d de um escritório de engenharia (MONTEIRO, 2014), além de um SH aplicado em empresa farmacêutica com emprego apenas de tratamento preliminar a montante (ABREU, 2019). Nota-se uma maior quantidade de casos empregando modalidades

isoladas em cenário rural, principalmente para atendimento de residências unifamiliares (SOUZA et al., 2013; ALMEIDA et al., 2020; SOUZA et al., 2020; PIRES, 2012; LEITE et al., 2020; SILVA et al., 2017) e para atendimento de local de eventos, sendo que essa última operou com uma grande variação de carga devido a variabilidade de geração de esgoto entre festividades (TIMM, 2015). Esses sistemas operavam no tratamento principalmente de água cinza, mas também de esgoto bruto e água negra, com vazões entre 0,48 m<sup>3</sup>/d e 1,3 m<sup>3</sup>/dia nas residências unifamiliares, além do atendimento mensal aproximado de 200 pessoas, com uma vazão de 1,3 m<sup>3</sup>/d de esgoto bruto no WCV empregado no local de eventos.

Em relação a inserção de uma etapa de pós-tratamento, em cenário rural apenas 3 sistemas realizam a desinfecção do esgoto tratado, através de UV (LUTTERBACK et al., 2018) ou SODIS (PANSONATO, 2010; BATISTA et al., 2013). Por outro lado, praticamente metade dos sistemas em cenário urbano empregam alguma etapa de desinfecção, sendo essa majoritariamente através de cloração, aplicada em loteamentos multifamiliares (FERREIRA, 2013; TREIN, 2015) e em prédios comerciais (OLIVEIRA, 2015; DEGEN, 2018), UV em uma indústria de filtros (DEGEN, 2018) e filtros de carvão ativado em uma residência unifamiliar (CARVALHO et al., 2016).

Informações sobre as particularidades dos sistemas tipo wetlands construídos aplicados em cenários urbano, rural e periurbano estão discorridos nas seções a seguir.

### **5.2.1. Cenário Urbano**

Ao todo 17 publicações contabilizando 21 sistemas compreendem o banco de dados dos sistemas localizados em cenário urbano. Nesse sentido, 6 sistemas estão instalados em residências unifamiliares, 4 sistemas instalados em residências multifamiliares e 11 sistemas em empreendimentos semicoletivos, principalmente prédios comerciais. Dados gerais sobre esses sistemas estão discorridos na Tabela 13.

Destas publicações, 8 sistemas empregaram WCH para o tratamento do esgoto gerado, sendo essa modalidade adotada em todas as categorias, mas predominantemente em residências unifamiliares. Os WCV foram empregados apenas em residenciais multifamiliares e prédios comerciais, totalizando 11 sistemas, predominando fortemente na última categoria. Além disso, 2 sistemas modificados, um WCV de Fundo Saturado (WCV-FS) e 1 WCV Aerado (WCVa),

foram avaliados, sendo o WCV-FS aplicado em um residencial multifamiliar com equivalente populacional de 2.200 moradores e o WCVa em um prédio comercial com 219 funcionários. Apenas 2 sistemas híbridos foram empregados em cenário urbano, ambos associando WCV seguidos por WCH, para o atendimento de uma residência unifamiliar (U6 – Tabela 13) e de um prédio comercial (U17 – Tabela 13).

Vale apontar que esses dois SH operaram em condições distintas, sendo o sistema U6 (Tabela 13) atendendo uma família de 3 pessoas, com uma vazão de  $0,35\text{m}^3/\text{d}$  ocupando uma área total de  $6\text{ m}^2$  ( $3\text{ m}^2$  cada WC-FSS). Já o sistema U17 (Tabela 13) foi aplicado no atendimento de uma empresa farmacêutica com cerca de 650 funcionários, com uma vazão aproximada de  $104\text{ m}^3/\text{dia}$  e o acréscimo de um módulo de WC de fluxo livre (WC-FL) para refinar o efluente tratado, ocupando uma área total de  $1.635\text{ m}^2$ , sendo  $669\text{ m}^2$  para o primeiro módulo,  $446\text{ m}^2$  para o segundo módulo e  $520\text{ m}^2$  para o terceiro módulo.

Entre os sistemas das categorias residenciais, percebe-se condições bem definidas e distintas, no qual em sistemas unifamiliares a vazão de esgoto gerado variou entre  $0,2$  e  $0,5\text{ m}^3/\text{d}$ , com o sistema WC-FSS ocupando uma área entre  $1$  e  $12\text{ m}^2$ . Já nos sistemas multifamiliares, a vazão variou entre  $3$  e  $43,2\text{ m}^3/\text{d}$  e os sistemas ocuparam uma área entre  $24,5\text{ m}^2$  e  $3.141\text{ m}^2$ . Na categoria comercial predial, essas condições variaram de forma mais dispersa, de acordo com o porte do empreendimento. A menor vazão afluente foi observada no sistema U14 (Tabela 13), com  $0,25\text{ m}^3/\text{d}$ , para o tratamento da água cinza gerada em um escritório de engenharia, cujo arranjo tecnológico era composto apenas pelo WCV de  $9,24\text{ m}^2$  e um tanque de acumulação, para posterior aproveitamento da água de reuso em descargas de vaso sanitários (MONTEIRO, 2014). Já a maior vazão, correspondente a  $104\text{ m}^3/\text{d}$  de esgoto bruto, foi aplicada no sistema U17 (Tabela 13), composto por tanque de equalização/aeração e SH, no qual o primeiro módulo (WCV) é alimentado em bateladas pelo tanque. Nesse sistema, o WCV foi projetado e construído com três seções, no qual a operação é feita de forma com que apenas uma seção seja alimentada por vez, enquanto as outras duas entram em um período de recesso da operação a fim de reduzir a carga hídrica e poluente nas plantas. Em seguida, o efluente segue para o WCH, construído com duas seções e alimentado de mesma forma alternada, finalizando o tratamento pela passagem por gravidade pelo WC-FL, chamado no projeto de “Lagoa plantada” (ABREU, 2019).

Tabela 13 - Visão geral de diferentes configurações de wetlands construídos para tratamento de esgoto doméstico localizados em cenário urbano.

Cenário Urbano								
WC-FSS	Núm. Sistema	Cidade/UF	Efluente	E.P.	TAH (mm/d)	Q (m <sup>3</sup> /d)	Área WC (m <sup>2</sup> )	Referência
<b>Residencial unifamiliar</b>								
<b>WCH</b>	U1	Butantã/SP	água cinza	-	49	0,35	7,2	Monteiro (2009)
	U2	Florianópolis/SC	bruto	6	96	-	10	Sezerino et al. (2012)
	U3	Goiânia/GO	bruto	5	-	0,5	5	Pitaluga et al. (2009)
	U4	Campo Grande/MS	água cinza clara (banho)	4	300	-	1	Menezes (2019)
	U5	Timóteo/MG	água cinza	4	-	0,2	-	Carvalho et al. (2016)
<b>SH</b> (WCV - WCH)	U6	São Lourenço do Sul/RS	bruto	3	-	0,35	12	Teske (2016)
<b>Residencial multifamiliar</b>								
<b>WCH</b>	U7	Nova Redenção/BA	bruto	213	54,5	7	70	Santiago e Calijuri (2009)
	U8	Lauro de Freitas/BA	bruto	1000	20	43,2	504	Ferreira (2013)
<b>WCV</b>	U9	Santa Maria/RS	bruto	10	85	3	24,5	Decezaro et al. (2021)
WCV-FS	U10a	Palhoça/SC	bruto	2200*	11,6	18,1	3141	Trein (2015)
<b>Comercial predial</b>								
<b>WCH</b>	U11	Vitória/ES	água cinza	16	-	1,65	2,56	Knupp (2013)
<b>WCV</b>	U12	Vitória/ES	água cinza	16	70	0,51	7,7	Sarnaglia (2014)
	U13	Uberlândia/MG	bruto	800	223,3	0,40	3,58	Leal (2019)
	U10b	Biguaçu/SC	bruto	250	-	12,2	189	Trein (2015)
	U14	Florianópolis/SC	água cinza	45	161	0,25	9,24	Monteiro (2014)
	U15	Vitória/ES	água cinza	100	-	5	12,5	Oliveira (2015)
	U16a	Florianópolis/SC	bruto	31	14	4,88	35,9	Degen (2018)
	U16b	Florianópolis/SC	bruto	50	-	8	54,6	Degen (2018)
	U16c	Joinville/SC	bruto	300	-	21	162	Degen (2018)
WCVa	U16d	São Francisco do Sul/SC	bruto	219	-	35,04	63	Degen (2018)
<b>SH</b> (WCV - WCH - WCFL)	U17	Campinas/SP	bruto	650	-	104	669 <sup>1</sup> 446 <sup>2</sup> 520 <sup>3</sup>	Abreu (2019)

Legenda: WC-FSS = Wetland construído de fluxo subsuperficial; E.P. = equivalente populacional; TAH = Taxa de Aplicação Hidráulica; Q = vazão aplicada; WCH = Wetland construído de fluxo horizontal; WCV = Wetland construído de fluxo vertical; WCVa = Wetland construído de fluxo vertical com aeração; SH = Sistema híbrido; WCV-FS = Wetland construído de fluxo vertical com fundo saturado; WCFL = Wetland construído de fluxo livre; \* = exceção para categoria "residencial multifamiliar" (atendendo a E.P. de 100 pessoas durante a pesquisa); <sup>1</sup> = área do primeiro módulo; <sup>2</sup> = área do segundo módulo; <sup>3</sup> = área do terceiro módulo.

A taxa hidráulica aplicada - THA foi uma característica operacional pouco apresentada e discutida nos estudos levantados. Em relação aos WCH, esse valor variou entre 20 e 300 mm/dia, sendo o valor mais elevado aplicado no sistema U4 (Tabela 13) para o tratamento de água cinza, o qual também recebeu uma carga orgânica superficial elevada de 47,9 gDQO/m<sup>2</sup>.dia, enquanto que a literatura recomenda que esse valor não exceda 16 gDQO/m<sup>2</sup>.dia para essa modalidade de WC-FSS (HOFFMAN et al., 2011). Contudo, segundo os autores, obteve-se valores satisfatórios de eficiência de tratamento, além de robustez quanto a variação de carga, tanto orgânica quanto hidráulica (MENEZES, 2019). Acerca os WCV, a TAH variou entre 11,6 e 223,3 mm/dia, observando o limite recomendado por Platzer (1999) de 250 mm/dia em regiões de clima quente

Além disso, é importante notar a variação entre o tipo de efluente tratado nos sistemas, onde em residências unifamiliares e em prédios comerciais há casos de tratamento de esgoto bruto ou de água cinza, e na categoria de residenciais multifamiliares observa-se apenas o esgoto bruto sendo tratado nos sistemas, sem nenhum tipo de segregação do efluente. Nesse sentido, expõe-se na Tabela 14 a composição média do esgoto gerado em cenário urbano e sua composição após tratamento em sistemas wetlands construídos.

Acerca dos parâmetros físicos, nota-se uma concentração mais elevada de SST em esgoto doméstico gerado em residenciais multifamiliares, com um valor médio de 301,5 mg/L, seguido por residenciais unifamiliares (142,3 mg/L) e prédios comerciais (65 mg/L). A categoria residencial multifamiliar sofreu forte influência do sistema U9 (Tabela 13) com uma concentração de 723 mg/L de SST mg/L, além da presença de demais parâmetros também elevados como 678 mg/L de DBO e 1186 mg/L de DQO. Os autores apontam que houve uma grande variação no esgoto bruto, mas as concentrações do efluente tratado apresentaram pouca variação, reforçando a robustez do sistema e sua capacidade de suportar cargas de choque (DECEZARO et al., 2021). A turbidez foi reportada apenas por sistemas residenciais unifamiliares e prediais comerciais, com valores médios próximos, equivalentes a 68,4 e 56,3 UT no afluente e 10,7 e 10,3 UT no esgoto tratado dos respectivos sistemas. O pH se manteve na faixa da neutralidade (entre 6,5 e 9) entre todos os sistemas.

Em relação ao teor de matéria orgânica carbonácea, houve uma maior distribuição de valores, cuja composição do afluente compreende uma DBO entre 35 mg/L e 678 mg/L e DQO entre 100 mg/L e 1186 mg/L, com valores médios mais proeminentes também nos residenciais

multifamiliares (média de 408,3 mg/L de DBO e 813 mg/L de DQO). Após o tratamento, dentre os valores médios calculados entre os sistemas, nota-se novamente uma concentração final mais elevada nos sistemas multifamiliares, com uma DBO média de 74 mg/L e DQO média de 116,8 mg/L, ainda assim concentrações significativamente reduzidas quando observado os valores de entrada, evidenciando a eficiência dos sistemas na redução de matéria orgânica.

Tabela 14 - Composição média do efluente gerado nos diferentes contextos instalados em cenário urbano e composição média pós-tratamento em wetlands.

Cenário Urbano						
Parâmetros	Res. Unifamiliar		Res. Multifamiliar		Predial Comercial	
	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado
SST (mg/L) – média (mín - máx)	142,3 (70 - 237)	22,4 (6 - 57)	301,5 (55,5 - 723)	38,5 (2,3 - 126)	65 (28,1 - 138,5)	10 (3,3 - 23,3)
Turbidez (UT) – média (mín - máx)	68,4 (32,8 - 88,68)	10,7 (6,1 - 20,2)			56,3 (28,1 - 138,5)	10,3 (6 - 15)
pH – média (mín - máx)	7,2 (6,5 - 7,9)	7,5 (7,1 - 8,1)	7,5 (7,6 - 7,8)	7,5 (6,6 - 8,6)	7,7 (6,8 - 9)	6,9 (6 - 7,9)
DBO (mg/L) – média (mín - máx)	222,7 (43 - 352,8)	34 (8 - 75)	408,3 (158 - 678)	74 (5 - 137)	176,2 (35 - 428)	24 (5 - 48)
DQO (mg/L) – média (mín - máx)	472,4 (180 - 771)	87,1 (33,6 - 132)	813 (287 - 1186)	116,8 (19,6 - 272)	408 (100 - 1159)	69 (12 - 168,7)
NT (mg/L) – média (mín - máx)	82,6 (17 - 147,5)	8,4 (4,76 - 12)	111	69	32,7 (1,4 - 64)	10,55 (1,1 - 20)
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L) – média (mín - máx)	20,7 (7,3 - 57,9)	18,5 (4,1 - 48,4)	72,33 (52 - 94)	38,2 (3,3 - 75,5)	84,3 (1,47 - 198)	37 (0,5 - 100)
PT (mg/L) – média (mín - máx)	1,3	0,3	16	8,65 (7,3 - 10)	13,1 (0,5 - 34)	3,4 (0,06 - 9)
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L) – média (mín - máx)	7,4	7,2 (5 - 9,4)	16	5,1 (0,9 - 8,1)	12,5 (0,4 - 26,5)	6,6 (0,2 - 12,1)
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL) – média (mín - máx)	3,23 x 10 <sup>6</sup> (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup> )	7,1 x 10 <sup>3</sup> (43 - 10 <sup>4</sup> )	3,3 x 10 <sup>7</sup>	1,6 x 10 <sup>5</sup> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup> )	1,6 x 10 <sup>6</sup> (10 <sup>2</sup> - 10 <sup>6</sup> )	1,5 x 10 <sup>5</sup> (0 - 10 <sup>5</sup> )
C. Termo (NMP/100mL) – média (mín - máx)	5 x 10 <sup>8</sup> (10 <sup>5</sup> - 10 <sup>9</sup> )	4,7 x 10 <sup>2</sup>			2,3 x 10 <sup>7</sup> (10 <sup>2</sup> - 10 <sup>7</sup> )	2,1 x 10 <sup>2</sup>

Em relação a concentração média de nutrientes no esgoto bruto gerado em cenário urbano, cabe ressaltar que poucos estudos discorreram sobre esses parâmetros, reduzindo a população de amostra desses dados. Os sistemas residenciais unifamiliares apresentaram as concentrações mais reduzidas de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PT e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, com 20,7 mg/L, 1,3 mg/L e 7,4 mg/L, respectivamente. Em relação aos valores médios de NT, essa categoria apresentou um valor

mais elevado do que nos sistemas prediais comerciais, com 82,6 mg/L e 32,7 mg/L, respectivamente. A fração amoniacal do nitrogênio foi a que sofreu menor redução após tratamento em sistemas de WC-FSS nos sistemas residenciais unifamiliares, com uma redução de apenas 10,3%, enquanto que nos demais houve uma redução mais significativa. Inclusive, o sistema U6 (Tabela 13) apresentou uma concentração superior de  $\text{NH}_4^+$  após o tratamento de esgoto bruto em SH, com valor de pós-tratamento em TS+FAN de 7,3 mg/L e valor de saída do SH de 12,2 mg/L. O autor justificou esse resultado devido ao período de análises corresponder a fase inicial de operação do sistema, com processo de colonização do substrato pelo biofilme bacteriano ainda não ter sido desenvolvido plenamente, assim como desenvolvimento reduzido da zona radicular e da parte aérea das macrófitas (TESKE, 2016).

De acordo com von Sperling (1995), a concentração típica do esgoto é de 350 mg/L de SST, 300 mg/L de DBO, 600 mg/L de DQO, 45 mg/L de NT, 25 mg/L de  $\text{NH}_4^+$  e 7 mg/L de PT. Percebe-se que os sistemas residenciais multifamiliares são os que mais se aproximam desses valores acerca os parâmetros físicos e valores referentes a matéria orgânica, enquanto que as demais categorias apresentam valores médios inferiores. Nas demais categorias, valores médios inferiores ao relatados pela literatura foram contabilizados. Já os valores dos parâmetros microbiológicos do esgoto gerado em cenário urbano apresentaram concentrações entre  $10^3$  e  $10^7$  NMP/100mL, valores inferiores comparados aos valores típicos de esgoto doméstico relatado pela literatura, entre  $10^6$  e  $10^9$  NMP/100mL (von SPERLING, 1995). Após o tratamento, houve uma redução média de 2,05 unidades logarítmicas para *E. Coli* e de 3,3 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes. Entretanto, deve-se ressaltar que quase a totalidade dos sistemas não realizou análise da água residuária pós-etapa de desinfecção, a qual é responsável pela redução significativa desses parâmetros, ressaltando-se que, portanto, a eficiência global de tratamento microbiológico tende a ser superior.

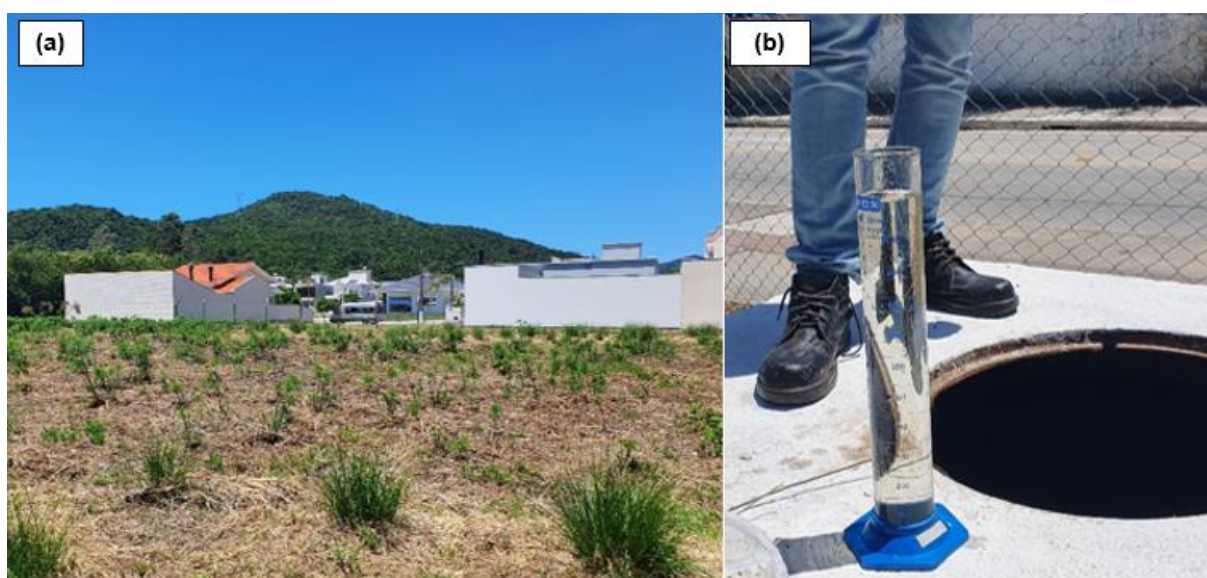
De modo geral, evidencia-se que os sistemas implementados para o tratamento de esgoto doméstico gerado em residenciais multifamiliares tendem a receber um efluente com concentrações mais elevadas de poluentes. Nesse sentido, reforça-se a escolha de tecnologias de tratamento primário eficientes, de forma a conservar o leito filtrante dos wetlands, corroborando com a eficiência global do sistema e atendimento das normas exigidas para destinação dessa água residuária tratada. Nos casos levantados, as tecnologias empregadas foram decanto-digestores, entre TS e RAC, e um caso (sistema U8 – Tabela 13) empregando UASB a montante de um WCH com 4 módulos, atendendo um E.P. de 1.000 moradores e vazão



de 43,2 m<sup>3</sup>/d. Após o tratamento primário, o WCH recebeu um efluente com concentrações médias de SST e DQO de 57,2 mg/L e 185,4 mg/L, respectivamente (FERREIRA, 2013).

Outro caso categorizado no contexto residencial multifamiliar, foi o sistema U10a (Tabela 13) localizado em Palhoça/SC e projetado para o atendimento de 2.200 moradores, com um arranjo tecnológico composto por RAC seguido de WCV-FS com 4 módulos operando de forma cruzada (2x2) com uma área total de 3.141 m<sup>2</sup> e tanque de contato para cloração do efluente tratado (Figura 27a). Como apontado por Trein (2015), no período de levantamento de dados, o residencial estava ocupado apenas por 4,5% da sua capacidade total, portanto o sistema estava operando em condições inferiores pelo qual foi projetado. Atualmente, o sistema se encontra operando com um E.P. e vazão superiores, com efluente final atendendo as condições exigidas para sua destinação em corpo receptor, sem odor, transparente e incolor, como ilustrado na Figura 27b.

Figura 27 - Residencial multifamiliar atendido pelo sistema descentralizado (WCV-FS) – Palhoça/SC (a) e efluente final (b).



Fonte: da autora.

Outro sistema aplicado em escala real para o tratamento de esgoto doméstico gerado em residências em área urbana, nesse caso em escala unifamiliar, localizado no município de Colombo/PR, situado na Região Metropolitana de Curitiba, está ilustrado na Figura 28a. Como

relatado pela residente do local, na comunidade ocorre a prática de destinação do esgoto doméstico não tratado diretamente no rio pelas demais residências, sem nenhuma forma de tratamento. O sistema instalado é composto por duas tecnologias de tratamento primário (fossa séptica e “bioete”), WCH e filtro de areia. Após o tratamento, a água residuária tratada é destinada para o rio Atuba. Como informado pela residente, há um projeto em andamento para aproveitamento dessa água para irrigação de plantas ornamentais, cuja estrutura para a execução da prática já se encontra junto ao sistema, mas ainda não está em operação. O WCH é plantado com a macrófita Íris e possui brita como material filtrante, como ilustrado na Figura 28b. A moradora afirmou que o sistema tem funcionado perfeitamente e opera a aproximadamente 1 ano, não há emissão de odor, atração de insetos e, também, não ocorreu colmatção do filtro durante esse período de operação.

Figura 28 - Residências atendidas pelo sistema descentralizado em Colombo/PR (a) e WCH que compõe o arranjo tecnológico do sistema (b).

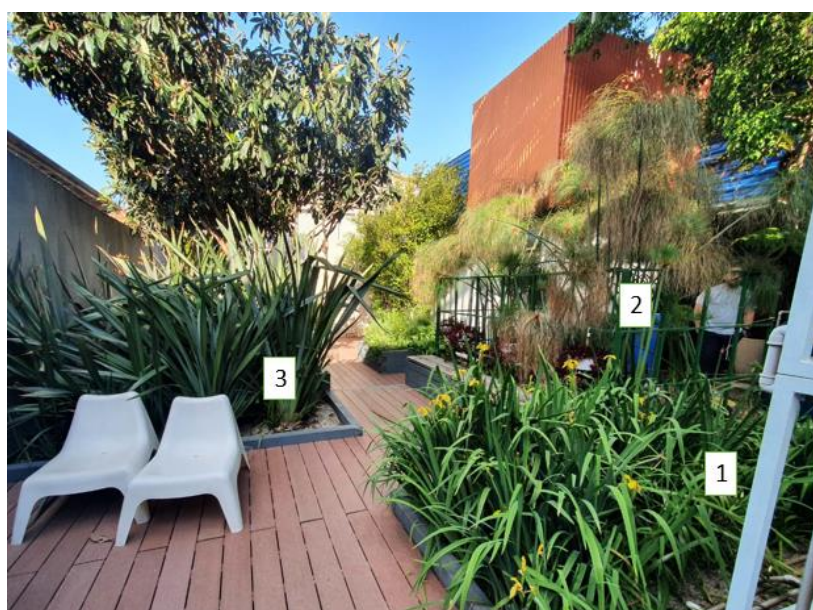


Fonte: da autora.

Por fim, o último sistema visitado em cenário urbano foi um escritório de engenharia localizado em Curitiba/PR. A edificação comercial realiza o aproveitamento de água da chuva e o reuso de 100% do esgoto doméstico gerado, sendo que o primeiro é responsável pelo abastecimento das pias, chuveiros e também pela irrigação da parede verde instalada na fachada do escritório, enquanto que o reuso das águas residuárias é direcionado para as descargas

sanitárias. O sistema descentralizado é responsável pelo tratamento de todo o esgoto gerado, sem a necessidade de segregação de águas cinzas e negras. Com a capacidade de tratamento para 30 pessoas, conta com um reator em bateladas sequenciais (RBS) anaeróbio seguido de RBS aeróbio, três unidades em série de Wetlands Construídos modificados, vegetados com Íris Amarela, Papiro e Formio (Figura 29), finalizando com unidade de processo oxidativo avançado com recirculação seguido de cloração.

Figura 29 - Wetlands Construídos plantados com Íris Amarelo (1), Papiro (2) e Formio (3) – Curitiba/PR.



Fonte: da autora.

A modalidade empregada nesse sistema foi modificada de modo a evitar a colmatação do leito filtrante, no qual através de uma estrutura de piso elevado (Figura 30), forma-se uma lâmina d'água abaixo da superfície em que as macrófitas estão plantadas, sendo que suas raízes ficam em contato direto com o efluente que escoar livremente (Figuras 31). Portanto, as raízes das macrófitas, que formam uma rede através do seu entrelaçamento natural, associados ao biofilme formado, são responsáveis pelo tratamento do esgoto (Figura 32). A superfície do leito é preenchida com brita ou cascalho. Como apontado, é realizado aproveitamento de 100% do efluente recuperado para fins de reuso em descargas sanitárias e são realizadas amostras semestrais para avaliar a adequação do reaproveitamento desse recurso.

Figura 30 - Estrutura que permite a elevação da superfície dos Wetlands Construídos.



Fonte: da autora.

Figura 31 - Escoamento livre do esgoto abaixo da superfície do sistema.



Fonte: da autora.

Figura 32 - Raízes da macrófita Formio.



Fonte: da autora.

### 5.2.2. Cenário Rural

Assim como observado nos estudos de caso acerca o aproveitamento da água recuperada, notadamente predomina-se sistemas de Wetlands construídos no tratamento de esgoto doméstico aplicados em cenário rural quando comparado aos demais cenários. Nesse caso, contabilizou-se 29 estudos com 39 sistemas no total, sendo 23 instalados em residências unifamiliares, 7 em residências multifamiliares e 9 em empreendimentos semicoletivos, tais como hotéis campestres, escolas e centros de treinamento. Dados gerais sobre os sistemas rurais estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15 - Visão geral de diferentes configurações de wetlands construídos para tratamento de esgoto doméstico localizados em cenário rural (Continua).

Cenário Rural								
WC-FSS	Núm. Sistema	Cidade/UF	Efluente (tipo)	E.P.	TAH (mm/d)	Q (m <sup>3</sup> /d)	Área WC (m <sup>2</sup> )	Referência
<b>Residencial unifamiliar</b>								
<b>WCH</b>	R1	Floraí/PR	água cinza	4	-	0,56	3	Souza et al. (2013)
	R2	Conceição do Mato Dentro/MG	bruto	6	-	-	1	Almeida et al. (2020)
	R3	Rio Piracicaba/MG	água negra	8	-	1,28	4,33	Souza et al. (2020)
	R4	Visconde do Rio Branco/MG	água cinza	-	-	0,48	-	Pires (2012)
	R5	Luziânia/PR	bruto	-	-	-	-	Lima et al. (2015)
	R6a	Agudo/RS	bruto	5	-	<100	5	Maier (2007)
	R6b		bruto	5	-	<100	5	Maier (2007)
	R7	Irati/PR	bruto	5	-	-	5,75	Schirmer et al. (2009)
	R8	Palhoça/SC	água cinza	3	-	0,45	8	Rizzon (2020)
	R9	Santo Amaro da Imperatriz/SC	bruto	4	-	0,5	6	Guimarães (2013)
	R10	Três de Maio/RS	bruto	8	-	1,28	12	Sartor et al. (2021)
	R11	Peabiru/PR	bruto	4	-	-	-	Locastro et al. (2013)
R12	Vera Cruz/RS	bruto	-	-	0,6	20	Lutterback et al. (2018)	
<b>WCV</b>	R13	Marabá/PA	bruto	2	-	-	1,96	Silva et al. (2017)
	R14a	Araricá/RS	bruto	2	53,3	0,16	3	Timm (2015)
	R14b	Canela/RS	bruto	12*	16,5	0,2	12	Timm (2015)
	R15	Barbalha/CE	água cinza	4	-	-	3,6	Leite et al. (2020)
	R16a	São José dos Pinhais/PR	bruto	3	-	0,36	4	Sabei (2015)
	R16b	São José dos Pinhais/PR	bruto	4	-	0,48	2,5	Sabei (2015)
	R17a	Campo Mourão/PR	bruto	3	-	0,36	4	Parolin et al. (2012)
R17b	Rancho Alegre d'Oste/PR	bruto	3	-	0,36	4	Parolin et al. (2012)	
R17c	Corumbataí do Sul/PR	bruto	3	-	0,36	4	Parolin et al. (2012)	
<b>SH</b> (WCH - WCV)	R18	Campo Grande/MS	água cinza	-	150,9	0,7	4,64 <sup>1</sup> 2,27 <sup>2</sup>	Pansonato (2010)

Tabela 15. Visão geral de diferentes configurações de wetlands construídos para tratamento de esgoto doméstico localizados em cenário rural (Continuação).

Cenário Rural								
WC-FSS	Núm. Sistema	Cidade/UF	Efluente (tipo)	E.P.	TAH (mm/d)	Q (m <sup>3</sup> /d)	Área WC (m <sup>2</sup> )	Referência
<b>Residencial multifamiliar</b>								
<b>WCH</b>	R19	Apodi/RN	bruto	107	-	1,93	8	Batista et al. (2013)
	R20	Botucatu/SP	bruto	60	-	-	3,6	Salaro Júnior (2008)
	R14c	Nova Hartz/RS	bruto	50	133,3	4	30	Timm (2015)
	R14d	Nova Hartz/RS	bruto	50	70	5,6	80	Timm (2015)
	R21	São José dos Pinhais/PR	bruto	600	-	-	128	Rosa et al. (2013)
<b>WCV</b>	R16c	São José dos Pinhais/PR	bruto	160	-	4	12	Sabei (2015)
	R16d	São José dos Pinhais/PR	bruto	450	-	11,25	9	Sabei (2015)
<b>Semicoletivo de serviços</b>								
<b>WCH</b>	R22	Palmeira/PR	bruto	-	-	6,89	70	Rosa et al. (2015)
	R23	Brasília/DF	bruto	-	-	0,49	48,7	Sérvulo et al. (2019)
	R24	Campos Novos/SC	bruto	85	0,014	-	154	Rodrigues (2012)
	R25	Francisco Beltrão/PR	bruto	157	-	-	-	Silveira e Arsego (2014)
<b>WCV</b>	R26	Nova Hartz/RS	bruto	200	104,2	1,25	12	Timm (2015)
	R27	Sumaré/SP	bruto	3000	163	0,45	2,75	dos Santos e Roston (2016)
<b>WCH</b>	R28	Agronômica/SC	bruto + processamento de leite	200	-	1,59	340	Rouso (2014)
	R29	Tubarão/SC	bruto	150	-	-	72	Phillipi e Sezerino (2006)
<b>SH</b> (WCV - WCH)	R30	Videira/SC	bruto	50	-	8,5	70 <sup>1</sup> 50 <sup>2</sup>	Monteiro et al. (2013)

Legenda: WC-FSS = Wetland construído de fluxo subsuperficial; E.P. = equivalente populacional; TAH = Taxa de Aplicação Hidráulica; Q = vazão aplicada; WCH = Wetland construído de fluxo horizontal; WCV = Wetland construído de fluxo vertical; SH = Sistema híbrido; \* = exceção para categoria “residencial unifamiliar” (atendendo a E.P. de 2 a 5 pessoas durante a pesquisa); <sup>1</sup> = Área no primeiro módulo; <sup>2</sup> = Área no segundo módulo.

A modalidade WCH predominou entre os sistemas, com um total de 23 unidades. Além disso, 12 sistemas empregaram WCV e apenas duas localidades implantaram SH para o tratamento do esgoto doméstico, com um sistema empregando um módulo de WCH seguido por WCV para o tratamento de água cinza gerada em uma residência unifamiliar com uma vazão média de 0,7 m<sup>3</sup>/dia e o outro sistema associando um WCV seguido por WCH para o

tratamento de esgoto bruto de um centro de treinamento da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) com uma vazão média de 8,5 m<sup>3</sup>/dia.

A partir das informações observadas entre os cenários, evidencia-se a distintas condições pelas quais os sistemas de WC-FSS são submetidos de acordo com o contexto inserido. Nas residências unifamiliares os wetlands ocuparam uma área total entre 1 e 20 m<sup>2</sup>, recebendo uma vazão afluente não superior a 1,28 m<sup>3</sup>/dia. Ressalvas para o sistema R14b (Tabela 15), o qual foi projetado para atender até 12 moradores, mas conforme apontado por Timm (2015), durante o período de monitoramento este sistema atendeu uma demanda de uso entre 2 e 5 pessoas, com uma produção média de 0,2 m<sup>3</sup>/dia de esgoto bruto. Nessa categoria, apesar de ocorrer majoritariamente o tratamento de esgoto bruto, alguns sistemas realizam a segregação do efluente, com alguns casos realizando o tratamento de água cinza e um caso avaliando o tratamento de água negra em um WCH, enquanto que nas categorias residencial multifamiliar e semicoletivo de serviço é realizado o tratamento do esgoto bruto em todos os sistemas.

Os sistemas instalados em residenciais multifamiliares atenderam um equivalente populacional entre 50 e 600 moradores, com uma vazão de esgoto variando entre 1,93 m<sup>3</sup>/dia e 11,25 m<sup>3</sup>/dia e uma área total entre 3,6 m<sup>2</sup> e 128 m<sup>2</sup>. Segundo Batista et al. (2013), o sistema R19 (recebendo a menor vazão) (Tabela 15) foi dimensionado de modo a receber uma vazão de 1 m<sup>3</sup>/dia, taxa de aplicação de 400 kg de DBO.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e concentração típica de DBO do esgoto doméstico de 300 mg/L, de acordo com as recomendações de Matos (2007). Esse sistema atende parcialmente o esgoto gerado em um assentamento com 107 moradores habitando 28 moradias e é precedido de um decanto-digestor, constituído por tanque séptico com duas câmaras, gradeamento e dois filtros anaeróbios de fluxo descendente, seguido pelo WCH e com desinfecção do esgoto tratado por reator solar (BATISTA et al., 2013).

Já os sistemas semicoletivos atenderam um equivalente populacional de até 3000 pessoas, sendo este o caso do sistema R27 (Tabela 15), um local de eventos. Nesse sistema, o arranjo tecnológico é composto por LAB, que alimenta intermitentemente o WCV, implantado em duplicada com alternância na sua alimentação. De acordo com os autores, o sistema apresentou desempenho robusto e boa capacidade tampão, principalmente tendo em vista a população flutuante entre os eventos, no qual o sistema recebeu contribuição de até 3000 pessoas por 3 dias ininterruptos e alto carregamento orgânico (DOS SANTOS e ROSTON, 2016).



Acerca os valores de TAH adotados, nota-se que o valor máximo empregado dentre os sistemas foi adotado no sistema R27 (Tabela 15) com 163 mm/d, dentro da faixa recomendada pela literatura. Ainda é importante destacar a baixa TAH de 0,014 mm/dia aplicada no sistema R24 (Tabela 15), uma escola em zona rural. Os autores justificam esse valor reduzido devido à pouca contribuição de vazão afluyente no sistema com um volume médio mensal de 20,1 m<sup>3</sup>, além do período de férias no mês de janeiro no qual não houve contribuição alguma. Esses fatores associados à taxa de evaporação e a transpiração das plantas, interferiram significativamente na redução da vazão efluente do sistema (RODRIGUES, 2012). Por fim, os valores com a composição média do esgoto gerado em cenário rural e sua composição após tratamento em sistemas wetlands construídos estão descritos na tabela 16.

Diferente do observado em cenário urbano, o esgoto doméstico gerado em cenário rural apresentou características mais dispersas entre as categorias. O esgoto gerado em residências unifamiliares apresentou elevadas concentrações de SST, DBO e DQO, NT e PT quando comparadas às demais categorias, com valores médios de 512 mg/L, 1192 mg/L, 3466 mg/L, 333 mg/L e 29,7 mg/L, respectivamente. Valores elevados de SST e DQO, correspondentes a 771 mg/L e 2016 mg/L respectivamente, foram obtidos no esgoto bruto do sistema R9 (Tabela 15) devido à presença de fezes nas amostras coletadas na caixa de passagem (GUIMARÃES, 2013). Outro sistema que apresentou elevada carga orgânica, com uma DBO média de 4620 mg/L e DQO média de 16064 mg/L foi o sistema R6a (Tabela 15), além de apresentar concentrações médias de 523,2 mg/L de NT e 72,8 mg/L de PT no esgoto bruto coletado, justificado pelo autor pela recorrente obstrução da entrada para a ETE, a partir da presença de resíduos em conjunto a água residuária como restos de alimentos e outros materiais não orgânicos provenientes da limpeza doméstica e dos hábitos dos moradores (MAIER, 2007).

Nos contextos residenciais multifamiliares e semicoletivo de serviço, os valores médios de DBO e DQO também se apresentaram elevados, com destaque para o sistema R26 (local de eventos) (Tabela 15) que apresentou uma DBO elevada, equivalente a 11.990 mg/L, justificada pelo autor devido a mistura do efluente cloacal e da gordura proveniente da água da cozinha (TIMM, 2015). Ao comparar esses valores médios com os resultados obtidos em cenário urbano, assim, como valores de SST e turbidez, nota-se que os esgotos domésticos gerados em cenário rural possuem concentrações de poluentes mais elevadas, tendência que ocorre comumente em lugares com reduzido consumo per capita de água (von SPERLING, 1995).

Ainda assim, percebe-se uma redução significativa desses poluentes após o tratamento em sistemas de WC-FSS, mas ainda concentrações superiores comparadas às obtidas em cenário urbano.

Tabela 16 - Composição média do efluente bruto gerado nos diferentes contextos instalados em cenário rural e composição média do efluente pós-tratamento em wetlands.

Cenário Rural						
Parâmetros	Res. Unifamiliar		Res. Multifamiliar		Semicoletivo de serviços	
	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado
SST (mg/L) – média (mín - máx)	512 (68 - 1320)	30,8 (4 - 56,5)	316,8 (200 - 550)	59,2 (24,2 - 112,5)	317,1 (37,4 - 640)	38,8 (5 - 84)
Turbidez (UT) – média (mín - máx)	365,9 (25 - 1135)	25,9 (3 - 88)	560,9 (174,2 - 1717,5)	39,7 (16,7 - 63,2)	105,68 (31,1 - 219)	60,3 (2,2 - 187)
pH – média (mín - máx)	7,2 (5,4 - 8,2)	7,1 (6,1 - 8,3)	6,9 (5,9 - 7,5)	7,2 (6,5 - 8,6)	6,8 (5,8 - 8,5)	6,7 (6 - 7,7)
DBO (mg/L) – média (mín - máx)	1192 (140,2 - 1946)	41,2 (3 - 156)	676,7 (261 - 1894)	84,2 (20,9 - 153,5)	2655,1 (21,7 - 11990)	21,4 (2,4 - 35)
DQO (mg/L) – média (mín - máx)	3466 (339 - 16064)	151 (15,7 - 788)	1210,4 (603,7 - 3307,7)	229,8 (121 - 412,8)	714,5 (46 - 1826,4)	64,2 (3,3 - 209,3)
NT (mg/L) – média (mín - máx)	333 (48,1 - 713,9)	76,8 (1,1 - 262)	101,6 (59,1 - 130,9)	40,7 (19,5 - 61,1)	32 (6,8 - 48)	13,8 (3,3 - 30,2)
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L) – média (mín - máx)	116 (0,9 - 504,5)	41,7 (0,3 - 229)	127 (65 - 229)	63,7 (41,9 - 78,4)	26,9 (5,5 - 61,5)	8,7 (1,6 - 18,5)
PT (mg/L) – média (mín - máx)	29,7 (3,6 - 91)	6,9 (0,1 - 38)	14,5 (1,9 - 28,5)	7,2 (1,8 - 11,2)	5,3 (0,6 - 13,7)	1,5 (0,2 - 2,7)
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L) – média (mín - máx)	76,7 (66 - 87,4)	7,2 (2,9 - 13)			23,2 (14,7 - 31,4)	3,9 (1,5 - 7,4)
<i>E. coli</i> (NMP/100mL) – média (mín - máx)	1,3 x 10 <sup>6</sup> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>6</sup> )	9,5 x 10 <sup>4</sup> (3,15 - 10 <sup>5</sup> )	3,2 x 10 <sup>7</sup> (10 <sup>5</sup> - 10 <sup>8</sup> )	2,4 x 10 <sup>6</sup> (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup> )	2,6 x 10 <sup>7</sup> (10 <sup>2</sup> - 10 <sup>7</sup> )	1,7 x 10 <sup>4</sup> (10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup> )
<i>C. Termo</i> (NMP/100mL) – média (mín - máx)	1,1 x 10 <sup>7</sup> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>7</sup> )	7,3 x 10 <sup>5</sup> (61,5 - 10 <sup>6</sup> )	6,1 x 10 <sup>6</sup> (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup> )	6,7 x 10 <sup>3</sup> (10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup> )	8,5 x 10 <sup>5</sup> (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup> )	3,3 x 10 <sup>4</sup> (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup> )

Acerca a presença de nutrientes do esgoto bruto, valores mais elevados de NT, PT e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> foram relatados também nos sistemas residenciais unifamiliares, com concentrações médias de 333 mg/L, 29,7 mg/L e 76,7 mg/L. Já NH<sub>4</sub> se encontrou mais elevado nos sistemas residenciais multifamiliares, com um valor médio de 127 mg/L. Esses parâmetros reduziram de forma significativa em todos os contextos, com destaque para o sistema R14a e R14b (Tabela 15), ambos atendendo o esgoto bruto de residências unifamiliares com o arranjo TS+FAN seguido por WCV, com eficiências de remoção de 96% e 92,8% de NT, 98% e 94% de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e 97,2% e 95,6% de PT, respectivamente (TIMM, 2015).

Os parâmetros microbiológicos do esgoto bruto gerado entre os sistemas variaram entre  $10^3$  e  $10^8$  NMP/100 mL, com uma água residuária tratada com valores entre 3,15 e  $10^6$  NMP/100 mL, com uma redução média de 1,5 unidades logarítmicas de *E. Coli* e 3 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes, pouco menor quando comparado aos valores obtidos em cenário urbano apesar da maioria dos sistemas não ter adotado etapa de desinfecção.

É interessante observar que as concentrações médias de composição do esgoto bruto nos sistemas semicoletivos de serviço não se mostraram muito elevadas, entretanto percebe-se uma grande variação entre os valores de amostras, com valores extremos principalmente de DBO e SST. Isso ocorre devido à natureza dessas localidades, já que são em sua maioria locais de eventos, hotéis e escolas, os quais possuem uma população flutuante e, portanto, grande variação de carga hidráulica e orgânica afluyente aos sistemas de tratamento. Desse modo, a escolha por uma tecnologia resiliente e robusta é primordial para assegurar o tratamento e destinação adequada das águas residuárias.

### **5.2.3. Cenário Periurbano (“bairros-cidade”)**

Para enquadramento em cenário de atendimento de “bairros-cidade”, foram considerado os sistemas instalados em zona periurbana, portanto em área de transição entre os espaços urbanos e rurais, responsáveis pelo tratamento do esgoto sanitário gerado por uma população superior a 1.000 habitantes. Nesse sentido, 5 sistemas foram contabilizados, com ocupação predominante nas regiões Sul e Sudeste. Dados gerais sobre esses sistemas estão apresentados na Tabela 17.

O equivalente populacional desses sistemas variou expressivamente, entre 1.400 e 144.000, com uma mediana de 3.400 pessoas atendidas. É válido salientar que nos sistemas em que houve atendimento de uma população mais significativa, os wetlands foram empregados como tecnologia de tratamento terciário dos efluentes, com o emprego de lagoas de estabilização a montante, como observado nos sistemas B2 e B5 (Tabela 17). Todas as ETEs atuam com tratamento preliminar (gradeamento, caixa de areia, calha Parshall) a montante do arranjo tecnológico.

Tabela 17 - Visão geral de diferentes configurações de wetlands construídos para tratamento de esgoto doméstico gerado em “bairros-cidade”.

Cenário Periurbano “bairros-cidade”							
WC-FSS	Núm. Sistema	Cidade/UF	E.P.	Arranjo Tecnológico	Q (m <sup>3</sup> /d)	Área WC (m <sup>2</sup> )	Referência
WCH	B1	Campos Novos/SC	3.400	FAN – WCH	-	1.352	Lourenço (2017)
	B2	Parelhas/RN	7.000	LE – WCH	30	450	Pereira (2011)
WCV	B3	Meleiro/SC	3.000	RAC – WCV – Des	-	3.900	Prefeitura Municipal de Meleiro (2013)
WCH e WCV	B4	Bauru/SP	1.400	Dec – FAN – (WCH – 336,3 WCV) – LP	305,4	305,4	Giafferis (2011)
WC-FL	B5	Araruama/RJ	144.000	LAe – LSed – WC-FL	15.000	-	Curty (2018)

Legenda: WC-FSS = Wetland construído de fluxo subsuperficial; E.P. = equivalente populacional; Q = vazão aplicada; WCH = Wetland construído de fluxo horizontal; WCV = Wetland construído de fluxo vertical; FAN = Filtro anaeróbio; LE = Lagoa de estabilização; RAC = Reator anaeróbio compartimentado; Des = etapa de desinfecção; Dec = Decantador primário; LP = Lagoa de polimento; LAe = Lagoa aerada; LSed = Lagoa de sedimentação; WC-FL = Wetland construído de fluxo livre.

A modalidade WCH predominou entre os sistemas, com uma área total de 1.352 m<sup>2</sup> e 450 m<sup>2</sup> nos sistemas B1 e B2 (Tabela 17), respectivamente. No sistema B1 (Tabela 17), o WCH opera com duas unidades sequenciais em paralelo, totalizando quatro módulos (338 m<sup>2</sup> cada módulo), enquanto que em B2 (Tabela 17) é de módulo único. O sistema é precedido por uma unidade de FAN no sistema B1 (Tabela 17), para o atendimento de um bairro com aproximadamente 3.400 moradores, e por uma Lagoa Facultativa no sistema B2 (Tabela 17), onde o WCH recebe parcialmente o esgoto tratado por essa unidade, a qual atende uma população de 7.000 habitantes. Já o sistema B3 (Tabela 17) emprega a modalidade WCV para o atendimento de duas zonas do município, totalizando 3.000 moradores, no qual o sistema é precedido de RAC e ocupa uma área total de 3.900 m<sup>2</sup>. Um sistema composto por três módulos operando em paralelo (um módulo de WCH e dois módulos de WCV) é adotado no sistema B4 (Tabela 17), o qual foi projetado para atender a 350 economias, equivalente a 1.400 moradores aproximadamente. Esse sistema ocupa a menor área dentre os demais, com um total de 305,4 m<sup>2</sup> e cada módulo ocupando 101,8 m<sup>2</sup>, sendo esses precedidos de decantador primário e filtro anaeróbio de fluxo ascendente.

Diferente dos demais sistemas, operando de forma descentralizada, o sistema B5 (Tabela 17) é considerado uma ETE de grande porte por apresentar uma capacidade de tratamento de 200 L/s e atender a um município de 144.000 habitantes. De fato, é considerada a maior estação de tratamento ecológica de esgotos do Brasil, empregando soluções baseadas na natureza como tecnologias de tratamento de esgoto sanitário. Considerando as lagoas de

estabilização (aerada facultativa e de sedimentação) e os wetlands de fluxo superficial, a estação ocupa uma área total de 6,8 hectares. O autor ressalta como vantagens da ETE ecológica a contribuição paisagística das macrófitas empregadas no sistema, conservando os ecossistemas aquáticos e terrestres, o reaproveitamento de subprodutos gerados no processo de tratamento, como lodo e plantas transformados em adubo orgânico, além de operação simplificada na ETE, que não necessita de produtos químicos e baixo consumo de energia (CURTY, 2018). A composição média do esgoto bruto tratado nesses sistemas e sua composição após o tratamento em wetlands está disscorrida na Tabela 18.

Tabela 18 - Composição média do efluente bruto gerado nos diferentes contextos instalados em “bairros-cidade” e composição média pós-tratamento em wetlands.

Cenário Periurbano “bairros-cidade”								
Parâmetros	B1		B2		B4		B5	
	Primário	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado	Bruto	Tratado
SST (mg/L)	578	289	-	-	-	-	-	-
Turbidez (UT)	194	30,7	-	-	-	-	-	-
pH	7,2	7,4	-	-	6,5	6,1	-	-
DBO (mg/L)	200	72	-	-	370	39	684,4	32
DQO (mg/L)	456	175	-	-	696	78	3870	98
NT (mg/L)	126,5	86,2	73	59,1	35,9	25,5	104,9	8,4
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	-	-	-	-	28,4	25,5	-	-
PT (mg/L)	3,1	2,8	-	-	-	-	24,8	0,4
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	-	-	-	-	10,5	9,5	-	-
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	-	-	-	-	-	-	>24196	3448

Como observado na tabela, apenas o sistema B1 (Tabela 18) discorreu sobre parâmetros físicos, com concentrações de SST de 578 mg/L e turbidez de 194 UT no efluente primário. Vale ressaltar que o efluente bruto não foi objeto de análise no estudo desenvolvido por Lourenço (2018), apenas concentrações de água residuária após o tratamento primário (FAN) e secundário (WCH). O autor ainda ressalta que, devido ao mau desempenho do FAN, o WCH recebeu um elevado aporte de SST, aproximadamente seis vezes superior ao recomendado pela literatura de 100 mg/L, o que pode contribuir com a redução do desempenho do WCH a longo prazo na remoção de poluentes e com a colmatação do leito filtrante. Entretanto, as unidades apresentaram valores satisfatórios durante o período de monitoramento, com remoção média de 50% de SST e 84% de turbidez (LOURENÇO, 2018).

Valores de matéria orgânica foram reportados entre os demais estudos, averiguando-se concentrações médias de entrada nos sistemas de 418,1 mg/L de DBO, 1674 mg/L de DQO. Esses valores encontram-se ainda inferiores às médias calculadas em contextos inseridos em cenário rural, mas superiores aos valores encontrados em cenário urbano, evidenciando essa zona de transição entre os cenários. O nitrogênio total foi o parâmetro mais discutido nos sistemas inseridos nesse cenário, com uma média no esgoto bruto de 85,1 mg/L de NT e no efluente tratado de 44,8 mg/L. Isso deve-se ao direcionamento e objetivo dos estudos com vista ao reaproveitamento desse nutriente através do reuso da água residuária para fertirrigação de culturas. Segundo Pereira (2011), no sistema B2 (Tabela 18), a obtenção de NT foi de aproximadamente 59,08 mg/L.dia, o qual, considerando uma vazão garantida de 30.000 L/dia, significa obter no sistema a quantidade equivalente a 1,78 kg de NT/dia. O autor ressalta que, com a aplicação desse sistema de tratamento em todos os municípios do Território Cidadania Seridó, região formada por 25 municípios do Rio Grande do Norte, haveria uma disponibilidade de 1.144,7 kg NT/dia.

Uma das ETEs categorizada para o atendimento de “bairros-cidades” está instalada no município de Meleiro/SC para o tratamento do esgoto sanitário de duas zonas localizadas na área urbana da cidade, como ilustrado na Figura 33, sendo este o sistema B3. O sistema foi projetado para a contribuição de uma população equivalente de 3000 pessoas, mas, atualmente, apenas 200 residências estão ligadas na rede de coleta, totalizando uma contribuição aproximada de 800 pessoas. Como informado pelo diretor da SAMAE, autarquia responsável pela operação e manutenção do sistema de tratamento, o sistema se mostra estável e oferece o tratamento eficaz do efluente recebido, gerando um produto com qualidade mais refinada do que a água coletada no corpo hídrico para tratamento e posterior abastecimento de água da cidade.

O arranjo tecnológico empregado na ETE é de RAC seguido pelo WCV e pós-tratamento através de desinfecção por cloração em tanque de contato. Após, o efluente tratado é direcionado ao corpo hídrico localizado nas proximidades da ETE. No município, predominava a produção agrícola como atividade econômica, principalmente a partir do cultivo de arroz, cultura comumente irrigada por inundação contínua na região Sul do país, requerendo, portanto, grandes volumes de água (MOTA et al., 1990).

Figura 33 - Bairro-cidade atendido pelo sistema descentralizado (WCV) – Meleiro/SC.



Fonte: da autora.

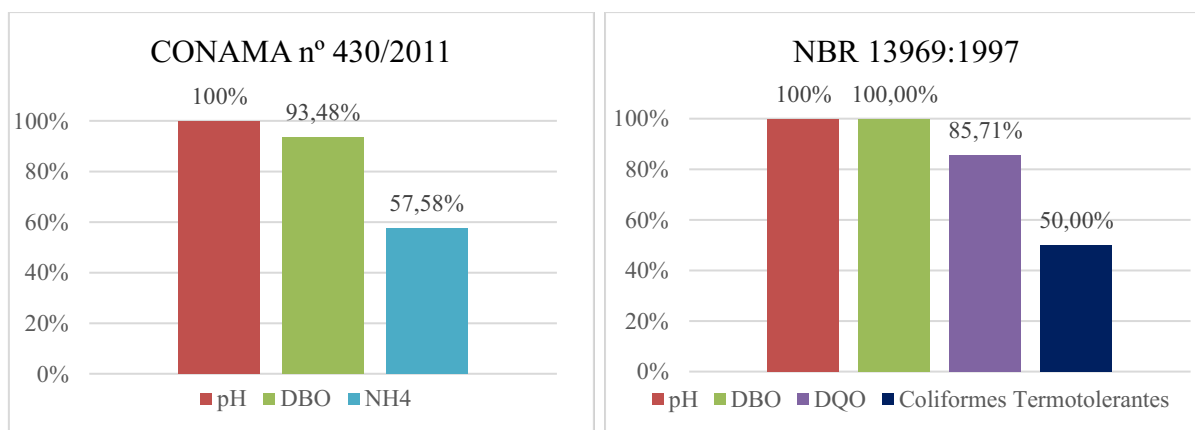
#### 5.2.4. Performance nos sistemas e potencialidade de reuso

Conforme os valores apresentados em termos de composição do efluente final, avalia-se a frequência de sistemas que se enquadram nos valores máximos de concentração ou eficiência mínima de remoção para lançamento adequado da água residuária no corpo receptor. Nesse sentido, a Resolução Conama nº 430/2011 exige um efluente com pH entre 5,0 e 9,0, com DBO de até 120 mg/L (ou eficiência de remoção de 60%) e uma concentração de até 20 mg/L de  $\text{NH}_4$ , configurando essas como condições e padrões de lançamento de efluentes em território nacional (BRASIL, 2011). Assim, como ilustrado na Figura 34, verificou-se que todos os sistemas apresentam pH dentro da faixa permitida, 93,48% dos sistemas atenderam com as condições acerca DBO e 57,58% acerca as condições para  $\text{NH}_4$ . Ressalta-se que nenhum dos sistemas multifamiliares (tanto em cenário urbano quanto rural) atingiu os valores exigidos de  $\text{NH}_4$ , com exceção ao sistema U10a (Tabela 13), o qual estava subocupado no período de monitoramento de pesquisa.

Alguns sistemas instalados em cenário urbano optaram pela destinação da água residuária tratada na rede de drenagem pluvial, a qual é regulamentada pela normativa NBR 13969:1997, exigindo um efluente final com pH entre 6,0 e 9,0, DBO inferior a 60 mg/L, DQO inferior a 150 mg/L e uma concentração máxima de 1.000 NMP/100mL de coliformes

termotolerantes (CT) (ABNT, 1997). Sendo assim, sete sistemas optaram por essa opção, sendo que todos atingiram os valores de pH e DBO exigidos, enquanto que 85,7% e 50% destes atenderam aos limites exigidos para DQO e CT, respectivamente (Figura 34). Evidencia-se que o efluente final do sistema U10b (Tabela 13), apresentou concentrações de 168,7 mg/L de DQO e  $8,8 \times 10^6$  NMP/100mL de CT, entretanto esse valor corresponde ao efluente antes da etapa de desinfecção, que ocorre nesse sistema por cloração, portanto ainda há uma redução de CT antes da destinação dessa água residuária.

Figura 34 - Frequência de enquadramento na legislação nacional CONAMA nº 430/2011 e na normativa ABNT NBR 13969:1997 do efluente tratado nos WC-FSS aplicados em contexto nacional.



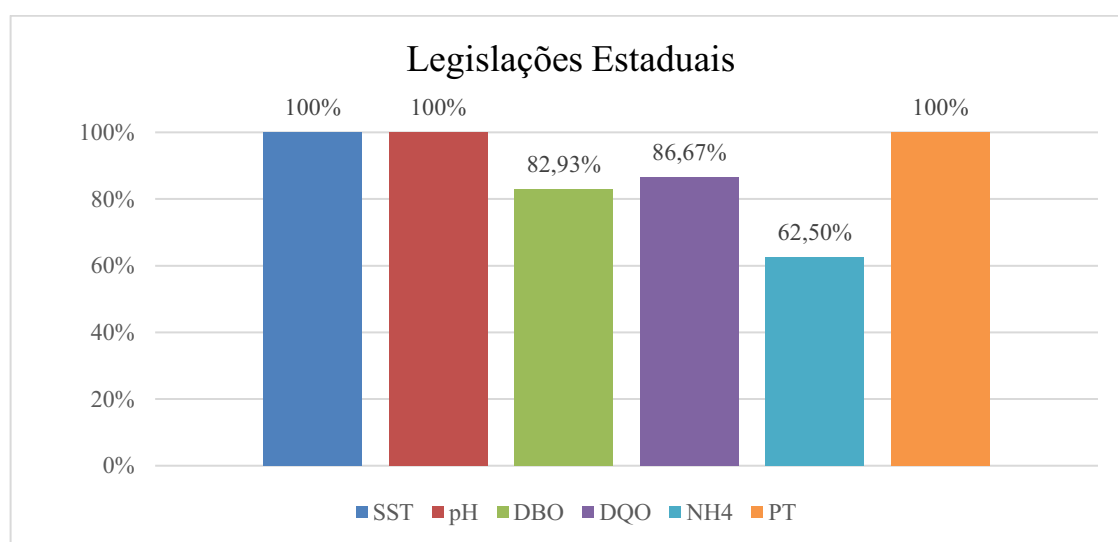
Fonte: da autora.

Além da resolução nacional, é importante averiguar as legislações estaduais, que podem ser mais restritivas quanto à Resolução Conama nº 430/2011, como nos estados de Santa Catarina, Paraná, Minas Gerais e São Paulo, os quais exigem uma DBO máxima de 60 mg/L, além da exigência de outros parâmetros não discorridos pela legislação nacional, como SST, DQO e PT. Como ilustrado na Figura 35, novamente houve uma menor alcance dos valores relativos ao NH<sub>4</sub>, com o mesmo valor máximo permitido de 20 mg/L, exigido nos estados do Rio Grande do Sul e Minas Gerais. De mesmo modo, esses valores foram detectados acima desse limite nos sistemas residenciais multifamiliares, U12 (Tabela 13), R12c e R12d (Tabela 15), com 36 mg/L, 58,5 mg/L e 41,9 mg/L respectivamente. Acerca o parâmetro PT, destaca-se que 100% dos sistemas atenderam ao exigido de concentração máxima de 4 mg/L ou



remoção de 75% no RS e SC, dentre os casos que discorreram sobre esse valor, com sistemas inseridos em cenário urbano e rural, nos contextos residenciais e semicoletivos.

Figura 35 - Frequência de enquadramento nas respectivas legislações estaduais do efluente tratado nos WC-FSS aplicados no contexto nacional.



Fonte: da autora.

Em relação a adequação da água residuária recuperada nos sistemas compostos por WC-FSS para fins de reuso, os valores médios de concentração de parâmetros no efluente final de cada categoria foram comparados aos valores recomendados pelas legislações de referência. Os sistemas Ua e Ra, referem-se aos sistemas “residenciais unifamiliares”, Ub e Rb aos “residenciais multifamiliares”, Uc e Rc aos “semicoletivos de serviços”, nos contextos urbano e rural respectivamente. No quadro 5 expõe os padrões de cores utilizados para categorização desses enquadramentos.

Quadro 5 - Classificação de cores referentes ao atendimento dos parâmetros às legislações de referência quanto ao atendimento dos padrões exigidos para reuso da água residuária tratada.

Cor	Legenda
Verde escuro	Atende a todas as legislações
Verde claro	Atende algumas legislações (uso irrestrito e/ou restrito)
Amarelo	Atende algumas legislações (apenas uso restrito)
Cinza claro	Caso específico (exigido em poucas legislações)
Cinza escuro	Não atende nenhuma legislação

Nesse sentido, a Tabela 19 expõe os valores médios desses parâmetros de acordo com todas categorias de estudo, e a adequação desses quanto aos valores recomendados pelas legislações de referência para fins de reuso urbano.

Tabela 19 - Adequação de parâmetros quanto aos valores recomendados para reuso urbano.

Reuso Urbano											
Cenário	Q (m <sup>3</sup> /d)	pH	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	Turbidez (UT)	NT (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PT (mg/L)	C. Termo. (NMP/100mL)	<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)
Ua	0,4	7,5	34,0	22,4	10,7	8,4	18,5	7,0	0,3	469,0	7,08E+03
Ub	17,8	7,5	74,0	38,6		8,4	18,5	7,0	0,3	1,00E+04	1,57E+05
Uc	17,5	6,9	24,0	10,0	10,3	10,6	37,1	10,8	3,4	2,95E+06	1,0E+04
Ra	0,5	7,1	41,2	30,8	25,9	76,9	41,7	5,4	6,9	7,29E+05	9,52E+04
Rb	5,4	7,2	84,2	59,2	39,7	40,7	63,7	7,6	7,2	6,68E+03	2,41E+06
Rc	3,2	6,7	21,4	38,8	60,3	13,8	8,7	10,5	1,5	3,13E+04	1,74E+04
B	-	6,8	47,7		30,7	25,5			1,6		3,45E+03

Legenda: Ua = residencial unifamiliar em cenário urbano; Ub = residencial multifamiliar em cenário urbano; Uc = comercial predial em cenário urbano; Ra = residencial unifamiliar em cenário rural; Rb = residencial multifamiliar em cenário rural; Rc = semicoletivo de serviços em cenário rural; B = bairros-cidade.

Avaliando os valores médios calculados em cada categoria, percebe-se que o pH se manteve dentro dos valores permitidos em todos os cenários. Outros parâmetros que se adequaram em todas as legislações, sem restrição de uso, foi a SST média gerada em prédios comerciais, NT em todas as categorias em cenário urbano, bairro-cidade e em sistemas semicoletivos no cenário rural, além de NH<sub>4</sub> nos sistemas residenciais urbanos e semicoletivos rurais. É interessante observar que as frações nitrogenadas são mencionadas em apenas uma legislação de referência, o Manual de Conservação e Reuso de Água em Edificações (2005), sendo determinado um limite de 20 mg/L de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e de 1 mg/L de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para uso em descarga de bacias sanitárias e lavagens de pisos, veículos e fins ornamentais, e uma faixa entre 5 e 30 mg/L de NT para irrigação de áreas verdes e rega de jardins.

Os parâmetros microbiológicos são discorridos em todas as legislações e, ao avaliar os valores médios de cada contexto, nota-se que 3 categorias atendem alguma legislação em relação aos valores de CT e 4 categorias atendem em relação a *E. coli*, majoritariamente para uso restrito dessa água recuperada. Ressalta-se que o cenário residencial unifamiliar rural não atendeu nenhum parâmetro, apenas pH.

A turbidez é um parâmetro levantado em diversas legislações, com valores bem restritivos, entre 2 e 10 UT, dependendo do uso recomendado. Nota-se que nenhuma categoria atendeu a esse parâmetro, com concentrações médias entre 10,3 e 60,7 UT, com os valores mais elevados em cenário rural. A turbidez é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar a água e é indicada pela presença de sólidos em suspensão na água, os quais podem servir de meio de proteção e transporte de diversos microrganismos patogênicos. Além disso, em termos de reuso, um produto com turbidez elevada não possui uma aceitação garantida pelos consumidores, como apontado por Domènech (2010) que, apresentando uma água residuária com turbidez acima de 5 UT, encontrou rejeição do uso pelos usuários para fins de reuso em descargas sanitárias.

Ao observar cada estudo de caso, no total, 28 sistemas enquadraram-se em algum tipo de classificação que permitem o reuso da água residuária recuperada para reuso do tipo urbano. Os usos foram direcionados às atividades que correspondem à realidade dos contextos escolhidos como objeto de estudo. Para tanto, acerca os sistemas com uma menor vazão de efluente recomenda-se usos em escala “micro”, para atendimento das necessidades das residências unifamiliares e sistemas semicoletivos com uma população reduzida, como descarga de bacias sanitárias e irrigação paisagística. Acerca os sistemas com uma vazão de efluente mais elevada, tais quais residenciais multifamiliares e bairros-cidade, o reuso em escala “meso” se mostra apresenta mais recomendado, como irrigação paisagística e lavagem de logradouros e áreas externas. Nesse sentido, no Quadro 6 esquematiza os sistemas que se enquadram em alguma classificação das legislações de referência para reuso urbano da água residuária recuperada.

Em relação aos sistemas inseridos em cenário rural e cenário periurbano, também foi avaliado a adequação das águas residuárias tratadas para fins de reuso agrícola. Na Tabela 20 está esquematizado a adequação dos valores médios da composição do esgoto tratado quanto aos padrões recomendados pelas legislações.

Quadro 6 - Potencialidade de reuso urbano da água residuária recuperada em diferentes contextos, suas aplicações e legislações referentes.

Reuso Urbano		
Sistemas	Uso recomendado	Legislação (classificação)
U16c, U16d, R18, R25	Irrigação paisagística e lavagem de logradouros	Programa Interáguas (uso irrestrito)
U6, U10a, U15, U16c, U16d, R17c, R18, R25	Irrigação paisagística em áreas restritas.	Programa Interáguas (uso restrito)
R17a, R17b, R17c, R18, R27	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água.	NBR 13.969:1997 (Classe 1)
U13, U16c, U16d, R6a, R9, R14a, R17c, R18	Descargas de bacias sanitárias.	NBR 13.969:1997 (Classe 3)
U6, U16c, U16d	Descarga de vaso sanitário, lavagem de logradouros e áreas externas, irrigação paisagística.	NBR 16.783:2019
U3, R16b, R16c	Irrigação de jardins, limpeza de ruas.	PROSAB (uso irrestrito)
U3, U6, U14, U15, R6a, R16c	Descarga de vaso sanitário.	PROSAB (uso predial)
U3, U6, U8, U14, U15, R6b, R16c, R22	Irrigação de canteiros de rodovias.	PROSAB (uso restrito)
U10a, R18	Irrigação de áreas verdes e rega de jardins.	Manual Conservação (Classe 3)
U1, U3, U6, U11, U12, U14, U15, R4, R6a, R14a, R14b, R16a, R16b, R16c, R26, R28, B3	Lavagem de pátios e ruas, uso predial comercial (restrito a descargas sanitárias).	CERH/MG (uso amplo)
U3, R16b, R16c	Irrigação paisagística em locais de acesso irrestrito, lavagem de logradouros.	CONSEMA/RS (Classe A)
U3, U6, R16b, R16c	Irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito	CONSEMA/RS (Classe B)
U10a, U16c, U16d, R25	Irrigação paisagística, lavagem de logradouros e espaços públicos e privados	SES/SIMA SP (uso irrestrito)
U10a, U16c, U16d, R17c, R25	Irrigação paisagística, lavagem de logradouros e espaços públicos e privados	SES/SIMA SP (uso restrito)

Nota: Sistemas com nomenclatura U estão descritos na Tabela 13 e nomenclatura R na Tabela 15.

Nota-se uma quantidade reduzida de parâmetros abordados quando comparado ao reuso urbano. Novamente, os principais determinantes, citados em todas as legislações, foram pH e indicadores microbiológicos, no qual o pH se manteve adequado para todos os tipos de uso. Desses, o único parâmetro que não atendeu aos valores máximos recomendados pelas legislações foi a concentração de *E. Coli* nos sistemas residenciais multifamiliares em cenário

rural, com um valor médio de  $2,4 \times 10^6$  NMP/100mL, superior ao máximo permitido dentre as diversas legislação correspondente a  $1 \times 10^6$  NMP/100mL na Deliberação Normativa CERH-MG nº 65 de 2020 do estado de Minas Gerais para usos limitados para fertirrigação superficial ou localizada. As demais categorias atendem a alguma legislação de referência, inclusive para uso irrestrito.

Tabela 20 - Adequação de parâmetros quanto aos valores recomendados para reuso agrícola.

Reuso Agrícola						
Cenários	Q (m <sup>3</sup> /dia)	pH	DBO (mg/L)	Turbidez (UT)	C. Termo. (NMP/100mL)	<i>E Coli</i> (NMP/100mL)
<b>Ra</b>	0,5	7,1	41,2	25,9	7,29E+05	9,52E+04
<b>Rb</b>	5,4	7,2	84,2	39,7	6,68E+03	2,41E+06
<b>Rc</b>	3,2	6,7	21,4	60,3	3,13E+04	1,74E+04
<b>B</b>	-	6,8	47,7	30,7		3,45E+03

Legenda: Ra = residencial unifamiliar em cenário rural; Rb = residencial multifamiliar em cenário rural; Rc = semicoletivo de serviços em cenário rural; B = bairros-cidade.

Avaliando individualmente cada estudo de caso, 26 sistemas atenderam aos padrões de uso recomendados pelas legislações de referência, correspondendo a 66,7% dos sistemas. Poucos sistemas se enquadraram nas classificações definidas pelo Programa Interáguas (2017a), devido a exigência de valores máximos de 5 UT de turbidez e de 15 e 30 mg/L de DBO, para usos irrestritos e restritos respectivamente, sendo essa legislação a única abordando esses parâmetros. Portanto, os parâmetros microbiológicos foram responsáveis por limitar o enquadramento dos sistemas em alguma classificação de reuso agrícola dentre as legislações. Sendo assim, no Quadro 7 discorre-se as possibilidades de reuso agrícola dentre os sistemas levantados na pesquisa.

Quadro 7 - Potencialidade de reuso agrícola da água residuária recuperada em diferentes contextos, suas aplicações e legislações referentes.

<b>Reuso Agrícola</b>		
<b>Sistemas</b>	<b>Uso recomendado</b>	<b>Legislação (classificação)</b>
R25	Irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve rente ao solo sem processamento prévio, como hortaliças e tubérculos (alface, morango, cenouras, etc.), culturas hidropônicas.	Programa Interáguas (uso irrestrito)
R17c, R25	Irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve distante do solo sem processamento prévio (como milho, batatas, arroz) ou após processamento prévio; não destinadas ao consumo humano; cultivo de florestas plantadas	Programa Interáguas (uso restrito)
R6a, R6b, R16a, R16b, R16c, R22	Pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.	NBR 13.969:1997 (Classe 4)
R6a, R16b, R16c	Qualquer cultura, hidropônico e consumidas cruas.	PROSAB (uso irrestrito)
R6a, R6b, R16b, R16c, R22	Hidropônico e qualquer cultura não ingerida crua, culturas alimentícias e não alimentícias, forrageiras, pastagens e árvores.	PROSAB (uso restrito)
R4, R6a, R7, R14a, R14b, R16b, R16c, R14d, R26, R28, B3	Fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão.	CERH/MG (uso amplo)
R4, R6a, R6b, R7, R8, R9, R10, R11, R14a, R14b, R16a, R16b, R14c, R14d, R18, R22, R24, R25, R26, R28, R29, R30	Fertirrigação superficial ou localizada, evitando-se contato da água de reuso com o produto alimentício.	CERH/MG (uso limitado)
R6a, R6b, R16a, R16b, R16c, R22	Irrigação de qualquer cultura, exceto frutos, hortaliças, raízes e tubérculos com contato direto com o solo ou com a água para consumo humano na forma crua.	CONSEMA RS

Nota: Sistemas com nomenclatura U estão descritos na Tabela 13 e nomenclatura R na Tabela 15.

### 5.3. WETLANDS COMO TECNOLOGIA GERADORA DE ÁGUA DE REUSO NO CONTEXTO BRASILEIRO

Em observância com a composição do esgoto doméstico gerado em cenário urbano (Tabela 14), cenário rural (Tabela 16) e cenário periurbano (Tabela 18) no contexto nacional, e os padrões exigidos pelas legislações nacionais de referência determinando parâmetros de qualidade recomendados para água de reuso (Tabela 1), calculou-se intervalos de eficiências de

remoção requeridos para atendimento desses padrões exigidos, possibilitando o aproveitamento da água recuperada para fins de reuso urbano e agrícola, discurridos na Tabela 21.

Tabela 21 - Eficiências de remoção de poluentes requeridas de acordo com composição média do esgoto doméstico bruto gerado em diversos contextos e o respectivo enquadramento visando reuso urbano e reuso agrícola.

Reuso Urbano									
Cenário	DBO (%)	SST (%)	Turbidez (%)	NT (%)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (%)	PT (%)	C. Ter. (log)	E Coli (log)	Reuso
Ua	91 – 96	96	85 – 97		3,3	92	5,7 – 8,7	0,7 – 1,4	(a)
	87 – 96	79 – 96	93 – 97	64			4,7 – 8,7	1,4 – 3,7	(b)
Ub	93 – 98	67 – 99	N/A	73			N/A	5,2 – 7,5	(b)
	93 – 98	67 – 99	N/A		72	99	N/A	4,5 – 7,5	(c)
Uc	89 – 94	92	82 – 96		76	99	4,4 – 7,4	3,2 – 3,9	(a)
	83 – 94	54 – 99	91 – 96	8			3,4 – 7,4	3,9 – 6,2	(b)
	83 – 94	54 – 99	91 – 96		76	99	4,4 – 7,4	3,2 – 6,2	(c)
Ra	98 – 99	99	97 – 99		83	100	4 – 7	3,1 – 3,8	(a)
	97 – 99	94 – 100	99	91			3 – 7	3,8 – 6,1	(b)
Rb	96 – 99	91 – 100	99 – 100	70			2,8 – 6,8	5,2 – 7,5	(b)
	96 – 99	91 – 100	99 – 100		84	99	3,8 – 6,8	4,5 – 7,5	(c)
Rc	99 – 100	98	91 – 98		26	98	0,3 – 3,3	4,4 – 5,1	(a)
	99 – 100	91 – 100	95 – 98	6			0,6 – 3,3	5,1 – 7,4	(b)
	99 – 100	91 – 100	95 – 98		26	98	0,3 – 3,3	4,4 – 7,4	(c)
B	93 – 98	95 – 100	97 – 99	65			N/A	N/A	(b)
	93 – 98	95 – 100	97 – 99		30	100	N/A	N/A	(c)
Reuso Agrícola									
Ra	97 – 99		99				1,0 – 6,0	0,1 – 2,1	
Rb	96 – 98		99				0,8 – 5,8	1,5 – 3,5	
Rc	99		95				0,3 – 2,3	1,4 – 3,4	
B	93 – 96		97				N/A	N/A	

Legenda: (a) descargas sanitárias, (b) irrigação paisagística, (c) lavagem de logradouros e espaços públicos.

Ua = residencial unifamiliar em cenário urbano; Ub = residencial multifamiliar em cenário urbano; Uc = comercial predial em cenário urbano; Ra = residencial unifamiliar em cenário rural; Rb = residencial multifamiliar em cenário rural; Rc = semicoletivo de serviços; B = bairros-cidade.

<sup>1</sup> = baseado em Monteiro (2009); <sup>2</sup> = baseado em Santiago e Calijuri (2009); <sup>3</sup> = baseado em Decezaró et al. (2021); N/A = não avaliado.

A partir da análise dos intervalos de remoção de poluentes exigidos para cada cenário, nota-se valores elevados para todos os parâmetros, principalmente acerca o reuso urbano, restringindo as potencialidades de reuso da água residuária tratada nos sistemas. Apesar dos

valores elevados de remoção de DBO e turbidez também para fins de reuso agrícola, frisa-se que algumas legislações nacionais se mostram mais flexíveis, não exigindo algum tipo de performance desses parâmetros, com enfoque apenas na caracterização microbiológica na água de reuso, como as diretrizes propostas pelo PROSAB (BASTOS et al., 2008) e legislações estaduais de Minas Gerais e Rio Grande do Sul.

A partir disso, segue-se para recomendações de arranjos tecnológicos compondo os WC-FSS como gerador de água de reuso aplicável ao contexto brasileiro. Foi utilizado como base os aspectos levantados pelos sistemas inventariados nas duas etapas de revisão de literatura da pesquisa, portanto cabe ressaltar que outras combinações e possibilidades podem se mostrar mais adequadas conforme as características do sistema em estudo. Nesse sentido, devido aos elevados valores de remoção de SST, turbidez e DBO, além de uma variada remoção de indicadores patogênicos de acordo com o cenário, mas com valores também elevados em sua maioria, o enfoque para escolha das tecnologias empregadas foi entorno desses parâmetros.

A remoção de nutrientes também é levantada na Tabela 21, mas não foi tratada como fator prioritário, tornando como objetivo em cenário rural e periurbano a obtenção de uma água recuperada com quantidades de nitrogênio e fósforo aproveitáveis para reuso agrícola. Esses parâmetros são levantados apenas em uma legislação nacional de referência, o Manual de Conservação e Reuso de Água em Edificações (2005), para fins de reuso urbano. Nota-se que para reuso agrícola esses parâmetros não são citados, exceto na legislação estadual do Rio Grande do Sul, onde recomenda-se que a carga aplicada não exceda as recomendações para adubação de acordo com a cultura adotada, conforme orientações do "Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina".

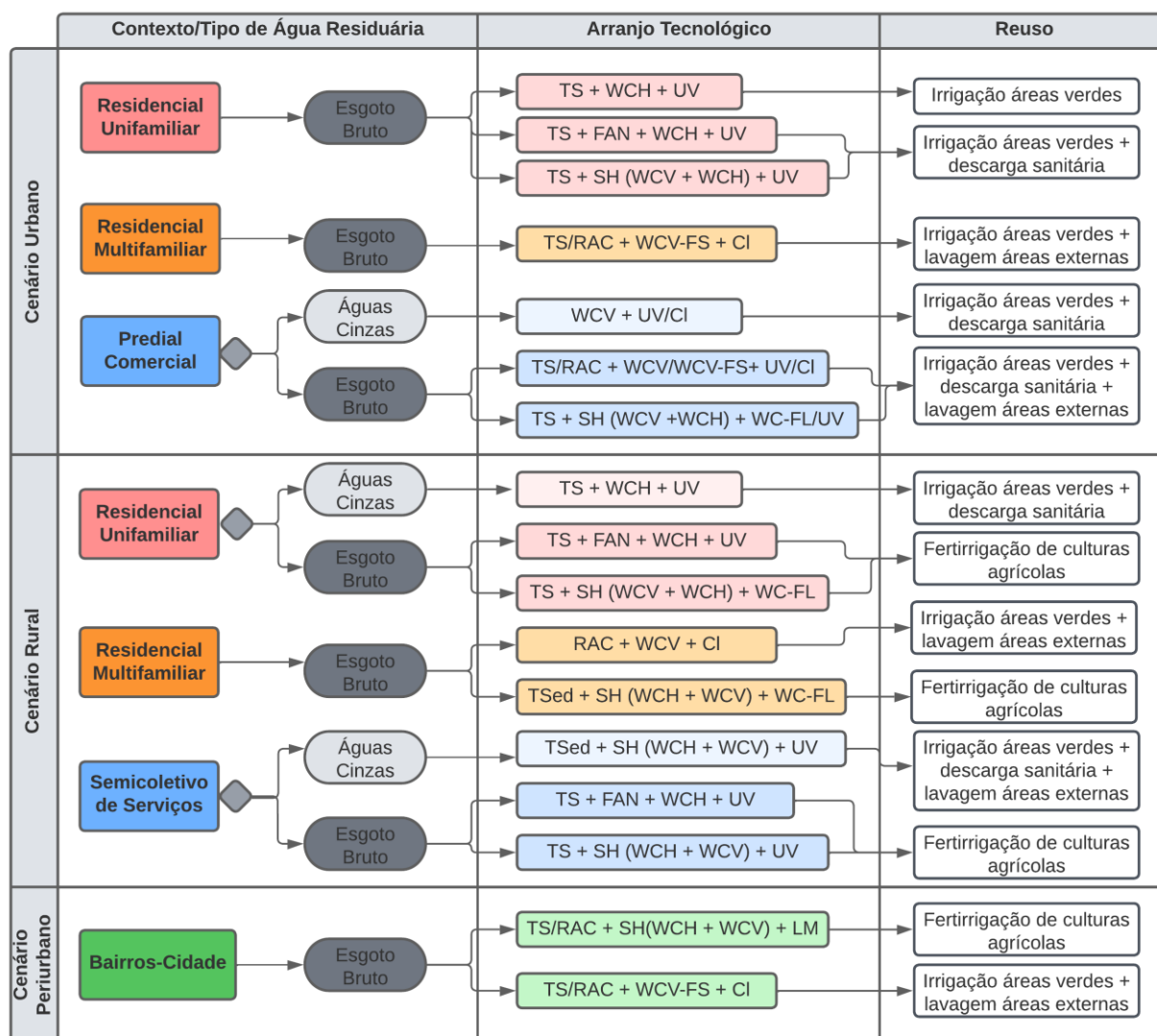
Portanto, de acordo com os arranjos tecnológicos levantados nos estudos de caso e suas respectivas performances, apresentados nos Apêndices III e IV, algumas possibilidades se mostram viáveis em contexto nacional. Ilustra-se na Figura 36 a matriz tecnológica de soluções para tratamento e recuperação do esgoto doméstico tratado em contexto nacional.

Diante as informações levantadas acerca da prática do reuso e a realidade de aplicabilidade dos sistemas em cenário nacional, algumas possibilidades foram propostas. Inicialmente, cabe apontar que nos contextos residenciais unifamiliares e semicoletivos de serviço, é interessante avaliar a possibilidade de segregação do esgoto gerado. O tratamento de águas cinzas é recorrente nos sistemas objetivando reuso da água recuperada, como reportado



na maior parte dos casos em cenário urbano e alguns casos em cenário rural levantados no inventário sobre WC-FSS como tecnologia geradora de água de reuso.

Figura 36 - Matriz tecnológica para orientar a inserção dos WC-FSS como tecnologia geradora de água de reuso no contexto brasileiro.



Legenda: TS: tanque séptico; WCH: Wetland construído de fluxo horizontal; UV: radiação ultravioleta; FAN: filtro anaeróbio; SH: sistema híbrido; WCV: Wetland construído de fluxo vertical; RAC: reator anaeróbio compartimentado; WCV-FS: Wetland construído de fluxo vertical com fundo saturado; CI: cloração; WC-FL: Wetland construído de fluxo livre; TSed: tanque de sedimentação; LM: lagoa de maturação.

Fonte: da autora.

No cenário urbano em contexto nacional, os sistemas unifamiliares apresentaram concentrações mais elevadas de SST e DBO (média de 178,5 mg/L e 273 mg/L,

respectivamente) comparados ao esgoto bruto. Já nos sistemas prediais comerciais, obteve-se concentrações mais reduzidas com 40,5 mg/L de SST e 39,5 mg/L de DBO, contra 138,5 mg/L de SST e 215,2 mg/L de DBO em esgoto bruto, evidenciando a viabilidade de uma água recuperada atendendo valores mais restritivos de qualidade. Além disso, uma diferença de 5 unidades logarítmicas de Coliformes Termotolerantes também é observada, com uma concentração média de  $3,3 \times 10^3$  NMP/100mL em água cinza e de  $3,6 \times 10^8$  NMP/100mL em esgoto bruto. O mesmo ocorre em cenário rural, mas com os sistemas residenciais unifamiliares, onde a água cinza apresenta concentrações médias de 165 mg/L de SST, 607 mg/L de DBO e  $1,4 \times 10^5$  NMP/100mL de CT, contra 858,8 mg/L de SST, 1245,6 mg/L de DBO e  $1,3 \times 10^7$  NMP/100mL em esgoto bruto.

Para a escolha da tecnologia de tratamento primário foi priorizado a adoção de tanques sépticos em sistemas com menores vazões, devido a seu emprego consolidado em território nacional, quando empregados para tratamento de águas cinzas, e/ou complementados por uma modalidade modificada de WC-FSS, ou ainda, para obtenção de uma água de reuso de uso mais restritivo. A associação de tanques sépticos com filtros anaeróbios (o sistema “fossa e filtro”, também amplamente empregado em cenário nacional) foi sugerido em alguns contextos, de modo a obter uma água de reuso com valores mais reduzidos de SST, turbidez e DBO, atendendo valores próximos de eficiência para fins de reuso para descargas sanitárias em cenário urbano e fertirrigação de culturas agrícolas em cenário rural.

Reatores anaeróbios compartimentados foram apontados como uma opção para sistemas com vazões mais elevadas, portanto residenciais multifamiliares, sistemas semicoletivos com um P.E. acima de 200 pessoas e bairros-cidades. Além disso, tanques de sedimentação se mostraram uma tecnologia eficiente quando associados principalmente aos sistemas híbridos, como discorrido por Abdel-Shafy et al. (2017), Torrens et al. (2020) e Pansonato et al. (2010), tornando-se uma possibilidade em cenário rural, devido a maior disponibilidade de área para a ocupação dessa modalidade de wetlands construídos.

Para a escolha da modalidade de WC-FSS, os sistemas de escoamento horizontal (WCH) foram sugeridos preferencialmente em contextos mais simplificados, devido a sua adoção majoritária tanto em cenário nacional quanto internacional, operação simplificada e ausência de necessidade de bombeamento, reduzindo valores de instalação do sistema. Portanto, em sistemas residenciais unifamiliares, principalmente em locais com reduzida vazão afluente, requerendo assim uma menor área superficial. Os sistemas prediais comerciais têm

empregado de forma mais significativa a modalidade de WCV, sendo mantida essa tendência nesse contexto, tanto para tratamento de águas cinzas quanto para esgoto bruto.

Sistemas híbridos (WCV seguidos por WCH) e WCV-FS foram sugeridos principalmente em sistemas mais complexos, com um aporte maior de vazão. Apesar de SH não serem empregados de forma significativa em cenário nacional, o contrário é observado nos estudos de casos com reuso da água residuária, principalmente em cenário rural. Portanto, sugere-se um maior emprego desses sistemas, principalmente em locais com maior disponibilidade de área, de modo a aproveitar inclusive o fator paisagístico dessa modalidade. WCV-FS tem apresentado tendência no cenário urbano em contextos residenciais multifamiliares e prediais comerciais, além de bairros-cidades, no qual suas condições aeróbias nas camadas superiores e anaeróbias no fundo saturado tem propiciado reações de nitrificação e desnitrificação, reduzindo, portanto, as concentrações de frações nitrogenadas na água residuária tratada. Em cenário urbano isso se mostra interessante, já que não ocorre o aproveitamento desse nutriente para fins de reuso urbano, apenas para irrigação de áreas verdes e com valores restritivos.

Por fim, a etapa de desinfecção é de extrema importância com vista ao aproveitamento da água recuperada. Para tanto, propõe-se cloração (intervenção mais comumente utilizada tanto em cenário nacional quanto internacional) para sistemas prediais comerciais, residenciais multifamiliares e bairros-cidade, onde comumente esse método de desinfecção já é realizado e tem oferecido valores de remoção de até 5,98 unidades logarítmicas de *E. coli* (QUARTAROLI et al., 2018) e 7,9 de CT (DE ANDA et al., 2018). A cloração não foi considerada em cenário rural, já que a presença de cloreto em água de irrigação é responsável pela contaminação do solo, causando toxicidade principalmente nas folhas das culturas irrigadas (TELLES, 2021).

Uma solução interessante que não necessita da adição de produtos químicos para a desinfecção da água residuária é através da radiação ultravioleta (UV), não oferecendo, portanto, riscos acerca da geração de produtos tóxicos. Esse método tem sido empregado em alguns estudos de casos com reuso da água residuária, como reportado por Lutterbeck et al. (2018) em residência unifamiliar em cenário rural em contexto nacional. Laaffat et al. (2019) reportou remoções de 3 unidades logarítmicas de CT e *E. coli* em efluente bruto de escola primária tratado em WCH e minirreator com 8 lâmpadas (50 W cada), correspondendo a uma aplicação de 50 mWs/cm<sup>2</sup> e Skrlarz et al. (2009) relatou uma redução 3 unidades logarítmicas

de *E. coli* em WCV com recirculação e de mais 3 unidades logarítmicas após passagem em unidade de radiação UV com contato mínimo de 1,5 minutos, portanto uma remoção total de 6 unidades logarítmicas nesse arranjo.

WC-FL têm sido utilizados como etapa de polimento em alguns sistemas em todos os cenários, principalmente após SH. A partir da adoção dessa ecotecnologia na etapa de desinfecção, assim como o uso de lagoas de maturação, é possível inferir arranjos tecnológicos empregando diversas SBN na sua composição, adentrando a SES como ferramenta para cidades circulares, através do tratamento da água residuária sem a necessidade de consumo de produtos químicos, além da inserção de área vegetada em ambientes construídos.

Para aproveitamento da água residuária para fins de fertirrigação agrícolas, diversos aspectos devem ser considerados. Segundo Telles (2021), os métodos mais seguros de irrigação e que oferecem menos risco de contaminação são irrigação subterrânea, através de tubulações perfuradas enterradas, e por gotejamento.

Além disso, ao inferir a dose máxima de água residuária aplicada no solo, deve ser definido o elemento químico de referência, considerando as necessidades básicas nutricionais das culturas (geralmente avaliando-se N, P e K) e referenciais de qualidade do solo (acerca contaminação por elementos químicos indesejáveis, como Na, B e metais pesados). Sobre o primeiro aspecto, a concentração dos nutrientes deve ser calculada em cima da sua taxa de mineralização, por estarem usualmente associados majoritariamente ao material orgânico. Acerca o nitrogênio, quando não há definição do tipo de cultura, usualmente tem sido aceito aplicar uma taxa correspondente a 300 kg de NT ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> (MATOS e MATOS, 2017).

A matriz tecnológica ilustrada na Figura 36 objetiva orientar e auxiliar projetistas na escolha de tecnologias que auxiliam na obtenção de uma água residuária mais refinada, de modo a proporcionar seu aproveitamento, apoiando-se em arranjos que tem apresentado eficiências satisfatórias e de uso comum em território nacional. Entretanto, é essencial que seja avaliado a situação específica do contexto no qual o sistema será inserido, como composição do esgoto e carregamento hidráulico e orgânico, de modo a definir adequadamente modos operacionais, dimensionamento e componentes dos WC-FSS, preservando a integridade da ecotecnologia e vida útil do arranjo tecnológico.

## 6. CONCLUSÃO

O estudo realizado por meio do levantamento, interpretação e análises de dados secundários publicados nos periódicos científicos, experiências de grupos nacionais de pesquisa e visitação em campo, evidenciam a ampliação na última década do emprego da ecotecnologia dos wetlands construídos em diferentes arranjos de tratamento de águas residuárias sob distintos contextos territoriais.

Evidencia-se uma potencialidade relacionada ao aproveitamento do efluente tratado em diferentes modalidades de wetlands construídos como água de reuso, notadamente relacionado às águas cinzas em cenário urbano. A ecotecnologia tem sido utilizada majoritariamente em nível secundário de tratamento, sendo associada às diversas tecnologias, predominantemente aos decanto-digestores tipo tanques sépticos (TS). A modalidade de wetland construído de escoamento subsuperficial horizontal (WCH) tem sido a mais empregada para fins de reuso, cuja fertirrigação de culturas agrícola tem sido a principal prática aplicada, seguido por irrigação de áreas verdes em espaços urbanos e descarga de vasos sanitários.

Em cenário nacional, os casos de aplicabilidade de wetlands construídos em escala real no tratamento de esgoto doméstico possuem predominância nas regiões Sul e Sudeste, com forte presença em cenário rural. A ecotecnologia se mostra comumente associada ao TS, além de Reatores Anaeróbios Compartimentados (RAC) em áreas urbanas e TS seguido de Filtro Anaeróbio (FAN) em áreas rurais. Sistemas aplicados em residências multifamiliares em cenário urbano apresentaram esgoto doméstico com concentrações mais elevadas de poluentes, quando comparados às residências unifamiliares e aos prédios comerciais. Por outro lado, em cenário rural, residências unifamiliares apresentaram esgoto doméstico acentuadamente mais concentrados do que nos demais contextos.

Apesar da composição de esgoto forte sob alguns contextos, mais de 93% dos 65 sistemas inventariados atingiram valores de remoção de DBO exigidos pela legislação nacional, com vista ao lançamento ambientalmente adequado em corpos d'água, 83% destes atenderam aos limites estabelecidos nas legislações estaduais e 100% dos sistemas atingiram ao padrão exigido para esse parâmetro para destinação na rede pluvial. Em relação aos demais parâmetros, todos os sistemas atenderam os valores exigidos de pH, SST e PT, com menores frequências de

atendimento para o  $\text{NH}_4^+$  (variando de 58% a 62%) e Coliformes Termotolerantes (com média de 50%).

Evidencia-se, ainda, a potencialidade de reuso do esgoto tratado pela ecotecnologia wetland construído de escoamento subsuperficial (WC-FSS) em cenário nacional quanto a adequação das características demandadas para reuso não potável, onde 43% das 65 unidades inventariadas enquadraram-se em algum tipo de classificação que permita o reuso para o tipo urbano, e 67% dos sistemas atenderam aos padrões de uso recomendados para reuso agrícola. Uma abordagem sistêmica no planejamento integral do tratamento da água residuária, observando todas as etapas de tratamento, é fundamental para a obtenção de uma água recuperada que atenda aos padrões exigidos pelas legislações de referência, com especial atenção na remoção de DBO, turbidez e parâmetros microbiológicos indicadores de microrganismos patogênicos.

A matriz tecnológica vem como ferramenta de orientação no processo de escolha de arranjos tecnológicos que possibilitam a recuperação e circularidade de recursos. Foram sugeridos arranjos compostos por tecnologias consolidadas em território nacional (como TS, RAC, WCH e cloração) e por tecnologias empregadas com maior destaque em sistemas projetados para o reuso da água residuária, tais como os tanques de sedimentação, sistemas híbridos de wetlands e radiação ultravioleta. Os WC-FSS são sistemas robustos, eficientes e apresentam grande potencial de promover a economia circular nos serviços de esgotamento sanitário, inserindo-se nos mais variados contextos como solução baseada na natureza, promovendo concomitantemente uma diversidade de serviços ecológicos nas cidades e meios urbanos.

Cabe inferir, por fim, que para a promoção do reuso de esgoto tratado em sistemas tipo wetlands, notadamente em escala municipal, há que se conduzir estudos de análise de risco microbiológico e ambientais relacionados aos fins específicos, bem como identificar modelos de negócios que legitimem a prática da economia circular no território brasileiro.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, 2017. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo\\_livro.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf)>. Acesso em: 31 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil, Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-2020/view> Acesso em: 31 mar. 2022.

AKRATOS, Christos S.; TSIHRINTZIS, Vassilios A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Ecological engineering**, v. 29, n. 2, p. 173-191, 2007.

ANGELAKIS, A. N.; ASANO, T.; BAHRI, A.; JIMENEZ, B. E.; TCHOBANOGLIOUS, G. Water Reuse: From ancient to modern times and the future. **Frontiers Environmental Science**. v. 6, n. 26, 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16783**: Uso de fontes alternativas não potáveis em edificações. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas tipo Tanque séptico. Rio de Janeiro, RJ, 1993.

ATANASOVA, Nataša et al. Nature-based solutions and circularity in cities. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 319-332, 2021.

BÄR, Bruna Vogt; TAVARES, Sergio Fernando. Estado da arte do comportamento hidrológico de telhados verdes no brasil: uma revisão sistemática. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 4, p. 257-271, 2017.

BASTOS, R.K.X.; KIPERSTOK, A. CHERNICHARO, C.A.L.; FLORENCIO, L.; MONTEGGIA, L.O.; SPERLING, M.; AISSE, M.M.; BEVILAQUA, P.D.; PIVELI, R.P. Subsídios à regulamentação do reúso de águas no Brasil – Utilização de esgotos sanitários tratados para fins agrícolas, urbanos e piscicultura. **Revista DAE**, v. 177, n. 122. 2008. Disponível em: <[http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_177\\_n\\_122.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_177_n_122.pdf)>. Acesso em: 31 mar. 2022.

BEYEA, Suzanne; NICHLL, Leslie H. Writing an integrative review. **AORN journal**, v. 67, n. 4, p. 877-881, 1998.

BRAGA, Benedito et al. Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, p. 119-121, 2005.

BRANDÃO, A. S. et al. Estudo de caso: uso de água recuperada na construção civil. **Revista DAE**. N. 217. V. 67. DOI: 10.4322/dae.2019.021. Edição Especial, maio de 2019.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007: Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm). Acesso em: 02 fev. 2021.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020: Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art11](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art11). Acesso em: 04 fev. 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. PLANSAB Plano Nacional de Saneamento Básico: Mais Saúde com Qualidade de Vida e Cidadania. Brasília, DF: **MDR/SNS**, 176p., 2013. Disponível em: [https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao\\_Conselhos\\_Resolu%C3%A7%C3%A3o\\_Alta\\_-\\_Capa\\_Atualizada.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao_Conselhos_Resolu%C3%A7%C3%A3o_Alta_-_Capa_Atualizada.pdf) Acesso em: 13 mar. 2021.

BRASIL. Programa Nacional de Saneamento Rural. **Fundação Nacional da Saúde - Funasa**. Brasília. 2019. Disponível em: [http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/MNL\\_PNSR\\_2019.pdf/08d94216-fb09-468e-ac98-afb4ed0483eb](http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/MNL_PNSR_2019.pdf/08d94216-fb09-468e-ac98-afb4ed0483eb) Acesso em 20 mai. 2021.

BROOME, Marion E. et al. Integrative literature reviews for the development of concepts. **Concept development in nursing: foundations, techniques and applications**, v. 231, p. 250, 2000.

CASTELLAR, J. A. C. et al. Nature-based solutions in the urban context: terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services. **Science of The Total Environment**, v. 779, p. 146237, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146237>. Acesso em 20 mai. 2021.

DOMÈNECH, Laia; SAURÍ, David. Socio-technical transitions in water scarcity contexts: Public acceptance of greywater reuse technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 1, p. 53-62, 2010.

DOTRO, G, et al, LANGERGRABER G.; MOLLE P.; NIVALA J.; PUIGAGUT J.; STEIN O.; Von SPERLING, M, **Treatment Wetlands: Biological Wastewater Treatment Series**, Londres: Iwa Publishing, 2017, 154 p, (Volume 7).

EMF - Ellen MacArthur Foundation. Towards a Circular Economy: Business Rational for an Accelerated Transition. Ellen MacArthur Foundation. 2015. Disponível em: [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE\\_Ellen-MacArthur-Foundation\\_9-Dec-2015.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf) Acesso em: 20 out. 2022.



ERIKSSON, E.; et al. Characteristics of grey wastewater. **Urban Water**, v. 4, n. 1, p. 85- 104. 2002

FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. Irrigation with treated sewage effluent. **Management for environmental protection**. Berlin: Springer, 1991. 224 p.

GALVÃO, Taís Freire; PANSANI, Thais de Souza Andrade; HARRAD, David. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiologia e serviços de saúde**, v. 24, p. 335-342, 2015.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GHASEMI-ZANIANI, Mahboobe et al. Irrigation with waste water treated by constructed wetlands. **International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences**, v. 3, p. 18-34, 2017.

GONÇALVES, Ricardo Franci; KELLER, Regina de Pinho; FRANCI, Thiago Keller. Análise comparativa das práticas de reúso de água cinza em edificações urbanas na Alemanha e no Brasil. **Revista DAE**, p. 120-131, 2018.

GONZALEZ-FLO, E.; et al. Nature based-solutions for water reuse: 20 years of performance evaluation of a full-scale constructed wetland system. **Ecological Engineering**, v. 188, p. 106876, 2023.

GOVINDAN, Kannan; HASANAGIC, Mia. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1-2, p. 278-311, 2018.

Guerra-Rodríguez, S.; Oulego, P.; Rodríguez, E.; Singh, D.N.; Rodríguez-Chueca, J. Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: Challenges and opportunities. **Water** 2020, 12, 1431.

HENDGES, Letiane Thomas; ANTES, Bianca dos Santos; TONES, Aline Raquel Müller. Reúso da água na agricultura: a realidade brasileira e experiências internacionais. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 9, n. 23, p. 94-109, 2018.

HERRERA-MELIÁN, José Alberto et al. Effect of substrate, feeding mode and number of stages on the performance of hybrid constructed wetland systems. **Water**, v. 10, n. 1, p. 39, 2018.

HESPANHOL, Ivanildo et al. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 75-95, 2002.

HOFFMANN, Heike et al. Technology review of constructed wetlands—subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn, Germany**, v. 11, 2011.

INTERÁGUAS – PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR ÁGUA. Elaboração de proposta de plano de ações para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil. **Produto III – Critérios de qualidade de água**. 2018. Brasília. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/interaguas/MCID\\_Reuso\\_Produto3 - CriteriosdeQualidadedaAguadeReuso.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/interaguas/MCID_Reuso_Produto3-CriteriosdeQualidadedaAguadeReuso.pdf)>. Acesso em: 31 mar 2022.

INTERÁGUAS – PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR ÁGUA. Elaboração de proposta do plano de ação para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil. **Produto IV – avaliação do potencial de reúso (RP01C)**. CH2M, 2017. 294p

KATSOU, Evina et al. Transformation tools enabling the implementation of nature-based solutions for creating a resourceful circular city. **Blue-Green Systems**, v. 2, n. 1, p. 188-213, 2020.

KISSER, Johannes et al. A review of nature-based solutions for resource recovery in cities. **Blue-Green Systems**, v. 2, n. 1, p. 138-172, 2020.

KOEFENDER, Amália. Gestão de resíduos sólidos urbanos sob a ótica da economia circular: barreiras e fatores importantes para a circularidade dos materiais. 2020.

KUMAR, Dinesh; HIREMATH, Anand M.; ASOLEKAR, Shyam R. Integrated management of wastewater through sewage fed aquaculture for resource recovery and reuse of treated effluent: a case study. **Apcbee Procedia**, v. 10, p. 74-78, 2014.

LAKHO, Fida Hussain et al. Decentralized grey and black water reuse by combining a vertical flow constructed wetland and membrane based potable water system: Full scale demonstration. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104688, 2021.

LANGERGRABER, Guenter et al. Implementing nature-based solutions for creating a resourceful circular city. **Blue-Green Systems**, v. 2, n. 1, p. 173-185, 2020.

LANGERGRABER, Guenter et al. Towards a cross-sectoral view of nature-based solutions for enabling circular cities. **Water**, v. 13, n. 17, p. 2352, 2021.

LARA, Beatriz Leão Evangelista de; DEZEN-KEMPTER, Eloísa; PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano. Economia Circular Aplicada aos Resíduos da Construção Civil: revisão de literatura. 2021.

LAVRNIC, Stevo; MANCINI, Maurizio L. Can constructed wetlands treat wastewater for reuse in agriculture? Review of guidelines and examples in South Europe. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 11, p. 2616-2626, 2016.

LIBRALATO, Giovanni; GHIRARDINI, Annamaria Volpi; AVEZZÙ, Francesco. To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal of environmental management**, v. 94, n. 1, p. 61-68, 2012.

LIMA, M. et al. Water reuse potential for irrigation in Brazilian hydrographic regions. **Water Supply**, v. 21, n. 6, p. 2799-2810, 2020.

MARIN, P., TAL, S., YERES, J., KLAS, R. **Water Management in Israel: Key Innovations and Lessons Learned for Water Scarce Countries**. Banco Mundial, Washington, DC. 2017.

MARQUES, Felipe Ramos et al. Development of a semi-quantitative approach for the assessment of microbial health risk associated with wastewater reuse: A case study at the household level. **Environmental Challenges**, v. 4, p. 100182, 2021.

MASI, F.; RIZZO, A.; REGELSBERGER, M. The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 275-284, 2018.

MASSOUD, May A.; TARHINI, Akram; NASR, Joumana A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 1, p. 652-659, 2009.

MATOS, A.T. Disposição de águas residuárias no solo. Viçosa, MG: **AEAGRI**, 2007. 140 p. (Caderno didático n. 38).

MATOS, AT de; MATOS, MP de. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. **UFV**, 2017.

MCDONOUGH, W; BRAUNGART, M. **Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things** North Point Press Ed., USA, 2002

MEDEIROS, D. M. de. Estudo sobre a aplicação de wetlands construídos para o tratamento de esgoto em loteamentos, condomínios e comunidades isoladas. 2017. 191p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MILANI, Mirco et al. Treatment of winery wastewater with a multistage constructed wetland system for irrigation reuse. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1260, 2020.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Recursos Hídrico (CERH) nº65. Diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) de sistemas públicos e privados. **Diário Oficial do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte/MG, 2020.

MOHER, David et al. Improving the quality of reports of meta-analyses of randomised controlled trials: the QUOROM statement. **Oncology Research and Treatment**, v. 23, n. 6, p. 597-602, 2000. LIBERATI, Alessandro et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of clinical epidemiology*, v. 62, n. 10, p. e1–e34, 2009.

MOREIRA, Fernanda Deister; DIAS, Edgard Henrique Oliveira. Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review. **Environmental Research**, v. 190, p. 110016, 2020.

MOSCOSO, J. C.; LEON, G. S. Curso de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales. Lima-Peru: OPS/CEPIS/PUB96, 1996. 151 p

MOTA, F. S. da; ALVES, E. G. P.; BECKER, C. T. Informação climática para planejamento da necessidade de água para irrigação do arroz no Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**, v. 43, n. 392, p.3-6, 1990.

MOTA, Suetonio. Reúso de águas no Brasil: situação atual e perspectivas. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. Investigación, desarrollo y práctica, v. 15, n. 2, p. 666-684, 2022.

NAN, Xi; LAVRNIC, Stevo; TOSCANO, Attilio. Potential of constructed wetland treatment systems for agricultural wastewater reuse under the EU framework. **Journal of Environmental Management**, v. 275, p. 111219, 2020.

NIVALA, Jaime et al. Side-by-side comparison of 15 pilot-scale conventional and intensified subsurface flow wetlands for treatment of domestic wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 1500-1513, 2019.

OFORI, Solomon et al. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. **Science of The Total Environment**, v. 760, p. 144026, 2021.

OLIVEIRA, L.O.V. Características sensoriais e o risco microbiológico em águas cinza tratadas para reúso predial. 2015. 174 f. 2015. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES.

ORAL, Hasan Volkan et al. A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: A critical assessment based on case studies and literature. **Blue-Green Systems**, v. 2, n. 1, p. 112-136, 2020.

ORAL, Hasan Volkan et al. Management of urban waters with nature-based solutions in circular cities—exemplified through seven urban circularity challenges. **Water**, v. 13, n. 23, p. 3334, 2021.

PAPA, Matteo et al. How far are we from closing the loop of sewage resource recovery? A real picture of municipal wastewater treatment plants in Italy. **Journal of Environmental Management**, v. 198, p. 9-15, 2017.

PENG, Y., XIAO, Y., FU, Z., DONG, Y., ZHENG, Y., YAN, H. & LI, X. 2019 Precision irrigation perspectives on the sustainable water-saving of field crop production in China: water demand prediction and irrigation scheme optimization. **Journal of Cleaner Production** (239), 365–367. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.347

PINNINTI, Ramdas et al. Investigating the working efficiency of natural wastewater treatment systems: A step towards sustainable systems. **Water Practice & Technology**, v. 16, n. 3, p. 1012-1025, 2021.

PLATZER, C. Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. **Water Science and Technology**, v.40, n.3, p.257-263, 1999.

RECH, Helenice et al. REUSO DE EFLUENTE EM FERTIRRIGAÇÃO DE Cocos nucifera L. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 11, n. 2, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) nº 419. Critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial Eletrônico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre/RS, 2020.

RODRIGUES, L. N. Níveis de reposição da evapotranspiração da mamoneira irrigada com água residuária. 2008. 161p. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, Marco et al. Constructed Wetlands in Latin America and the Caribbean: A Review of Experiences during the Last Decade. **Water**, [S. l.], p. 1,30, 18 jun. 2020.

ROUSSEAU, Diederik et al. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. **Water research**, v. 38, n. 6, p. 1484-1493, 2004.

SAEED, T.; SUN, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. **Journal of Environmental Management**, v, 112, p,429-448, dez, 2012.

SANTOS, A. S. P. et al. Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reúso no Brasil. **Revista Sustinere**, v. 8, n. 2, p. 437-462, 2020.

SANTOS, A.S.P.; VIEIRA, J.M.P. Reúso de água para o desenvolvimento sustentável: Aspectos de regulamentação no Brasil e em Portugal. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 8, n. 1, p. 50-68. 2020. Disponível em: <<https://portalseer.ufba.br/index.php/gesta/article/view/36462/21627>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

SANTOS, Ana Silvia Pereira et al. Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reúso no Brasil. **Revista Sustinere**, v. 8, n. 2, p. 437-462, 2020.

SANTOS, Ana Silvia Pereira; LIMA, Maíra Araújo de Mendonça. Nota Técnica 2 – Aspectos legais relacionados ao reúso de águas como diretriz de institucionalização da prática no Brasil. Coletânea de Notas Técnicas 3: Reúso não potável de água. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v2 n.3, p. 15-27, 2022.

SÃO PAULO. Resolução conjunta SES/SIMA Nº 1/2020. Disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. Diário Oficial do Estado de São Paulo. São Paulo, 2020.

SCHROEDER, Amanda Kempt et al. Avaliação de desempenho e custos aplicada aos wetlands construídos e tecnologias normatizadas empregadas no tratamento descentralizado de esgoto. **Revista DAE**, v. 70, n 236, pp 67-78, 2022.

Šereš, M.; Innemanová, P.; Hnátková, T.; Rozkošný, M.; Stefanakis, A.; Semerád, J.; Cajthaml, T. Evaluation of Hybrid Constructed Wetland Performance and Reuse of Treated Wastewater in Agricultural Irrigation. **Water** 2021, 13, 1165. <https://doi.org/10.3390/w13091165>

SEZERINO, P. H.; ROUSSO, B. Z.; PELISSARI, C.; SANTOS, M. O.; FREITAS, M. N.; FECHINE, V. Y.; LOPES, A. M. B. Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção. Tubarão: Ministério da Saúde, **Fundação Nacional de Saúde**, 2018.

SGROI, Massimiliano et al. Removal of organic carbon, nitrogen, emerging contaminants and fluorescing organic matter in different constructed wetland configurations. **Chemical Engineering Journal**, v. 332, p. 619-627, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.122> Acesso em: 22 mai. 2021.

SILVA, A. R. da; SEZERINO, P. H. Aplicabilidade dos Wetlands Construídos no tratamento de esgoto sanitário e doméstico. Wetlands Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: Experiências Brasileiras. Organização de Pablo Heleno Sezerino, Catiane Pelissari. 1 ed. Curitiba: Brazil Publishing, 2021. Disponível em: <<https://gesad.ufsc.br/files/2021/02/E-book-WETLANDS-BRASIL-Experi%C3%Aancias-Brasileiras-1.pdf>> Acesso em 22 mai. 2021.

SILVA, S. C.; MIRANDA, D. C.; RAMOS, M. L. G. Irrigação de dois cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) com efluentes de wetlands construídos. **Rev. Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais** 7: 214-224. 2019.

SOUSA, Andrea Françoise Sanches de. **Diretrizes para implantação de sistemas de reúso de água em condomínios residenciais baseadas no método APPCC-análise de perigos e pontos críticos de controle: estudo de caso Residencial Valville I**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

STEFAN, E.; FERNANDES, C. V. S. Water Availability and Water Reuse: A New Approach for Water Resources Management. In: Water Reuse within a Circular Economy Context (Series II). Global Water Security Issues (GWSI) Series – No.2, UNESCO Publishing, Paris, 2020.

STEFANAKIS, Alexandros I.; CALHEIROS, Cristina SC; NIKOLAOU, Ioannis. Nature-based solutions as a tool in the new circular economic model for climate change adaptation. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 303-318, 2021.

STEFANAKIS, Alexandros I.; CALHEIROS, Cristina SC; NIKOLAOU, Ioannis. Nature-based solutions as a tool in the new circular economic model for climate change adaptation. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 303-318, 2021.

STEFANAKIS, Alexandros; AKRATOS, Christos S.; TSIHRINTZIS, Vassilios A. **Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment**. Newnes, 2014.

TELLES, DD. Aspectos da utilização de corpos d'água que recebem esgoto sanitário na irrigação de culturas agrícolas. In: Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. **Editora Blucher**, 2021.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British journal of management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

UNESCO; UNESCO i-WSSM. **Water Reuse within a Circular Economy Context** (Series II). Global Water Security Issues (GWSI) Series – No.2, UNESCO Publishing, Paris. 2020.

VEGAS, Cintia. Mananciais restringem instalações de indústrias. **Tribuna**. Curitiba, 19 de jan. de 2013. Disponível em: <<https://www.tribunapr.com.br/noticias/parana/mananciais-restringem-instalacoes-de-industrias/>>. Acesso em: 03 de mai. De 2023.

VERA-PUERTO, I. L.; et al. “Reuse of Treated Municipal Wastewater from Constructed Wetlands for Cut Flowers Irrigation in Aeroponic Cultivation,” **Ing. Univ.**, vol. 24, 2020. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued24.tmrw>

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1995. 240 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

VON SPERLING, Marcos; SEZERINO, Pablo H. Dimensionamento de Wetlands Construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes. **Boletim Wetlands Brasil**, p. 65, 2018.

VYMAZAL, J., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Science of the Total Environment** 380, 65–78.

WHITTEMORE, Robin; KNAFL, Kathleen. The integrative review: updated methodology. **Journal of advanced nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. World Health Organization, 2006.

## APÊNDICE I

Quadro 8 - Publicações levantadas na RSL sobre estudos de caso com reuso da água recuperada (continua).

<b>Sistema</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico</b>
1	Qomariyah et al.	2018	Linking climate change to water provision: greywater treatment by constructed wetlands	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science
2	Zuniga et al.	2016	Evaluation of a treatment system for domestic wastewater reuse	Revista Internacional de Contaminacion Ambiental
3	Ezzat; Moustafa	2021	Treating wastewater under zero waste principle using wetland mesocosms	Frontiers of Environmental Science & Engineering
4	De Anda et al.	2018	High-strength domestic wastewater treatment and reuse with onsite passive methods	Water (Switzerland)
5	Laaffat et al.	2019	Biotechnological approach of greywater treatment and reuse for landscape irrigation in small communities	Saudi Journal of Biological Sciences
6	Herrera-Lopez et al.	2021	Coupled uasb-constructed wetland system for reuse of wastewater for gardening irrigation	Revista Internacional de Contaminacion Ambiental
7	Zraunig et al.	2019	Long term decentralized greywater treatment for water reuse purposes in a tourist facility by vertical ecosystem	Ecological Engineering
8	Estelrich et al.	2021	Feasibility of vertical ecosystem for sustainable water treatment and reuse in touristic resorts	Journal of Environmental Management
9	Pillai; Vijayan	2012	Decentralized greywater treatment for nonpotable reuse in a vertical flow constructed wetland	2012 International Conference on Green Technologies
10	Gonçalves et al.	2021	Microbiological risk from non-potable reuse of greywater treated by anaerobic filters associated to vertical constructed wetlands	Journal of Water Process Engineering
11	Sklarz et al.	2009	A recirculating vertical flow constructed wetland for the treatment of domestic wastewater	Desalination
12	Morandi et al.	2021	Elevated vertical-flow constructed wetlands for light greywater treatment	Water (Switzerland)
13	Lakho et al.	2021	Decentralized grey and black water reuse by combining a vertical flow constructed wetland and membrane based potable water system: Full scale demonstration	Journal of Environmental Chemical Engineering
14	Ayaz et al.	2015	Effluent quality and reuse potential of domestic wastewater treated in a pilot-scale hybrid constructed wetland system	Journal of Environmental Management



Quadro 8 - Publicações levantadas na RSL sobre estudos de caso com reuso da água recuperada (continuação).

Sistema	Autores	Ano	Título	Periódico
15	Haghshenas-Adarmanabadi et al.	2016	Evaluation of horizontal-vertical subsurface and hybrid constructed wetlands for tertiary treatment of conventional treatment facilities effluents in developing countries	Water, Air, and Soil Pollution
16	Thalla et al.	2019	Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents	Applied Water Science
17	Gholipour; Stefanakis	2021	A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate	Ecological Engineering
18	Collivignarelli et al.	2020	Horizontal flow constructed wetland for greywater treatment and reuse: An experimental case	International Journal of Environmental Research and Public Health
19	Qomariyah et al.	2016	Use of macrophyte plants, sand & gravel materials in constructed wetlands for greywater treatment	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering
20	Andreo-Martinez et al.	2017	Domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland: A case study in the southeast of Spain	Bioresource Technology
21	Quartaroli et al.	2018	Wastewater chlorination for reuse, an alternative for small communities	Water Environment Research
22	Saggai et al.	2017	Long-term investigation of constructed wetland wastewater treatment and reuse: Selection of adapted plant species for metaremediation	Journal of Environmental Management
23	Licciardello et al.	2018	Wastewater tertiary treatment options to match reuse standards in agriculture	Agricultural Water Management
24	El-Khateeb et al.	2009	Use of wetlands as post-treatment of anaerobically treated effluent	Desalination
25	Abed et al.	2016	Potential of horizontal subsurface-flow constructed wetlands for polishing of treated sewages	Journal of Environmental Engineering (United States)
26	Gao; Hu	2012	Bio-contact oxidation and greenhouse-structured wetland system for rural sewage recycling in cold regions: A full-scale study	Ecological Engineering
27	Pinho; Mateus	2021	Sustainable production of reclaimed water by constructed wetlands for combined irrigation and microalgae cultivation applications	Hydrology

Quadro 8 - Publicações levantadas na RSL sobre estudos de caso com reuso da água recuperada (continuação).

Sistema	Autores	Ano	Título	Periódico
28	Zurita; White	2014	Comparative study of three two-Stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing countries	Water (Switzerland)
29	Mishra et al.	2018	Application of horizontal flow constructed wetland and solar driven disinfection technologies for wastewater treatment in India	Water Practice and Technology
30	Casierra-Martinez et al.	2016	Domestic wastewater disinfection using a coupled system for reuse purposes	Tecnologia y Ciencias del Agua
31	Tencer et al.	2009	Establishment of a constructed wetland in extreme dryland	Environmental Science and Pollution Research
32	Silva et al.	2020	Treatment options for the direct reuse of reclaimed water in developing countries	Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection
33	Li et al.	2021	Constructed wetland treatment of source separated washing wastewater in rural areas of southern China	Separation and Purification Technology
34	Liamlaem et al.	2019	Sustainable wastewater management technology for tourism in Thailand: Case and experimental studies	Water Science and Technology
35	Licata et al.	2021	Performance of a Pilot-Scale Constructed Wetland and Medium-Term Effects of Treated Wastewater Irrigation of <i>Arundo donax</i> L. on Soil and Plant Parameters	Water
36	Ergaieg; Miled	2021	Full-scale hybrid constructed wetlands monitoring for decentralized tertiary treatment of municipal wastewater	Arabian Journal of Geosciences
37	Licata et al.	2019	Research focusing on plant performance in constructed wetlands and agronomic application of treated wastewater - A set of experimental studies in Sicily (Italy)	PLoS ONE
38	Russo et al.	2019	Constructed wetlands combined with disinfection systems for removal of urban wastewater contaminants	Science of the Total Environment
39	Rahi et al.	2020	Biochemical performance modelling of non-vegetated and vegetated vertical subsurface-flow constructed wetlands treating municipal wastewater in hot and dry climate	Journal of Water Process Engineering
40	Afifi et al.	2015	Developing an integrated sustainable sanitation system for urban areas: Gaza strip case study	Procedia CIRP

Quadro 8 - Publicações levantadas na RSL sobre estudos de caso com reuso da água recuperada (continuação).

<b>Sistema</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico</b>
41	Paleologos et al.	2019	Greywater reuse in the water-scarce Gulf Region	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science
42	Munoz-Nava; Baumann	2017	Coliform bacteria removal through a system of activated sludge and constructed wetland	Ecosistemas y Recursos Agropecuarios
43	Otter et al.	2020	Disinfection for decentralized wastewater reuse in rural areas through wetlands and solar driven onsite chlorination	Science of the Total Environment
44	Santos et al.	2020	Microbiological evaluation of constructed wetlands and solar disinfection in wastewater treatment and reuse	Journal of Water and Health
45	Sáuco et al.	2021	Hybrid wastewater treatment system based in a combination of high rate algae pond and vertical constructed wetland system at large scale	Journal of Water Process Engineering
46	Nivala et al.	2019	Vertical flow constructed wetlands for decentralized wastewater treatment in Jordan: Optimization of total nitrogen removal	Science of the Total Environment
47	Travis et al.	2012	Decentralized wetland-based treatment of oil-rich farm wastewater for reuse in an arid environment	Ecological Engineering
48	Nguyen et al. (a)	2020	Combined biochar vertical flow and free-water surface constructed wetland system for dormitory sewage treatment and reuse	Science of the Total Environment
49	Abdel-Shafy et al.	2017	Blackwater treatment via combination of sedimentation tank and hybrid wetlands for unrestricted reuse in Egypt	Desalination and Water Treatment
50	Omidinia-Anarkoli; Shayannejad	2021	Improving the quality of stabilization pond effluents using hybrid constructed wetlands	Science of the Total Environment
51	Silva et al.	2021	Treatment of university campus wastewaters by anaerobic reactor and multi-stage constructed wetlands	Journal of Water Process Engineering
52	Seres et al.	2021	Evaluation of hybrid constructed wetland performance and reuse of treated wastewater in agricultural irrigation	Water (Switzerland)
53	Milani et al.	2020	Treatment of winery wastewater with a multistage constructed wetland system for irrigation reuse	Water (Switzerland)
54	Brix et al.	2011	The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi-System design and lessons learned during implementation and operation	Ecological Engineering

Quadro 8 - Publicações levantadas na RSL sobre estudos de caso com reuso da água recuperada (continuação).

<b>Sistema</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico</b>
55	Ávila et al. (b)	2013	Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions	Ecological Engineering
56	Ávila et al. (a)	2013	Integrated treatment of combined sewer wastewater and stormwater in a hybrid constructed wetland system in southern Spain and its further reuse	Ecological Engineering
57	Vera; Márquez	2013	Two years monitoring of the natural system for wastewater reclamation in Santa Lucía, Gran Canaria Island	Ecological Engineering
58	Torrens et al.	2020	Innovative multistage constructed wetland for municipal wastewater treatment and reuse for agriculture in Senega	Water (Switzerland)

## APÊNDICE II

Quadro 9 - Publicações levantadas pela revisão integrativa de estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS (continua).

<b>Sistema</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico/Universidade</b>
U1	Monteiro	2009	Viabilidade técnica do emprego de sistemas tipo "wetlands" para tratamento de água cinza visando o reuso não potável	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Mestrado em Engenharia Civil (Dissertação)
U2	Sezerino et al.	2012	Constructed wetlands and sand filter applied as onsite post-treatment of anaerobic effluent	IWA Water Practice & Technology
U3	Pitaluga et al.	2009	Tratamento de esgoto doméstico por zona de raízes precedida de tanque séptico: eficiência do sistema e potencialidade de reuso do efluente	Anais 25 CBESA
U4	Menezes	2019	Desempenho de um sistema de wetland construído modificado no tratamento de água cinza clara	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Dissertação)
U5	Carvalho et al.	2016	Desempenho de biofiltro, wetland e filtro de carvão ativado no tratamento de águas cinzas no ambiente doméstico	Anais XVII Silubesa
U6	Teske	2016	Construção de um wetland híbrido para polimento de efluente doméstico	Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Curso de Engenharia Ambiental (TCC)
U7	Santiago e Calijuri	2009	Desempenho de alagados construídos no pós-tratamento de decanto-digestor com filtro acoplado instalado no semiárido nordestino	Anais 25 CBESA
U8	Ferreira	2013	Avaliação de desempenho de wetlands construídos para o tratamento de efluente de reator UASB: estudo de caso da ETE Vog Ville	Universidade Federal da Bahia - Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento (Dissertação)
U9	Decezaró et al.	2021	Potencial de nitrificação/desnitrificação de tanque séptico e wetland construídos com recirculação no tratamento descentralizado de esgoto de empreendimento habitacional	ABES Engenharia Sanitária e Ambiental
U10	Trein	2015	Monitoramento de sistemas descentralizados de wetlands construídos de fluxo vertical aplicados no tratamento avançado de esgotos	Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (Dissertação)

Quadro 9 - Publicações levantadas pela revisão integrativa de estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS (Continuação).

Sistema	Autores	Ano	Título	Periódico/Universidade
U11	Knupp	2013	Desempenho de um sistema composto por um filtro anaeróbio e um "wetland" horizontal na produção de água para reuso predial a partir de água cinza clara	Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (Dissertação)
U12	Sarnaglia	2014	Desempenho de um "wetland" vertical aplicado ao tratamento do efluente de um filtro anaeróbio em uma estação de tratamento de águas cinzas claras visando o reuso não potável em edificações residenciais	Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (Dissertação)
U13	Leal	2019	Wetland construído para tratamento de efluente secundário em condomínio empresarial, Uberlândia-MG	Universidade Federal de Uberlândia - Programa Pós-Graduação em Qualidade Ambiental (Dissertação)
U14	Monteiro	2014	Wetlands construídos empregados no tratamento descentralizado de águas cinzas residencial e de escritório	Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (Dissertação)
U15	Oliveira	2015	Características sensoriais e o risco microbiológico em águas cinza tratadas para reuso predial	Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (Tese)
U16	Degen	2018	Avaliação de sistemas locais de wetlands construídos de fluxo vertical aplicados no tratamento de esgotos em empreendimentos comerciais e industriais	Universidade Federal de Santa Catarina - Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (TCC)
U17	Abreu	2019	Estudo de caso sobre tratamento de esgoto sanitário através de wetlands construídos em escala real no sudeste brasileiro: questões operacionais, eficiências de tratamento e interferências do tempo de operação e da sazonalidade	Universidade de São Paulo - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade (Dissertação)
R1	Souza et al.	2013	Construção e avaliação da eficiência de leitos cultivados no tratamento de águas cinzas (lavanderia)	Anais 27 CBESA
R2	Almeida et al.	2020	Sistemas alagados construídos: tratamento de baixo custo para esgoto sanitário em áreas rurais	Research Society and Development

Quadro 9 - Publicações levantadas pela revisão integrativa de estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS (Continuação).

Sistema	Autores	Ano	Título	Periódico/Universidade
R3	Souza et al.	2020	Uso de sistemas alagados construídos no tratamento de águas negras em áreas rurais	Research Society and Development
R4	Pires	2012	Construção participativa de sistemas de tratamento de esgoto doméstico no assentamento rural Olga Benário-MG	Universidade Federal de Viçosa - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Dissertação)
R5	Lima et al.	2015	Tratamento de esgotos utilizando sistema composto de fossas sépticas seguidas de leitos cultivados	Anais 28 CBESA
R6	Maier	2007	Qualidade de águas superficiais e tratamento de águas residuárias por meio de zona de raízes em propriedades de agricultores familiares	Universidade Federal de Santa Maria - Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo (Dissertação)
R7	Schirmer et al.	2009	Tratamento de esgoto por zona de raízes em comunidade rural - Parte 2: avaliação	Revista Acadêmica (Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Impresso)
R8	Rizzon	2020	Monitoramento de desempenho de longo período de um sistema de tratamento unifamiliar de água cinza empregando wetland construído	Universidade Federal de Santa Catarina - Curso Engenharia Sanitária e Ambiental (TCC)
R9	Guimarães	2013	Comportamento de filtro plantado horizontal (wetlands construídos) no tratamento de esgoto unifamiliar	Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (Dissertação)
R10	Sartor et al.	2021	Dimensionamento e avaliação de wetland construído utilizado para tratamento de efluente doméstico em área rural: um estudo de caso	Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais
R11	Locastro et al.	2013	Avaliação da eficiência de leitos cultivados na remoção de carga poluidora de esgotos sanitários domésticos	Anais 27 CBESA
R12	Lutterback et al.	2018	Integrated system with constructed wetlands for the treatment of domestic wastewaters generated at a rural property - Evaluation of general parameters ecotoxicity and cytogenetics	Ecological Engineering
R13	Silva et al.	2017	Tratamento de águas residuárias domésticas por zona de raízes de macrófitas em uma residência na cidade de Marabá/PA	Anais 29 CBESA Fenasan 2017
R14/R26	Timm	2015	Estudo de casos de wetlands construídos descentralizados na região do Vale dos Sinos e Serra Gaúcha	Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Dissertação)

Quadro 9 - Publicações levantadas pela revisão integrativa de estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS (Continuação).

<b>Sistema</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico/Universidade</b>
R15	Leite et al.	2020	Uso de wetlands construídos no reaproveitamento de águas cinzas em comunidades rurais do Cariri Cearense	Anais IV Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação
R16	Sabei	2015	A inserção da educação ambiental não formal no processo de implantação de saneamento ambiental na comunidade rural Colônia Mergulhão, São José dos Pinhais - PR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (Dissertação)
R17	Parolin et al.	2012	Tratamento de esgoto por zona de raízes: análise e eficiência	Revista GEOMAE
R18	Pansonato	2010	Tratamento e reuso de água cinza utilizando wetlands construídos e desinfecção solar	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Dissertação)
R19	Batista et al.	2013	Sistema ecológico para tratamento de esgoto primário em assentamentos rurais do semiárido brasileiro	Revista Agrarian
R20	Salaro Júnior	2008	Avaliação da eficiência de sistema fito-pedológico (wetlands) na depuração de efluentes domésticos gerados em pequena comunidade	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Ciências Agrônomicas (Dissertação)
R21	Rosa et al.	2013	A contribuição de sistemas de tratamento de esgotos por zona de raízes para gestão de recursos hídricos na região metropolitana de Curitiba	Anais 27 CBESA
R22	Rosa et al.	2015	Wetlands construídas como pós tratamento de efluentes domésticos: estudo de caso de um hotel campestre de pequeno porte	Anais 28 CBESA
R23	Sérvulo et al.	2019	Vazão e tratamento secundário de esgoto doméstico em estação de pequeno porte com sistema de zona de raízes	Irriga
R24	Rodrigues	2012	Tratamento de esgoto por zona de raízes: experiências vivenciadas numa escola rural no município de Campos Novos/SC	Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (Dissertação)



Quadro 9 - Publicações levantadas pela revisão integrativa de estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS (Continuação).

Sistema	Autores	Ano	Título	Periódico/Universidade
R25	Silveira e Arsego	2014	Avaliação da eficiência do tratamento de esgoto por estação de zonas de raízes	Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curso de Engenharia Ambiental (TCC)
R27	dos Santos e Roston	2016	Desempenho de alagados construídos (constructed wetlands) de fluxo vertical no pós-tratamento de esgoto sanitário: potencial para o reuso agrícola	Engenharia na Agricultura
R28	Rouso	2014	Desempenho de um wetland construído horizontal empregado no tratamento de esgoto doméstico ao longo de 20 anos de operação	Universidade Federal de Santa Catarina - Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (TCC)
R29	Phillipi et al.	2006	Root zone system to treat wastewater in rural areas in south of Brazil	10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control
R30	Monteiro et al.	2013	Sistema híbrido de wetlands construídos para tratamento de efluente de tanque séptico	Anais 27 CBESA
B2	Pereira	2011	O uso da unidade wetland no sistema de pós-tratamento de esgoto: um estudo de caso no seminário nordestino	Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético (Tese)
B1	Lourenço	2017	Remoção de matéria orgânica e nutrientes de esgoto doméstico por wetland na Estação de Tratamento Aparecida - Campos Novos	Universidade do Estado de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (Dissertação)
B3	Prefeitura Municipal de Meleiro	2013	Memorial Descritivo do Projeto do Sistema de Esgotamento Sanitário de ruas diversas Meleiro/SC	-
B4	Giafferis	2011	Avaliação do potencial de reuso agrícola do efluente de uma estação de tratamento de esgoto com alagados construídos	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Ciências Agrônomicas (Tese)
B5	Curty	2018	Tratamento ecológico de efluentes domésticos com o uso de wetlands	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (Dissertação)

## APÊNDICE III

Tabela 22 - Eficiências de remoção nos estudos de caso com reuso da água recuperada.

Sistemas	Arranjos Tecnológicos	SST (%)	Turbidez (%)	DBO (%)	NT (%)	NH <sub>4</sub> (%)	PT (%)	CT (log)	<i>E. Coli</i> (log)
5; 7; 25a; 25b; 25c; 27; 30; 32; 33a; 33b; 33c; 35; 37a; 37b.	WCH	65,1	92,5	66,4	60,1	69,5	52,6	1,1	0,8
9; 11; 12a; 12b; 39; 43a; 43b; 48	WCV	76,4	81,2	89,8	41,7	90,8	83,7	3,1	3,0
15; 16; 15; 50a; 50b; 28b; 28c	SH	89,5	N/A	85,3	22,4	74,5	46,3	3,0	6,2
13; 18; 22; 40; 41; 44; 46a; 46b; 52	TS + WC	84,0	94,7	83,8	56,3	99,4	54,0	2,0	2,3
34b; 34c	TR + WC	75,4	68,5	82,0			62,9		
1; 19; 49; 58	TSed + WC	97,8	92,9	97,7	93,7	98,6	65,8	8,7	
53; 55; 56; 57	TImh + WC	94,7	88,6	93,7	64,2	81,4	35,1		5,8
6; 17; 47	RAC + WC	92,7	N/A	84,2	36,2	66,7	38,3	1,7	4,7
20; 21	DEC + WCH	83,8	65,0	97,8		81,6		3,5	5,5
34a	TS + TR + WCH	62,5	-36,8	53,1			57,4		
2	TS + BF + WCH	N/A	N/A	99,2		86,6	83,0	5,0	
3	TS + DRF + WCH	76,3	94,0	84,3			100,0	2,3	1,9
4	TS + FAN + WCH + Cl	97,1	98,8	98,3	47,6		55,6	7,9	7,9
8;51	RAe + WC	69,7	97,1	74,9	83,2	98,9	17,8	6,0	6,0
10	FAN + WCV	75,1	89,1	62,6			90,0		4,1
14;24	UASB + WC	98,9		96,4		77,0	41,2	9,2	8,2
26; 28a; 31; 36; 38; 54	WC + LE	30,3		64,9	65,2	62,1	39,0	1,1	3,9
23a	WCH + LE+ FA+ FD	93,5				84,2	11,5		4,2
23b	WCH + FA+ FD + UV					45,3	7,7		5,5
29	WCH + FZ + GiC			79,2			57,4	4,5	
42	LAB + WCV								6,9

Legenda: WCH = Wetland construído de fluxo horizontal; WCV = Wetland construído de fluxo vertical; SH= Sistema Híbrido; TS = tanque séptico; TR = tanque de retenção; TSed = tanque de sedimentação; TImh = Tanque Imhoff; RAC = Reator Anaeróbio Compartimentado; DEC = decantador primário; BF = biofiltro; DRF = *dynamic roughing filter*; RAe = Reator aeróbio; FAN = filtro anaeróbio; LE = lagoa de estabilização; FA = filtro de areia; FD = filtro em discos; FZ = filtro de zeólita; LAB = Lodo ativado em bateladas.

## APÊNDICE IV

Tabela 23 - Eficiências de remoção nos estudos de caso nacionais com sistemas WC-FSS.

Sistemas	Arranjos Tecnológicos	SST (%)	Turbidez (%)	DBO (%)	NT (%)	NH <sub>4</sub> (%)	PT (%)	CT (log)	<i>E. Coli</i> (log)
U1; R1; R2; R3; R4	WCH	84,2	91,5	75,9	40,0	27,5	64,5		1,8
R13; R15; R26	WCV	57,3		86,8	79,1	56,6	63,2	3,0	
U2; U3; U9; U16a; U16b; U16c; R5; R6a; R6b; R7; R8; R9; R10; R11; R16a; R16b; R17a; R17b; R17c; R16c; R16d; R23; R25; R28; R29; R30	TS + WC	87	80,6	85,3	65,8	52,2	71,5	3,8	1,8
R18	TSed + SH	96,3	98,7	98,1					
U10a; U10b; U16d	RAC + WCV + Cl	89,5		94,5		68,1	73,5	0,9	3,1
U11; U12	FAN + WC	80,2	71,5	52,7	21,4	28,5	88,0		1,0
U6; U13; R14a; R14b; R19; R14c; R14d; R24	TS + FAN + WC	54,7	90,5	85,6	71,1	39,5	75,4	2,7	1,4
R22	TS + FB + WCH		61,9	26,7	17,6		11,3	0,1	
R20	TE + DEC + FBr + WCH	77,5							
U4	Cevat/Cdig + WCH		83,6		96,8	45,5			
R21	TS + RA + WCH			93,4	71,5		6,0		0,1
U5	BF + WCH + FCA	97,5	92,7	97,7					
U7	DD + WCH	90,5		79,4		19,7	37,5		2,1
U14	TA + WCV	93,2	92,8			97,5		1,0	2,2
U17	TE+A + SH + WC-FL			86,4					
R27	LAB + WCV	86,6	92,9			57,8			
R12	UASB + BF + WCH			99,5	99,5		88,6		

Legenda: WCH = Wetland construído de fluxo horizontal; WCV = Wetland construído de fluxo vertical; TS = tanque séptico; TSed = tanque de sedimentação; RAC = Reator Anaeróbio Compartimentado; FAN = filtro anaeróbio; FB = filtro biológico anaeróbio; TE = tanque de equalização; DEC = decantador primário; FBr = Filtro de brita; Cevat/Cdig = câmara de evapotranspiração com câmara de digestão anaeróbia; RA = reator anaeróbio; BF = biofiltro; FCA = filtro de carvão ativado; DD = decanto-digestor; TA = tanque de acúmulo; TE+A = tanque de equalização com aeração forçada; LAB = lodo ativado em bateladas; Cl = cloração; WC-FL = Wetland construído de fluxo livre.