

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE QUÍMICA E BIOLOGIA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS AMBIENTAIS

MARIA MARTA VAZ ZANONI RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE
ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA VISÃO GERAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

MARIA MARTA VAZ ZANONI RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE
ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA VISÃO GERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais do Departamento de Química e Biologia – DAQBI, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Processos Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Hermes Passig

CURITIBA

2016

MARIA MARTA VAZ ZANONI RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE
ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA VISÃO GERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do grau de TECNÓLOGO EM PROCESSOS AMBIENTAIS pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI) do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela seguinte banca examinadora:

Membro 1 – PROF.^a Dr.^a KARINA QUERNE CARVALHO
Departamento Acadêmico de Construção Civil (UTFPR)

Membro 2 – CLAUDIR JOSÉ MORAIS
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Orientador – PROF. Dr. FERNANDO HERMES PASSIG
Departamento Acadêmico de Química e Biologia (UTFPR)

Coordenador de Curso – PROF. Me. ALESSANDRO FEITOSA MACHADO

Curitiba, 05 de setembro de 2016.

A Deus.

Ao meu esposo, Tiago.

À minha irmã, Mariangela, e aos meus pais, Maria Aparecida e Sérgio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu chegar até aqui.

Ao Prof. Dr. Fernando Hermes Passig, por toda a orientação e ensinamentos.

À Prof.^a Dr.^a Karina Querne de Carvalho e ao mestrando Claudir Moraes, por terem aceitado fazer parte de minha banca e contribuir para a melhoria desse trabalho.

À Prof.^a Me. Larissa Kummer, por todo o auxílio nesta disciplina.

A todos os professores do curso de tecnologia em processos ambientais por todos os ensinamentos e experiências proporcionadas ao longo do curso.

A todos os professores que já me orientaram no decorrer de minha vida acadêmica.

Aos meus amigos e familiares, que sempre me apoiaram, em especial às amigas Jana e Dani, à minha tia Dinha, e ao meu sogro, José Valmor.

Ao meu esposo, Tiago, por todo o incentivo e amor.

À minha irmã, Mariangela e aos meus pais, Maria Aparecida e Sérgio, que são minha base para a vida.

"Quem procura a verdade, consciente ou inconscientemente, procura a Deus." (Edith Stein)

RESUMO

RODRIGUES, M. M. V. Z. **Utilização de *wetlands* construídos no tratamento de águas residuárias: uma visão geral**. 2016. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso superior de Tecnologia em Processos Ambientais, Departamento de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

O tratamento de águas residuárias por meio de *wetlands* construídos, Sistemas Alagados Construídos (SACs) ou Filtros Plantados com Macrófitas (FPM), teve início na Alemanha, na década de 50. No Brasil, teve início em 1980, tendo grande aumento nas pesquisas a partir de 1990. Há diversas modalidades de *wetlands* construídos: de fluxo superficial livre (com plantas flutuantes, submersas ou emergentes); de fluxo subsuperficial (horizontal ou vertical), ou híbridos. Cada modalidade apresenta diferentes variáveis envolvidas na elaboração desses sistemas, os quais necessitam ser adequados a cada caso. O objetivo geral desse trabalho foi realizar um levantamento da bibliografia pertinente em artigos nacionais e internacionais, a fim de fornecer subsídios à aplicação dos *wetlands* no tratamento de efluentes avaliando sua eficiência caso a caso. Para efeito de comparação foram destacadas as seguintes variáveis: características físicas locais, tipo do efluente tratado, tipo de fluxo, macrófitas aquáticas utilizadas, número de indivíduos plantados por metro quadrado, meio suporte e tempo de detenção hidráulico. Para se atender ao objetivo proposto foram utilizadas várias revisões da literatura, a fim de se obter uma tabela de classificação dos *wetlands* construídos estudados por meio das variáveis citadas, cuja finalidade será a tomada de decisão de sua utilização ou não.

Palavras-chave: Leitos Cultivados. Macrófitas aquáticas. Zona de raízes. Fluxo Superficial. Fluxo Subsuperficial.

ABSTRACT

RODRIGUES, M. M. V. Z. **Use of constructed wetlands in the wastewater treatment: an overview**. 2016. 61 p. Term paper - Associate Degree in Environmental Process, Department of Chemistry and Biology, Federal Technological University of Paraná, 2016.

The wastewater treatment through constructed wetlands, began in Germany in the 50s. In the Brazil the systems began in 1980, with large increases in research since 1990. There are several types of constructed wetlands: Free Surface Flow (floating, submerged or emergent plants); Subsurface Flow (horizontal or vertical), or Hybrid. Each one has different variables involved in the development of these systems, which need to be adapted to each case. The aim of this study was to survey the relevant literature in national and international articles in order to provide subsidies for the implementation of wetlands in wastewater treatment, evaluating their effectiveness in each case. For comparison, the following variables were analyzed: local characteristics, the effluent type, flow, aquatic plants, number of individuals planted per square meter, substrates, and hydraulic retention time (HRT). A review of the literature was used in order to obtain a ranking of constructed wetlands studied through the mentioned variables, to people making the decision to use this treatment or other .

Keywords: Cultivated beds. Macrophytes. Root zone. Superficial flow. Sub-surface flow.

LISTA DE SIGLAS

ARC	Águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro
Cfa	Clima temperado úmido com verão quente
Cfb	Clima temperado úmido com verão temperado
Cwb	Clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado
Csa	Clima temperado úmido com verão seco e quente
Csb	Clima temperado úmido com verão seco e temperado
CW	<i>Wetlands</i> construídos (do inglês, “Constructed <i>Wetlands</i> ”)
CWFSL	<i>Wetlands</i> construídos de Fluxo Superficial Livre
CWFSS	<i>Wetlands</i> Construídas de Fluxo Subsuperficial
CWFSSH	<i>Wetlands</i> construídos de Fluxo Subsuperficial Horizontal
CWFSSV	<i>Wetlands</i> construídos de Fluxo Subsuperficial Vertical
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio (concentração, em mg/L)
DQO	Demanda Química de Oxigênio (concentração, em mg/L)
EFIC	Eficiência (%)
N-NH ₄	Íon Amônio (concentração, em mg/L)
NT	Nitrogênio Total (concentração, em mg/L)
PT	Fósforo Total (concentração, em mg/L)
SIF	Sistemas de Inferência Fuzzy
SS	Sólidos Sedimentáveis (concentração, em mg/L)
SST	Sólidos em Suspensão Totais (concentração, em mg/L)
SAC	Sistemas Alagados Construídos
TAH	Taxa de Aplicação Hidráulica (taxa, em cm/d)
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica (tempo, em d)

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicações e desafios no uso de <i>wetlands</i> construídas	18
Quadro 2 – Exemplos de vários tipos de águas residuais em CWFSL	27
Quadro 3 – Eficiência do tratamento de vários tipos de CW para DBO ₅ e SST	28
Quadro 4 – Eficiência do tratamento de vários tipos de CW para Nitrogênio e Fósforo	28
Quadro 5 – Tempos de Detenção Hidráulica encontrados para diferentes CW	32
Quadro 6 – Primeiros dez artigos mais relevantes a respeito de CW a nível internacional	37
Quadro 7 – Primeiros dez artigos mais relevantes a respeito de CW a nível nacional	41
Quadro 8 – Banco de dados de diversos tipos de <i>wetlands</i> construídos	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Tipos de Wetlands Construídas propostos por Kadlec e Wallace.....	19
Figura 2 –	Classificação de wetlands quanto às múltiplas variantes de projeto	21
Figura 3 –	Wetlands construídas de fluxo superficial livre (CWFSL) com macrófitas flutuantes	22
Figura 4 –	Wetlands construídas de fluxo superficial livre (CWFSL) com macrófitas emergentes.....	23
Figura 5 –	Wetlands construídas de fluxo subsuperficial horizontal (WFSSH) (com macrófitas emergentes).....	23
Figura 6 –	Wetlands construídas de fluxo subsuperficial vertical (WFSSV) (com macrófitas emergentes).....	24
Figura 7–	Exemplos de wetlands construídas de fluxo subsuperficial híbridas.	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1	<i>WETLANDS</i>	16
3.2	UTILIZAÇÃO E MECANISMOS.....	17
3.3	TIPOS DE <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS.....	18
3.4	PARÂMETROS DE PROJETO.....	25
3.4.1	Características físicas locais.....	26
3.4.2	Caracterização do Efluente.....	27
3.4.3	Tipo de Fluxo.....	28
3.4.4	Macrófitas Aquáticas.....	29
3.4.5	Número de indivíduos plantados por metro quadrado.....	30
3.4.6	Meio suporte.....	31
3.4.7	Tempo de Detenção Hidráulico (TDH).....	31
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	HISTÓRICO DAS BUSCAS.....	34
4.2	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS.....	35
4.3	COMPARATIVOS REALIZADOS.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1	ESTADO DA ARTE.....	37
5.2	CW DE FLUXO SUPERFICIAL LIVRE.....	44
5.3	CW DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL.....	45
5.4	CW DE FLUXO SUBSUPERFICIAL VERTICAL.....	45
5.5	CW DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HÍBRIDAS.....	46
5.6	BANCO DE DADOS REFERENTE A TRATAMENTO DE ESGOTO MUNICIPAL.....	47
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
7	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de águas residuárias por *Wetlands* Construídos (CW, do inglês, “*Constructed Wetlands*”) teve início na Alemanha, na década de 50 (Vymazal, 2005a), e no Brasil, na década de 80, com grande aumento nas pesquisas a partir de 1990 (Sezerino *et al.*, 2015). A ideia, segundo Hammer e Bastian (1989), surgiu da observação de *wetlands* naturais, “zonas de transição entre ambientes aquáticos e terrestres que se beneficiam das entradas de nutrientes, energia, plantas e animais provenientes de sistemas vizinhos (terrestres e aquáticos)”.

Em relação à importância das plantas nesses ambientes, Brix (1993) afirmou que ecossistemas dominados por macrófitas aquáticas estariam entre os mais produtivos no mundo. Isso pode estar relacionado ao fato de, segundo Kadlec e Wallace (2008), as plantas de *wetlands* serem adaptadas para valerem-se do abundante suprimento de água em detrimento de periódica escassez de outros elementos químicos essenciais, como o oxigênio.

Kadlec e Wallace (2008) ainda citam que, por causa da alta atividade biológica, os *wetlands* podem transformar a maioria dos poluentes comuns de águas residuárias em inofensivos subprodutos ou nutrientes essenciais que podem ser usados para uma produtividade biológica adicional.

Portanto, a utilização dos CW apresenta diversas vantagens, tais como: baixo custo de operação, pouca energia e manutenção requeridas, possibilidade de implantação próxima à fonte dos poluentes, operação simplificada, diminuição nas concentrações de matéria orgânica, sólidos em suspensão, nitrogênio, fósforo, metais traço e patógenos (Hammer e Bastian, 1989).

Entretanto, há duas principais desvantagens, citadas por Kadlec e Wallace (2008) necessitam de extensas áreas para tratamento de grandes volumes de efluentes (se comparados a filtros biológicos) e de um firme controle do projeto para que este respeite as limitações das espécies de plantas selecionadas, tendo em vista as faixas de concentrações aceitáveis para cada tipo.

Assim, há diferentes variáveis envolvidas na elaboração dos CW, as quais estão ligadas aos fatores que regem seu funcionamento, sendo os principais, segundo Kadlec e Wallace (2008), os processos biológicos e os ciclos biogeoquímicos. Com base nisso, surgem diversas modalidades de CW, as quais necessitam ser adequadas para cada fim.

Nesse sentido, diante de tamanha diversidade de CW, este trabalho buscou fornecer subsídios à aplicação dessas no tratamento de efluentes avaliando a eficiência, caso a caso, de alguns estudos realizados até o momento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um levantamento da bibliografia pertinente em artigos nacionais e internacionais a fim de fornecer subsídios à aplicação dos *wetlands* no tratamento de efluentes, avaliando a eficiência de cada sistema com base nas variáveis de qualidade da água monitoradas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo geral, foram obtidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Construção do estado da arte sobre o tema “*wetlands* construídos”, em nível internacional e nacional;
- b) Obtenção dos artigos mais relevantes a respeito de cada modalidade estudada de *wetlands* construídos;
- c) Construção de base de dados a respeito de *wetlands* construídos para fins de tratamento do esgoto sanitário, com base nos artigos obtidos dos objetivos anteriores, que abrangessem tal aplicação. A base de dados compreendeu um comparativo, por artigo, das seguintes variáveis: (i) características do local e do tipo de efluente a ser tratado; (ii) direção de fluxo do sistema; (iii) material filtrante; (iv) espécie de planta; (v) área utilizada; (vi) número de indivíduos plantados por metro quadrado; e, (vii) Tempo de Detenção Hidráulico (TDH).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 WETLANDS

Uma das definições mais antigas encontradas a respeito de *wetlands* é proveniente da Convenção sobre Wetlands, em Ramsar, Irã, no ano de 1971. Essa Convenção tem como missão a conservação e uso racional de todos os wetlands através de ações locais, nacionais e cooperação internacional, como uma contribuição para o desenvolvimento sustentável em todo o mundo (Ramsar, 2016).

Esta convenção foi promulgada no Brasil por meio do Decreto nº 1905/1996, traduzindo-se o termo *wetland* como “zona húmida” e conceituando-a da seguinte forma: “as zonas úmidas são áreas de pântano, charco, turfa ou água, natural ou artificial, permanente ou temporária, com água estagnada ou corrente, doce, salobra ou salgada, incluindo áreas de água marítima com menos de seis metros de profundidade na maré baixa.” (Brasil, 1996).

Em 1989, Hammer e Bastian definiram *wetlands* como um ecótono, isto é, um habitat de borda, uma zona de transição entre terra seca e águas profundas, que não é nem terrestre, nem aquática. Porém, para eles, como a terra e a água poderiam estar combinadas de diferentes formas, isso poderia frustrar um esforço em definir *wetlands* estritamente com base no grau de umidade local.

Kadlec e Wallace (2008) verificaram e sintetizaram uma característica comum a todo tipo de *wetlands*: molhamento por tempo suficiente para “excluir espécies de plantas que não crescem em solos saturados” e para que “ocorressem mudanças químicas, físicas e biológicas nas propriedades do solo, próprias do alagamento” (tradução nossa).

Assim, concordando com os autores anteriores, Crites *et al.* (2014) citam que *wetlands*, ou áreas alagadas, compõem uma das três categorias (além da terrestre e da aquática) de sistemas naturais de tratamento de águas residuárias. E definem-nas como “áreas onde o lençol freático está no nível ou acima da superfície do solo, por tempo suficiente a manter, tanto as condições de solo saturado, como o crescimento de vegetação própria desses ambientes”.

Tais autores citam que a capacidade de purificação de águas residuárias desses sistemas já foi verificada em diversas configurações geográficas, incluindo

“sistemas especialmente construídos para tratamento de águas residuárias” (Crites *et al.*, 2014), aos quais se denomina *Wetlands* Construídos (CW, do inglês, *Constructed Wetlands*).

Assim, em termos de CW, uma das primeiras definições foi estabelecida por Hammer e Bastian (1989): “um complexo projetado e artificial de substratos saturados, vegetação emergente e submersa, vida animal e água, que simulam *wetlands* naturais para uso e benefícios do homem”.

3.2 UTILIZAÇÃO E MECANISMOS

Os *wetlands* são capazes de reduzir diversos contaminantes: compostos orgânicos (medidos pela Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO e pela Demanda Química de Oxigênio - DQO), sólidos em suspensão, Nitrogênio (N), Fósforo (P), metais-traço e patógenos. Isso ocorre por mecanismos de tratamento específicos para cada um, mecanismos que podem ser de efeito primário, secundário ou incidental (Vymazal *et al.*, 1998).

Embora existam pesquisadores que citem CW “não vegetadas”, Brix (1987) e Hammer e Bastian (1989) afirmam que o principal mecanismo que rege os CW é o que ocorre na zona de raízes das plantas, pois este as diferencia de outros tratamentos. Na zona de raízes, através da absorção e assimilação, as plantas removem nutrientes para a produção de biomassa, tendo como principal subproduto o oxigênio. Este é transportado para as raízes das plantas, criando uma zona oxidada e uma anóxica, e ao redor, um substrato altamente reduzido (sem oxigênio e sem nitrato) (Brix, 1987; Hammer; Bastian, 1989) .

Os CW podem ser utilizados para diversos tipos de efluentes. Para *wetlands* de fluxo horizontal subsuperficial, Vymazal (2009) cita que, até então, a modalidade vinha sendo utilizada principalmente para tratamento de esgoto doméstico ou municipal e que já abrangia remoção de fármacos, hormônios e detergentes.

Em revisão sobre o tema, o pesquisador sumarizou indústrias que utilizavam tais sistemas, em diversos países: processamento de alimentos, petroquímica, química, celulose e papel, têxtil, curtume, abatedouros, destilaria e vinícolas, pirólise de lenhite, mineração e lavanderias – com destaque para a primeira citada.

Além disso, Vymazal destacou a utilização efetiva no tratamento de efluentes da agropecuária, no escoamento superficial, e até para lixiviados de aterros sanitários (Vymazal, 2009).

Bavor *et al.* (1995) resumiram as principais aplicações e respectivos desafios na utilização dos *wetlands* construídas, os quais foram adaptados e inseridos no Quadro 1. As aplicações vão desde o tratamento de esgoto e industrial, passando por águas cinza, materiais tóxicos, até a utilização da biomassa gerada.

Quadro 1 – Aplicações e desafios no uso de *wetlands* construídas

Aplicação	Desafios
Tratamento Primário e Secundário	Tratamento completo da água, com remoção de nutrientes, para pequenas comunidades e habitações isoladas.
Polimento Terciário	Manutenção da funcionalidade em longo prazo (principalmente remoção de fósforo).
Desinfecção	Determinar a adequação de micro-organismos indicadores de necessidade de monitoramento e regulação. Explorar o potencial das WCs em promover água potável (bactérias degradadoras).
Aumento da assimilação dos nutrientes de entrada	Estabelecimento de diversidade de espécies de plantas apropriada, ou seja, não uma monocultura de <i>Typha</i> .
Manejo do escoamento superficial (Urbano/Rural)	Identificação de estratégias e locais apropriados para introdução.
Manejo de Tóxicos; Lixiviação de Aterros e Mineração; Efluentes Industriais	Conhecer e modelar os processos pelos quais metais e orgânicos podem ser imobilizados ou transformados.
Manejo do Lodo	Disposição em longo prazo de resíduos que possam conter níveis consideráveis de metais pesados e materiais tóxicos.
Prod. Biomassa	Identificação e desenvolvimento de usos e mercados viáveis de produtos de WCs.
Recarga de Aquíferos	Entendimento de impactos na hidrologia subterrânea (ex.: solos ácidos)
Pré-tratamento e armazenamento de água para reuso	Avaliar níveis de tratamento apropriados para diferentes opções de reuso e economias locais.

Fonte: Adaptado de Bavor *et al.* (1995).

3.3 TIPOS DE WETLANDS CONSTRUÍDOS

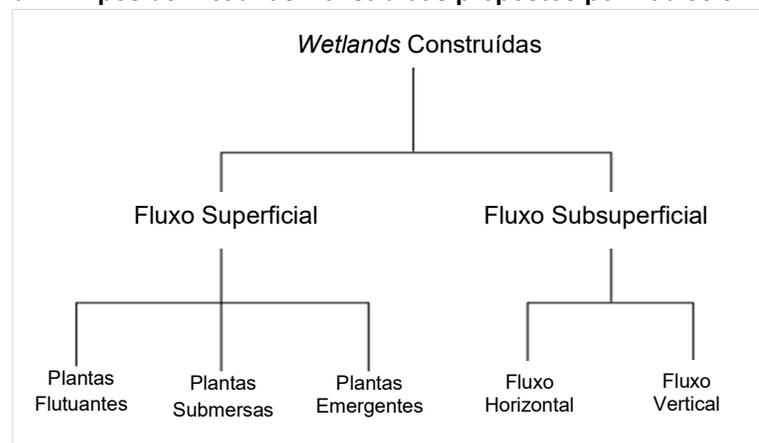
A classificação de *wetlands* possui uma grande diversidade, tendo em vista o número de variáveis envolvidas. A seguir foram citadas algumas das utilizadas e por fim a que foi utilizada como base para este trabalho.

Brix (1993) denominou *wetlands* construídos como “sistemas de tratamento de águas residuárias baseado em macrófitas”. Sendo assim, baseou-se na “forma

de vida das macrófitas dominantes” – de flutuação livre, enraizadas emergentes, submersas e sistemas multi-estágio – combinadas aos “tipos” e “direção de fluxo”.

Mais tarde, Kadlec e Wallace (2008) propuseram um esquema simplificado, que combinava os tipos (superficial e subsuperficial) e direção (horizontal e vertical) de fluxo, aos tipos de plantas utilizadas (flutuantes, submersas e emergentes), conforme a Figura 1. Os autores também citam o tipo híbrido, embora não esteja explicitado no esquema contido na Figura 1.

Figura 1 – Tipos de *Wetlands* Construídas propostos por Kadlec e Wallace



Fonte: Kadlec e Wallace (2008).

No esquema mostrado na Figura 1, não são citados os tipos de macrófitas utilizadas para fluxo subsuperficial. Entretanto, segundo Vymazal (2007), na maioria dos CW, são plantadas macrófitas emergentes, sendo os componentes “meio suporte” e “fluxo” os que mais variam no projeto do sistema. Ainda a respeito das CW de fluxo subsuperficial, Vymazal afirmou que, na época, estas eram mais comuns em relação às CW de fluxo superficial, que foram muito utilizadas anteriormente, no início dos estudos, na Europa.

Segundo Vymazal (2010), CW poderiam ser classificadas por diversos critérios, que, combinados entre si, gerariam vários tipos de CW. Em concordância com as classificações anteriores, o autor citou três principais critérios: a hidrologia (fluxo livre ou subsuperficial); o tipo de crescimento das macrófitas aquáticas (emergente, submergente e flutuante) e a direção de fluxo (vertical ou horizontal). Além disso, o autor cita que diferentes tipos de CW também podem ser combinados

entre si, originando CW híbridos, a fim de se utilizar as vantagens específicas que surgem de tais combinações.

O tipo “híbrido” pode ser exemplificado no caso da remoção de nitrogênio estudada por Vymazal (2007). Os processos responsáveis pela remoção diferem, em magnitude, em cada tipo de CW isolado. Os CW de estágio único não conseguem alcançar altas remoções de N-total devido à sua inabilidade para prover condições aeróbias e anaeróbias ao mesmo tempo. Enquanto os CW de fluxo vertical removem com sucesso o N-amoniaco, a desnitrificação torna-se muito limitada. Já as de fluxo horizontal provêm boas condições para desnitrificação, mas ocorre o contrário com a nitrificação. Daí a necessidade do tipo “híbrido”.

Mais recentemente, com o avanço da técnica de CW, Fonder e Headley (2013) propuseram uma classificação “quanto às múltiplas variantes de projeto”, cujo esquema resumido foi adaptado e traduzido por Sezerino; Machado *et al.*(2014), e consta na Figura 2, a qual está explicada adiante.

Essa classificação abrange a grande maioria dos tipos de *wetlands* estudadas e aplicadas até o momento e permite uma visualização mais geral das possibilidades de construção dessas. Assim como nas anteriores, a base está no regime hidráulico combinado aos tipos de macrófitas. Entretanto, o diferencial está nas subclasses de cada um (Fonder e Headley, 2013).

Dentre os critérios de classificação de Fonder e Headley (2013), as subclasses em relação ao regime hidráulico compreendem: (i) o tipo de escoamento (superficial ou subsuperficial); (ii) o sentido do escoamento (horizontal ou vertical – sendo este ascendente, descendente ou ambos); (iii) a saturação do meio suporte (constante – continuamente saturado; drenagem livre – saída permanentemente aberta na parte inferior; intermitente – saturação varia periodicamente ou sazonalmente devido a recarga em batelada ou estratégia operacional); e (iv) formas de alimentação do afluente (abaixo da superfície; na superfície; na base de fundo). Já as subclasses quanto ao tipo de macrófitas compreendem: (i) pedunculadas com folhas livres (emergentes; submersas ou folhas flutuantes); (ii) flutuantes (flutuantes livres ou emergentes); e (iii) emergentes.

As quatro modalidades de fluxo subsuperficial são:

- a) horizontal – dominados por fonte de alimentação abaixo da superfície;
- b) vertical descendente – com saturação do meio suporte tipo drenagem livre e alimentação abaixo da superfície (sem alagamento superficial);
- c) vertical ascendente – com uma superfície inundada de saída; e
- d) vertical com ciclos de enchimento e drenagem – com a direção do fluxo misturada com frequência, periodicamente alternando o fluxo para cima e para baixo.

A classificação de Fonder e Headley (2013) é bastante completa, entretanto, nos resultados deste trabalho, foram utilizadas as classificações simplificadas, baseadas em Vymazal (2007), conforme as descrições a seguir:

- a) *Wetlands* Construídas de Fluxo Superficial Livre (CWFSL):
 - com macrófitas flutuantes: macrófitas de flutuação livre crescendo sobre a superfície da água, como na Figura 3;

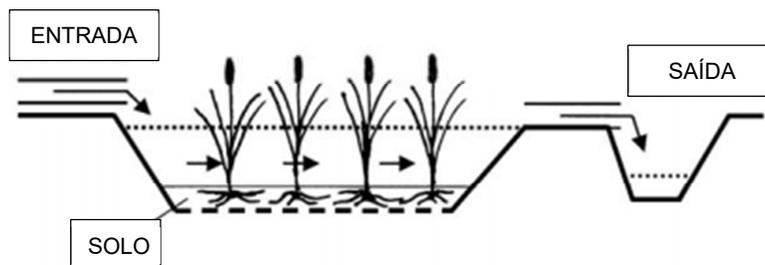
Figura 3 – *Wetlands* construídas de fluxo superficial livre (CWFSL) com macrófitas flutuantes



Fonte: Adaptado de Vymazal (2007).

- com macrófitas emergentes: com macrófitas enraizadas abaixo da superfície da água, mas o restante da planta emergindo da superfície, como mostrado na Figura 4;

Figura 4 – Wetlands construídas de fluxo superficial livre (CWFSL) com macrófitas emergentes



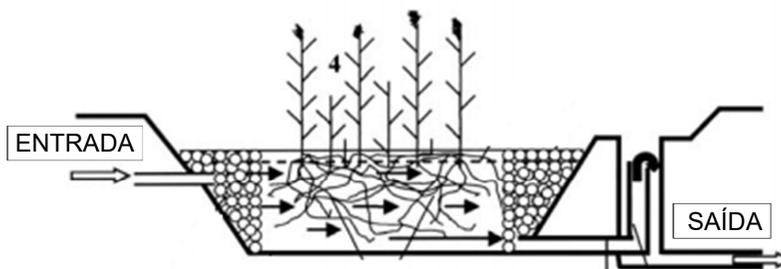
Fonte: Adaptado de Vymazal (2007).

- Com macrófitas submersas: com macrófitas enraizadas abaixo da superfície da água e totalmente submersas;
- Com macrófitas de folhas flutuantes: com macrófitas enraizadas abaixo da superfície da água e folhas flutuantes;

b) *Wetlands* Construídas de Fluxo Subsuperficial (CWFS):

- *Wetlands* Construídas de Fluxo Subsuperficial Horizontal (CWFSH): fluxo na direção horizontal, abaixo da superfície da água, no meio suporte, com macrófitas emergentes, como mostrado na Figura 5.

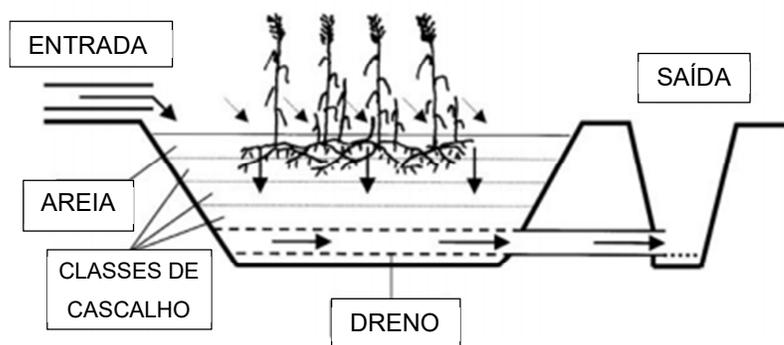
Figura 5 – Wetlands construídas de fluxo subsuperficial horizontal (CWFSH) (com macrófitas emergentes)



Fonte: Adaptado de Vymazal (2007).

- c) *Wetlands* construídas de fluxo subsuperficial vertical (CWFSSV): fluxo subsuperficial na direção vertical (ascendente ou descendente), abaixo da superfície da água, no meio suporte, com macrófitas emergentes, como mostrado na Figura 6 (no exemplo, o fluxo é descendente).

Figura 6 – *Wetlands* construídas de fluxo subsuperficial vertical (CWFSSV) (com macrófitas emergentes)

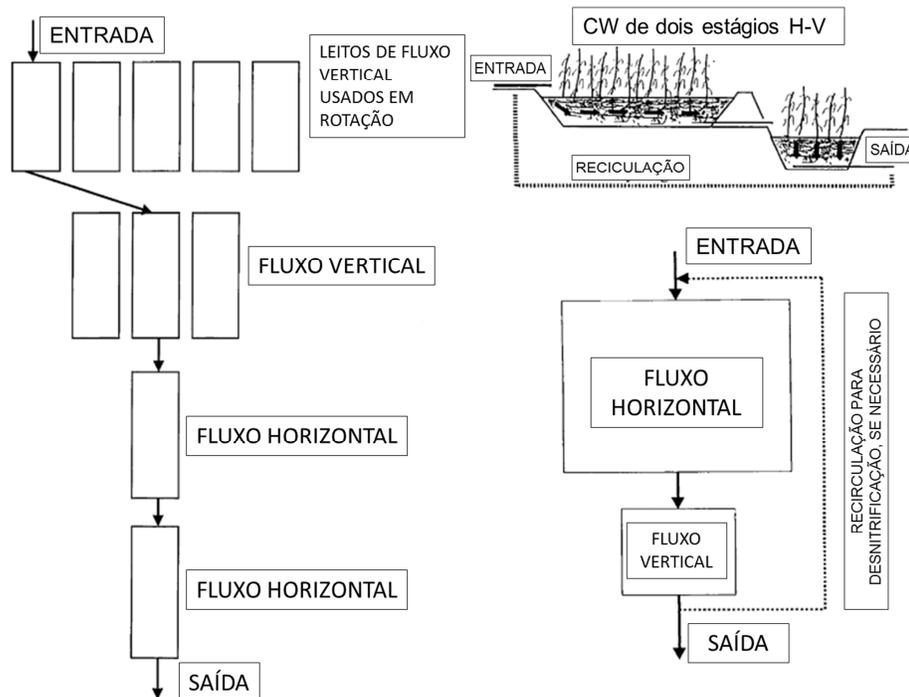


Fonte: Adaptado de Vymazal (2007)

- d) Híbrida: *wetlands* de fluxo subsuperficial na direção horizontal e vertical combinadas entre si. Segundo Vymazal (2005b), vários tipos de *wetlands* podem ser combinados entre si, no entanto, compreendem mais frequentemente sistemas verticais e horizontais dispostos em estágios, como exemplificado na Figura 7.

Além disso, pontua-se também que alguns autores consideram como *wetlands*, em alguns experimentos, o tipo denominado “não plantada”, como citado por Huett *et al.* (2005), Kadlec *et al.* (2005) e Babatunde e Zhao (2009), porém esse tipo não será inserido na classificação utilizada neste trabalho.

Figura 7– Exemplos de *wetlands* construídas de fluxo subsuperficial híbridas.



Fonte: Adaptado de Vymazal (2005b)

3.4 PARÂMETROS DE PROJETO

Segundo Rousseau (2008), os CW possuem elevada capacidade tampão, sendo a qualidade do efluente bastante estável, normalmente. Porém, certos parâmetros precisam ser controlados para evitar efeitos adversos provenientes de baixas temperaturas (como a inibição da remoção de nitrogênio), de picos de fluxo (lavagem dos sólidos) e de entupimento do sistema. Isso porque a remoção varia muito em termos percentuais e depende principalmente da temperatura, tempo de detenção hidráulico (TDH) e a carga aplicada.

Hammer e Bastian (1989) citam cinco principais componentes dos *wetlands* (naturais ou construídas): (i) substratos com várias taxas de condutividade hidráulica; (ii) plantas adaptadas a substratos anaeróbios saturados de água; (iii) fluxo de água dentro ou sobre a superfície do substrato; (iv) invertebrados e vertebrados; e (v) população microbiana aeróbia e anaeróbia.

Especificamente para *wetlands* construídos, em termos de parâmetros operacionais, devem ser avaliados alguns parâmetros de projeto. Vymazal (2002)

lista os seguintes: (i) o padrão de escoamento; (ii) o tipo de água residuária; (iii) pré-tratamento mecânico eficiente; e (iv) características dos leitos vegetados (área de superfície, configuração do leito, razão comprimento/largura, profundidade e inclinação de fundo, meio suporte, vedação do leito e vegetação). Paralelamente, Sezerino *et al.* (2015) sintetiza como principais: (i) a área superficial empregada, (ii) o meio suporte, (iii) as macrófitas utilizadas, (iv) o tempo de detenção hidráulico (TDH) e (v) o período de avaliação do desempenho de tratamento.

A seguir serão abordados os parâmetros considerados essenciais nesse trabalho para projetos e dimensionamentos de *wetlands*.

3.4.1 Características físicas locais

A caracterização do local fornece a base para a escolha do método de tratamento de águas residuárias a ser empregado. Esta caracterização, para gerar bons resultados, deve ser em termos de: tipo de solo, vegetação, clima, relevo, hidrografia (rios e águas subterrâneas) e área disponível.

Von Sperling e Chernicharo (2005) citam, dentre os estudos preliminares, a importância da caracterização física na escolha do local a ser implantado o tratamento. Os autores citam que devem ser analisados: o tamanho do local disponível, a geologia, a topografia, o nível de água subterrânea, o nível de alagamento, acessibilidade, casas na vizinhança, impacto ambiental, econômico, entre outros. Nesse sentido, a caracterização de cada um dos componentes do meio ambiente onde será inserido o local de tratamento torna-se fundamental.

A respeito do clima, a influência sazonal sobre o desempenho de CW pode ser particularmente importante em climas frios, em que temperaturas próximas ou abaixo de zero e a dormência das plantas podem afetar os processos importante. O clima influencia inclusive a escolha dos tipos de macrófitas. Nas regiões tropicais, a ausência de estações climáticas bem definidas gera nascimento e morte constante de indivíduos, portanto, uma dinâmica de constante retirada e liberação de nutrientes. Já nas de clima temperado, na primavera surgem novos indivíduos a partir dos rizomas, com um intenso metabolismo, tendo neste período, suas necessidades nutricionais garantidas por meio de reservas estocadas nos rizomas (Faulwetter *et al.*, 2009).

Não somente a temperatura, mas também outras condições ambientais interferem nos mecanismos que ocorrem nos CW, como citado no caso da desnitrificação estudado por Wang *et al.* (2009): a umidade do solo, a concentração de $N-NO_3^-$ e a temperatura interferiram como limites para a desnitrificação em dois solos de pastagem em um clima temperado marítimo.

3.4.2 Caracterização do Efluente

A definição do tipo de efluente a ser tratado (por exemplo, alguns tipos são citados no Quadro 2, adaptado de revisão feita por Vymazal (2010) para CW FSL), seguida por uma caracterização físico-química que mostre os principais parâmetros de qualidade do efluente permite então que seja possível o estabelecimento de metas de tratamento.

Quadro 2 – Exemplos de vários tipos de águas residuais em CWFSL.

Tipo de águas residuais	Localização	Referência
Resíduos Animais	EUA	DuBow; Reaves (1994); Knight <i>et al.</i> (2000); Knight <i>et al.</i> (2000b)
Escoamento do pasto de vacas leiteiras	Nova Zelândia	Tanner <i>et al.</i> (2005)
Drenagem agrícola	EUA	Higgins <i>et al.</i> (1993)
Escoamento de águas pluviais (residenciais)	Austrália	Bavor <i>et al.</i> (2001)
Escoamento de águas pluviais (estrada)	Reino Unido	Pontier <i>et al.</i> (2004)
Escoamento de águas pluviais (aeroportos)	Suécia	Thorén <i>et al.</i> (2003)
Drenagem ácida de minas de carvão	EUA, Espanha	Karathanasis; Johnson (2003); Masferrer (2002)
Drenagem de minas de minérios metálicos	Alemanha, Irlanda, Canadá	Kiessig;Küchler;Kalin (2003); O'Sullivan;Moran;Otte(2004); Sobolewski (1996)
Águas de processos de refinarias	EUA, Hungria	Litchfield; Schatz (1989);Lakatos (1998)
Efluentes de papel e celulose	EUA	Tettleton;Howell; Reaves (1993)
Carcinicultura (cultivo de crustáceos)	EUA	Tilley (2002)
Chorume	Suécia, Noruega, EUA	Benyamine; Bäckström; Sandén (2004); Mæhlum (1994);Johnson; Martin; Moshiri (1999)
Fábrica de Açúcar	Kenya	Tonderski; Grönlund; Billgren, (2005)
Fábrica de Azeite de Oliva	Grécia	Kapellakis; Tsagarakis; Angelakis (2004)
Lixiviados de resíduos da madeira	Canadá	Masbough <i>et al.</i> (2005)
Indústria Metalúrgica	Argentina	Maine <i>et al.</i> (2006); Maine <i>et al.</i> (2007)

Fonte: Adaptado de Vymazal (2010)

Em revisão, Vymazal (2010) mostrou a eficiência de remoção de compostos orgânicos (DBO_5), sólidos em suspensão totais (SST), Fósforo Total (PT), Nitrogênio Total (NT), Amônio ($N-NH_4$) em alguns CWFSL, CWFSSH e CWFSSV. Os Quadros 3 e 4 são uma adaptação de Vymazal (2010).

Quadro 3 – Eficiência do tratamento de vários tipos de CW para DBO₅ e SST

Tipo de CW	Referência do autor	DBO ₅					SST				
		ENT	SAÍDA	EFIC	TAH	N	ENT	SAÍDA	EFI	TAH	N
CWFSL	1	161	42	74	4.1	50	185	43	77	4.8	52
	2	34.6	9.8	72	3.3	51	57.8	18.3	68	3.1	52
CWFSSH	1	170	42	75	11.8	438	141	35	75	15.4	367
CWFSSV	1	274	28	90	8.2	125	163	18	89	9.7	98

Concentração (mg/L) de entrada (ENT) e saída (SAÍDA). Eficiência (EFIC, em %). Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH, em cm/d). Número de CW (N, em unidades).

Referências do autor: (1) Vymazal e Kröpfelová (2008)¹ e (2) Bulc (2006)².

Fonte: Adaptado de Vymazal (2010).

Quadro 4 – Eficiência do tratamento de vários tipos de CW para Nitrogênio e Fósforo

Tipo de CW	Referência do autor	PT					NT					N-NH ₄				
		ENT	SAÍDA	EFIC	TAH	N	ENT	SAÍDA	EFIC	TAH	N	ENT	SAÍDA	EFIC	TAH	N
CWFSL	1	14.7	9.7	34	5.4	52	42.6	23.5	45	4.9	29	30	16	48	5.4	40
	3	4.0	1.8	49		207	11.7	6.2	47		192					
	4	7.9	5.1	35	12.3	282	84	49.5	41	8.9	116	75	46	39	7.3	118
	2	3.6	1.8	50	3.5	52	10.9	4.6	58	3.2	36	5.8	2.7	53	3.1	59

Concentração (mg/L) de entrada (ENT) e saída (SAÍDA). Eficiência (EFIC, em %). Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH, em cm/d). Número de CW (N, em unidades).

Referências do autor: (1) Vymazal e Kröpfelová (2008)¹ e (2) Bulc (2006)², (3) USEPA (2000), (4) Kadlec e Wallace (2008).

Fonte: Adaptado de Vymazal (2010).

3.4.3 Tipo de Fluxo

Esse item foi exemplificado anteriormente, tendo em vista que abrange a classificação de CW. Mas aqui é importante observar que, na escolha do *wetland*, deve-se optar pela configuração hidráulica mais adequada.

¹ Vymazal, J.; Kröpfelová, L. *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2008.

² Bulc, T.G. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecol. Eng.* 2006, 26, 365-374.

O fluxo de água residuária pode ser sobre ou abaixo da superfície do substrato (superficial/subsuperficial), e a direção de fluxo do sistema pode ser vertical ou horizontal (Vymazal, 2010).

Ainda deve-se notar que a configuração hidráulica inclui também outros aspectos, além do tipo e direção de escoamento, como os citados por Fonder e Headley (2013): o sentido do escoamento (ascendente ou descendente), a saturação do meio suporte (ou material filtrante), que pode ser constante, intermitente ou drenagem livre, e a forma de alimentação, que pode ser na superfície, abaixo dela ou na base de fundo.

3.4.4 Macrófitas Aquáticas

As macrófitas correspondem às plantas adaptadas a substratos anaeróbios saturados de água (Hammer e Bastian, 1989). Vymazal (2011) fez ampla revisão sobre o tema, enfocando nos *wetlands* de fluxo subsuperficial horizontal. O pesquisador cita que as plantas seriam a característica mais notável, que diferencia este dos outros tipos de filtros ou tratamentos.

Brasil *et al.* (2007), com base em Reed (1993) e USEPA (2000), cita que as macrófitas emergentes são as mais adequadas nos CW, tendo em vista que a lâmina de água nesses sistemas deve permanecer sempre abaixo da superfície do meio suporte. Tais autores citam como espécies mais utilizadas a taboa (*Typha sp.*), o *Phragmites sp.* e a navalha de mico (*Scirpus sp.*).

Na escolha da macrófita, deve-se atentar ao comprimento de suas raízes. Para os sistemas de fluxo subsuperficial, Crites *et al.* (2014) citam que as raízes são a principal fonte de oxigênio e, sendo assim, é essencial que a profundidade da raiz da macrófita cultivada perpassa o leito por inteiro, a fim de se obter suficiente remoção de nitrogênio do sistema. Os autores afirmam que leitos contendo *Typha* (penetração da raiz de 40% da profundidade do leito) alcançam apenas 32% de remoção da amônia, comparados aos leitos de *Scirpus*, que alcançam 94% de remoção e cujas raízes penetram a profundidade do leito por completo.

Já as macrófitas flutuantes, segundo Salati Filho *et al.* (2009) são geralmente utilizadas em canais relativamente rasos, que podem conter uma ou mais espécies. A mais estudada é o aguapé (*Eichornia crassipes*), devido à sua robustez e grande

capacidade de crescimento vegetativo. Outras flutuantes como *Lemna*, *Spirodella* e *Wolffia sp.*, também têm sido investigadas, embora não com tanta frequência.

Por fim, as macrófitas submersas, como o próprio nome descreve, ficam totalmente submersas. Quando são expostas ao sol, geralmente seus tecidos fotossinteticamente ativos são destruídos. Como só se desenvolvem em águas bem oxigenadas, não têm sido recomendadas para tratamento de esgoto urbano, sendo seu principal uso o polimento de águas de esgoto após tratamento secundário. As espécies mais produtivas crescem, especialmente ou quase que exclusivamente, em águas oligotróficas. As espécies mais encontradas são a *Isoetes Lacustris*, *Lobelia Dortmanna* e a *Egéria sp.* (Salati *et al.*, 2009).

3.4.5 Número de indivíduos plantados por metro quadrado

Além da espécie plantada, é importante avaliar o número de indivíduos plantados por m². Assim, pode-se ter um comparativo quantitativo entre as macrófitas empregadas, verificando-se qual a quantia para cada tipo de CW.

Como exemplo, pode-se verificar o trabalho de Pelissari *et al.* (2012). Esses pesquisadores avaliaram a utilização de dois CW em paralelo (um horizontal e um vertical) no pós-tratamento do efluente de uma instalação de bovinocultura de leite no Rio Grande do Sul. Os CW foram preenchidos com areia e brita e plantados com *Typha domingensis Pers.* Inicialmente o número de indivíduos plantados por metro quadrado foi o mesmo, 1,5 plantas/m², sendo 35 no horizontal e 20 no vertical. Entretanto, as macrófitas só tiveram bom desenvolvimento no CWFSSH. No CWFSSV isso não ocorreu, devido à baixa saturação de efluente no meio filtrante, sendo realizado novo plantio, de 15 mudas nesse filtro.

Cano *et al.* (2012) avaliaram três CW em paralelo em escala piloto real no pós tratamento de efluente proveniente de um Reator UASB (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente). Havia duas CWFSSV Descendente e uma unidade de CWFSSH. Nas três unidades foram plantadas macrófitas aquáticas da espécie *Typha domingensis*, à densidade de 9 plantas/m². Após dois meses do plantio, observou-se intenso crescimento e surgimento de novos propágulos no CWFSSH, alcançando a densidade de 33 plantas/m², um aumento de cerca de 366%. Assim como em Pelissari *et al.* (2012), os valores de densidade de plantas nas CW verticais obtiveram menos plantas em relação aos horizontais, com o tempo. No primeiro CW

vertical, a densidade passou a 16 plantas/m², um aumento de cerca de 200% e no segundo, 17 plantas/m², aumento de densidade de 212,5%.

3.4.6 Meio suporte

Meio suporte, substrato ou meio filtrante são termos utilizados para o mesmo componente dos wetlands construídos. Segundo Silva (2007) o meio suporte tem as seguintes funções: filtração da água residuária e suporte para o crescimento das macrófitas.

Há diversos tipos de substratos, havendo também diferentes taxas de condutividade hidráulica para cada um deles. Segundo Westholm (2006), a funcionalidade e/ou eficiência dos *wetlands* depende, dentre outros fatores, do material do qual o leito é constituído.

Sendo assim, Ucker *et al.* (2014), citam que a brita e a areia lavada são os substratos mais comumente utilizados na Europa e Estados Unidos, pois permitem um fluxo regular e diminuem a frequência de limpeza dos CW. Os autores afirmam ainda que, no início dos estudos utilizava-se o solo local como meio suporte, porém, tal prática implicava num escoamento superficial, tendo em vista a baixa condutividade hidráulica do mesmo. Além desses, há também a utilização de materiais alternativos como pneus picados (Collaço e Roston, 2006) e conchas (Rocha, 2012).

3.4.7 Tempo de Detenção Hidráulico (TDH)

Segundo Sezerino *et al.* (2015), o TDH em *wetlands* construídas, na maioria dos estudos brasileiros, é teórico, obtido pela relação entre volume da unidade, vazão afluente e porosidade do material filtrante. Os pesquisadores, em revisão sobre o tema, encontraram TDH máximos de 12 dias, não encontrando tempo de detenção hidráulico mínimo requerido ou utilizado como parâmetro de projeto.

No quadro abaixo mostra-se alguns valores de TDH encontrados, bem como os autores e o tipo de CW a que se referem.

Quadro 5 – Tempos de Detenção Hidráulica encontrados para diferentes CW

Autor	Tipo de CW	TDH (dias)
Sezerino <i>et al.</i> (2015)	CWFSSH	12 (máx.)
Crites <i>et al.</i> (2014)	CWFSL	7-12
	CWFSSH	3-14
	CWFSSV	1-2

Fonte: Sezerino *et al.* (2015); Crites *et al.* (2014)

4 METODOLOGIA

Para se atender aos objetivos propostos foram realizadas várias revisões da literatura, explorando artigos nacionais e internacionais a fim de se confeccionar um quadro de classificação dos *wetlands* construídos estudados por meio das variáveis citadas, cuja finalidade será a tomada de decisão de sua utilização ou não.

Nas pesquisas, buscou-se obter uma ordem lógica e nas bases mais adequadas, a fim de se evitar uma revisão que não traduza resultados o mais próximo o possível do real estado da arte sobre o tema. Triviños³ (1987), *apud* Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012), denomina como indisciplina o fato de um pesquisador usar um método de pesquisa que não seja coerente com o objeto de estudo, tendendo a misturar autores, citações, metodologias de correntes de pensamento desalinhados, não atentando para as bases do conhecimento científico e o problema a que se propõe resolver.

Para Lacerda, Ensslin e Ensslin (2012), o conceito análise bibliométrica tem como base a avaliação quantitativa de determinados parâmetros de um conjunto definido de artigos, denominado portfólio bibliográfico. Como parâmetros observáveis, destacam-se os artigos selecionados, suas referências, autores, número de citações e periódicos mais relevantes. Como resultado da análise bibliométrica, tem-se a gestão da informação e do conhecimento científico sobre um dado assunto.

Assim, a metodologia utilizada foi de geração de um banco de dados. Foram pesquisados tópicos específicos e os resultados foram contextualizados em termos da qualidade do periódico, autores e país, dentre outras informações que o caracterizassem a publicação o quanto mais detalhado fosse possível.

³TRIVIÑOS, A. N. Três enfoques na pesquisa em ciências sociais: o positivismo, a fenomenologia e o marxismo. _____. **Introdução à pesquisa em ciências sociais. São Paulo: Atlas**, p. 30-79, 1987.

4.1 HISTÓRICO DAS BUSCAS

A *Web of Science* - Coleção Principal (*Thomson Reuters Scientific*) é uma base multidisciplinar que indexa somente os periódicos mais citados em suas respectivas áreas.

O site fornece índice de citações, informando, para cada artigo, os documentos por ele citados e os documentos que o citaram (CAPES, 2016). A pesquisa pode ser feita, não somente na coleção principal, mas também incluindo as seguintes coleções: “KCI - Base de dados de periódicos coreanos (1980-presente)”, “*Russian Science Citation Index* (2005-presente)” e “*SciELO Citation Index* (1997-presente)” (*Web of Science*, 2016).

A pesquisa neste trabalho ocorreu da seguinte forma:

- a) Busca pelo tópico “*wetlands*” em todas as bases de dados incluídas no *Web of Science*. Explicação a respeito dos resultados dessa pesquisa no item 5.1.
- b) Busca pelo tópico “*constructed wetlands*”, em todas as bases de dados, refinado pelo domínio de pesquisa “*science technology*” e pelas seguintes áreas de pesquisa: “*environmental sciences ecology*” ou “*engineering*” ou “*water resources*” ou “*agriculture*” ou “*biotechnology applied microbiology*” ou “*chemistry*” ou “*plant sciences*” ou “*science technology other topics*” ou “*microbiology or public environmental occupational health*”. Explicação a respeito dos resultados dessa pesquisa com os 10 artigos mais relevantes, no item 5.1.
- c) Busca pelo tópico “*constructed wetlands*” na Coleção Principal (*Thomson Reuters Scientific*) da *Web of Science*, gerando uma análise dos resultados direcionada, como é disponibilizado nesse modo de pesquisa, e a qual também foi explicada no item 5.1.
- d) Verificação dos resultados do item “c” originários somente do Brasil. Explicação a respeito dos resultados dessa pesquisa com os 10 artigos mais relevantes, no item 5.1.
- e) Refino à busca do item “c”): Tópico: (“*constructed wetlands*”) AND Tópico: (“*free water surface*”); Tempo estipulado: Últimos 5 anos, de

Principal Coleção do *Web of Science*. Explicação a respeito dos resultados dessa pesquisa, no item 5.2.

- f) Refino à busca do item “c)” Tópico: ("*constructed wetlands*") AND Tópico: (*horizontal*) NOT Tópico: (*hybrid*) e, em segunda pesquisa, Refinado por: [excluindo] Tipos de documento: (*REVIEW*). Tempo estipulado: Últimos 5 anos, de Principal Coleção do *Web of Science*. Explicação a respeito dos resultados dessa pesquisa, no item 5.3.
- g) Refino à busca do item “c)” Tópico: ("*constructed wetlands*") AND Tópico: (*vertical*) NOT Tópico: (*hybrid*) e, em segunda pesquisa, Refinado por: [excluindo] Tipos de documento: (*REVIEW*); Tempo estipulado: Últimos 5 anos, de Principal Coleção do *Web of Science*. Explicação a respeito dos resultados dessa pesquisa, no item 5.4.
- h) Refino à busca do item “c)” Tópico: ("*constructed wetlands*") AND Tópico: ("*hybrid constructed wetland*") e, em segunda pesquisa, Refinado por: [excluindo] Tipos de documento: (*REVIEW*); Tempo estipulado: Últimos 5 anos, de Principal Coleção do *Web of Science*". Explicação a respeito dos resultados dessa pesquisa, no item 5.5.
- i) Por fim, foram restritos os dados somente aos tratamentos referentes a esgoto doméstico.

4.2 CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

A construção do banco de dados foi realizada com base nos artigos mais relevantes de cada uma das buscas, a partir dos refinamentos com o termo "*constructed wetlands*". Como não seria possível adicionar todos os artigos encontrados, adicionou-se à base de dados:

- a) Os artigos entre os dez mais relevantes para o termo geral "*constructed wetlands*", na Coleção Principal do *Web of Science*, que tivessem o texto disponível na íntegra e que não fossem de revisão bibliográfica;

- b) Os artigos entre os dez mais relevantes para o termo geral “constructed wetlands”, de origem brasileira, na Coleção Principal do *Web of Science*, que tivessem o texto disponível na íntegra e que não fossem de revisão bibliográfica;
- c) O artigo mais relevante após cada um dos refinamentos nas buscas citadas no item 4.1, que tivesse o texto disponível na íntegra e que não fosse de revisão bibliográfica.

4.3 COMPARATIVOS REALIZADOS

Para a comparação dos artigos estudados, extraíram-se as seguintes informações referentes a cada tema, como se segue:

- a) artigo: autor, duração do experimento (em meses) e clima (buscando-se o clima principal da localidade estudada conforme a classificação climática de Köppen-Geiger (Kottec *et al.*, 2006));
- b) sistema: tipo de tratamento (se primário e secundário ou em escala piloto), tipo de fluxo (se superficial ou subsuperficial, sendo este vertical ou horizontal), número de células (ou leitos – quantos compõem o sistema de tratamento para o efluente específico), área superfície do leito (m^2), profundidade média (m) (tendo em vista que alguns possuem profundidade variável ao longo da dimensão horizontal, e volume (m^3);
- c) efluente: concentração de esgoto municipal (em $g\ m^{-2}\ d^{-1}$), taxa ou vazão (em $m^3\ dia^{-1}$), tempo de detecção hidráulica medido (TDH, em d);
- d) meio suporte: tipo e granulometria;
- e) planta: definição da espécie (qualitativa) e razão indivíduo plantado por metro quadrado ($ind\ m^{-2}$) (quantitativa);
- f) eficiência de remoção média: percentual calculado com base nos compostos de entrada e saída do sistema (em %).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTADO DA ARTE

A respeito do tópico “*wetlands*” foram encontrados aproximadamente 29 mil resultados, englobando-se *wetlands* naturais e artificiais e para diversos fins, demonstrando desde aí a importância e grande variedade de utilizações para este termo.

Já em relação ao termo “*constructed wetlands*”, em todas as bases da *Web of Science*, foram obtidos aproximadamente 4500 publicações, sendo as primeiras de 1989 e havendo um significativo aumento a partir de 2009. Os 10 primeiros resultados mais relevantes, segundo a classificação da *Web of Science*, estão listados no Quadro 6, o qual mostra uma parte significativa do estado da arte sobre o tema, contendo a citação de artigos cujos comentários estão a seguir.

Quadro 6 – Primeiros dez artigos mais relevantes a respeito de CW a nível internacional.

Autor	Ano	Artigo
Vymazal, J.	2014	<i>Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review</i>
Langergraber, G. e Haberl, R.	2001	<i>Constructed wetlands for water treatment</i>
Vymazal, J.	2013	<i>The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development</i>
Kross, C. S. e Richter, S. C.	2016	<i>Species Interactions in Constructed Wetlands Result in Population Sinks for Wood Frogs (<i>Lithobates sylvaticus</i>) while Benefitting Eastern Newts (<i>Notophthalmus viridescens</i>)</i>
Hsu, C. B. <i>et al.</i>	2011	<i>Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment</i>
Paweska, K. e Malczewska, B.	2009	<i>Nitrogen compounds in drain sewage after constructed wetlands</i>
Tietz, A. <i>et al.</i>	2008	<i>Bacterial carbon utilization in vertical subsurface flow constructed wetlands</i>
Langergraber, G.	2003	<i>Simulation of subsurface flow constructed wetlands - results and further research needs</i>
Park, J.H. <i>et al.</i>	2011	<i>Treatment Efficiencies and Decomposition Velocities of Pollutants in Constructed Wetlands for Treating Hydroponic Wastewater</i>
Bao, ZB <i>et al.</i>	2012	<i>Constructed Wetlands Sewage Treatment Technology Purification Mechanism and Influence Factors</i>

Fonte: Adaptado de *Web of Science* (2016).

Vymazal (2014), através dessa revisão, tratou dos diversos usos atuais desse sistema de tratamento para águas residuárias industriais (petroquímica, matadouro, processamento de carne, laticínios e indústrias de papel e celulose), ainda citando usos já anteriormente comuns (indústrias têxteis, de vinho ou de aquicultura de peixe e camarão), detalhando, para cada tipo de indústria, os tipos de *wetlands*

encontrados em amplas revisões. O autor conclui que para esses tipos de efluentes têm sido mais comumente usadas as CWFSL com vegetação emergente ou as CWFSSH. O uso de fluxo subsuperficial vertical tem sido menos comum para águas residuárias industriais, exceto para fábricas de azeite e em CW híbridas. Os resultados indicaram que diversos tipos de águas residuárias, como de destilaria e de lavanderia, têm sido tratadas somente com CW de fluxo horizontal.

Os dois principais tipos de CW (de fluxo superficial e subsuperficial), os mecanismos de remoção de constituintes principais (matéria orgânica, nitrogênio e fósforo) e de outros poluentes (como compostos orgânicos específicos, e patógenos), bem como o papel das plantas no processo de tratamento são descritos por Langergraber e Haberl (2001). Os autores também mostraram uma ferramenta de simulação e um exemplo em escala piloto para os CW de fluxo subsuperficial que modela os processos de transformação e eliminação dos principais constituintes de águas residuais (matéria orgânica, nitrogênio e fósforo).

Em outra revisão, Vymazal (2013), relatou um histórico da utilização de sistemas híbridos de CW. O pesquisador estudou 60 casos de sistemas híbridos em 24 países, a partir de 2003, citando que são mais comuns na Europa e na Ásia, sendo ainda muito limitados em outros continentes. Assim, concluiu que o sistema híbrido mais comum corresponde ao vertical-horizontal, para esgoto municipal e para águas residuárias industriais, enquanto que o horizontal-vertical somente para esgoto municipal.

Kross e Richter (2016), analisam o efeito de CW específicas para a mitigação da perda desse tipo de habitat natural, em áreas de conservação. Apesar de o artigo estar entre os citados, não foi abordado por não entrar na análise foco desse trabalho.

Hsu *et al.* (2011) analisaram a biodiversidade dois sistemas integrados de CWFSL em Taiwan (clima subtropical), através dos seguintes parâmetros: qualidade da água, características do habitat, comunidades bióticas de algas, macrófitas, pássaros, peixes e macroinvertebrados aquáticos nessas células de tratamento. Seus resultados indicaram que os dois CW integrados obtiveram boa redução de Nitrogênio e Fósforo totais, DBO e DQO. Entre outros resultados, esse trabalho sugeriu que, o projeto e manutenção adequados, além de melhorar a qualidade da água melhoram a biodiversidade dos CW.

Dois sistemas de compostos por fossa séptica e CW de fluxo subsuperficial foram analisados por Paweska e Malczewska (2009), de julho a dezembro de 2008, acompanhando-se a distribuição dos componentes de nitrogênio no esgoto municipal após o tratamento. A investigação preliminar nos CW, que têm sido explorados há 10 anos, mostrou uma eficiência de remoção variável de compostos de nitrogênio. Assim, as pesquisadoras indicaram que uma continuação nessa pesquisa poderia indicar a eficiência do tratamento de águas residuárias nas estações de verão e inverno.

Tietz *et al.* (2008), consideram as CWFSSVs com carga intermitente como o estado da arte no assunto. Tais autores afirmam que essa modalidade poderia cumprir requisitos rigorosos de qualidade de efluentes. Assim, investigaram a distribuição espacial de utilização de carbono bacteriana, com base em medições de incorporação de ^{14}C -leucina, no substrato de CW plantadas e não plantadas, em escala piloto, e em uma CW plantada, em campo. Assim, concluíram que: (i) os CW em escala piloto foram modelos adequados para investigar a utilização de carbono microbiano nos CW; (ii) a maior parte do aumento da produtividade bacteriana ocorreu nos primeiros 10 cm do substrato e (iii) as plantas não demonstraram influência significativa na produtividade e biomassa de bactérias, bem como na remoção de carbono orgânico total em águas residuárias.

Dois CW em escala piloto para tratamento de águas residuárias e de águas superficiais foram estudadas por Langergraber (2003). Os resultados foram discutidos com base no comportamento hidráulico dos CW. Em adição, foram mostrados resultados das simulações de transporte reativo por meio do modelo multi-componente CW2D (*Constructed Wetlands 2 Dimensional*). A calibração do modelo de fluxo foi possível e as simulações alcançaram bem os valores medidos para CW de escala piloto. Além disso, são abordadas as novas necessidades de investigação sobre simulação de fluxo subsuperficial.

Seo *et al.* (2011) estudaram as eficiências de remoção e velocidades de decomposição de poluentes no tratamento, por meio de CW, das águas residuárias do cultivo hidropônico em estufas. As taxas de remoção de DBO, DQO, SS, NT e PT foram de 88%, 79%, 92%, 64% e 92%, respectivamente. As velocidades de decomposição (K , em dia^{-1}) de poluentes no 1º leito de fluxo horizontal de CW foram: SS ($0,54 \text{ dia}^{-1}$) > DBO ($0,39 \text{ dia}^{-1}$) > DQO ($0,27 \text{ dia}^{-1}$) > PT ($0,26 \text{ dia}^{-1}$) > NT ($0,06 \text{ dia}^{-1}$)

¹). E, no 2º leito de fluxo horizontal de CW, foram: PT (0,52 dia⁻¹) > DBO (0,28 dia⁻¹) > DQO (0,15 dia⁻¹) > NT (0,06 dia⁻¹) > SS (0,10 dia⁻¹).

Bao *et al.* (2012), com base na análise da composição e dos mecanismos de purificação de CW, resumiram os fatores que influenciam a purificação dos CW, bem como, apontaram problemas e soluções de CW. Os autores consideraram que a realização de um estudo aprofundado em: projetos de *wetlands* construídos, controle operacional e de gestão da manutenção para melhorar benefícios abrangentes, tem grande significado prático e abrangente significado social.

A análise dos resultados da busca do tópico “*constructed wetlands*” na Coleção Principal da *Web of Science*, em relação ao número de publicações, mostrou que: quanto aos tipos de documentos encontrados, aproximadamente 83% são artigos; quanto aos autores, os que possuem mais publicações são: Jan Vymazal⁴ (71), Peter Kusch⁵ (69), Joan Garcia⁶ (69), Miklas Scholz⁷ (61), Ülo Mander⁸ (59); quanto aos grupos de autores, os mais comuns foram: IEEE⁹, ASAE¹⁰ e CEPPEH ORG COMM¹¹; quanto à quantidade por país, ocorreram mais publicações originadas dos seguintes países: EUA (1258), China (780), Alemanha (252), Inglaterra (240) e Espanha (237), estando o Brasil em 15º lugar, com 85 publicações; quanto aos idiomas, prevalece o inglês, porém há 23 artigos em português.

Assim, após a análise dos resultados em termos nacionais, os autores com maior número de publicações foram: Antônio T. de Matos¹² (19); Alisson C. Borges¹³ (12); Marcos Von Sperling¹⁴ (11); Ronaldo Fia¹⁵ (8) e Fátima R. L. Fia¹⁶ (7). Além disso, foram verificados os 10 primeiros artigos mais relevantes dentre os 85 de origem nacional, os quais estão listados no Quadro 7.

⁴ Czech University of Life Sciences Prague, República Tcheca.

⁵ Helmholtz Centre for Environmental Research, Alemanha.

⁶ Universitat Politècnica de Catalunya-Barcelona Tech, Espanha.

⁷ University of Salford, Reino Unido.

⁸ University of Tartu, Estônia.

⁹ Institute of Electrical and Electronics Engineers.

¹⁰ American Society of Agricultural Engineers.

¹¹ Conference on Environmental Pollution and Public Health Organizing Committee

¹² Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG.

¹³ Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG.

¹⁴ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG.

¹⁵ Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, MG.

¹⁶ Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, MG.

Quadro 7 – Primeiros dez artigos mais relevantes a respeito de CW a nível nacional.

Autor	Ano	Artigo
Sezerino <i>et al.</i>	2015	<i>Brazilian experiences with constructed wetlands applied to wastewater treatment: design parameters for horizontal systems</i>
Borges, Calijuri, <i>et al.</i>	2009	<i>Horizontal subsurface flow constructed wetlands for mitigation of ametryn-contaminated water</i>
Borges, de Matos, <i>et al.</i>	2009	Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas alagados construídos operando sob condições climáticas tropicais
Borges <i>et al.</i>	2016	<i>Potential for denitrification in sequencing batch constructed wetlands cultivated with <i>T. latifolia</i> and <i>C. zizanioides</i></i>
Pelissari <i>et al.</i>	2014	<i>Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil</i>
Mander <i>et al.</i>	2014	<i>Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review</i>
Sarmento <i>et al.</i>	2012	<i>Evaluation of Vertical-Flow Constructed Wetlands for Swine Wastewater Treatment</i>
Chagas <i>et al.</i>	2011	<i>Organic matter removal kinetics in constructed wetlands cultivated with yellow lily</i>
Fia <i>et al.</i>	2010	<i>Performance of constructed wetlands used in the treatment of wastewater of coffee processing</i>
Von Sperling <i>et al.</i>	2010	<i>Comparison between polishing (maturation) ponds and subsurface flow constructed wetlands (planted and unplanted) for the post-treatment of the effluent from UASB reactors</i>

Fonte: Adaptado de **Web of Science (2016)**

Sezerino *et al.* (2015), em revisão bibliográfica, apresentaram um estado da arte a respeito dos *wetlands* construídos de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal (CWFH) no Brasil. Para isso, identificaram parâmetros de projeto e dados operacionais, abordaram uma classificação para os *wetlands* construídos, os diferentes critérios de dimensionamento, a composição das unidades de tratamento e as macrófitas empregadas.

Borges, Calijuri, *et al.* (2009) submeteram CW de fluxo subsuperficial à adição contínua de Ametryn e avaliaram-nas por 11 semanas, com o objetivo de determinar a viabilidade desses sistemas para o tratamento de água contaminada com esse composto. Os resultados indicaram que 39% do total do montante adicionado de Ametryn foram removidos, transferidos ou transformados, concluindo os autores que os CW são capazes de tratar esse tipo de água residuária, atuando como filtros tampão entre as fontes de emissão e os corpos de água a jusante.

Borges, de Matos, *et al.* (2009) avaliaram dois corantes (Rodamina WT e Fluoresceína Sódica) na determinação das características hidrodinâmicas de CW com escoamento subsuperficial, operando em região de clima tropical. Os tempos de residência experimentais (τ_R) variaram entre 4,5 e 5,0 dias, e os parâmetros de modelos teóricos foram obtidos para cada sistema, indicando dispersões muito pequenas. Os CW, que apresentavam relação comprimento/largura (L/B) de 24/1,

comportaram-se como sistemas de escoamento próximo ao pistonado. A pesquisa indicou que a Rodamina WT pode ser utilizada com resultados satisfatórios na avaliação do comportamento hidrodinâmico de CW.

Borges *et al.* (2016) estudaram a desnitrificação e absorção pelas plantas em CW. Os pesquisadores aplicaram Nitrato em CW operadas em batelada, sendo que dentre as seis unidades, três receberam etanol como fonte de carbono. O experimento consistiu de duas fases principais, com ciclos de 3 e 1 d. Em uma fase extra, os valores de decaimento de variáveis de água foram avaliados. A remoção de nitrato em nitrogênio (fase I) foi 11,7 a 54,8% para CW sem etanol e 98,0 a 99,9% para CW com adição de etanol. Na fase II, a remoção foi de 3,6 a 15,7% para CW sem etanol e 94,7 a 97,5% para CW com adição de etanol. CW foram eficazes para a remoção de nitrato, em especial as plantadas. CW cultivadas com Vetiver apresentaram os melhores resultados na remoção de nitrogênio. A adição de etanol aumentou a eficiência da desnitrificação, mas crescentes concentrações de nitrito em CW também deverão ser consideradas. Os dados desse artigo não puderam ser acrescentados à base de dados por não se ter obtido acesso ao texto na íntegra, mas apenas ao resumo.

Pelissari *et al.* (2014) avaliaram as transformações de nitrogênio em CW de fluxo horizontal e vertical trabalhando em paralelo, para o tratamento de águas residuais de laticínios bovinos. Ambas os CW, tanto a horizontal (26,50 m² de área), como a vertical (14,30 m² de área) foram preenchidas com areia e plantadas com *Typha domingensis*. A HFCW e a VFCW trabalharam, respectivamente, com vazões afluentes de 3,98 e 4,50 m³ semana⁻¹. Na HFCW, obteve-se remoções de 59% de NT e 58% de NH₄⁺ e na VFCW, obteve-se remoções de 23% de NT e 80% de NH₄⁺, sendo que 73% da remoção de amônia foi devido ao processo de nitrificação. As macrófitas removeram, respectivamente, na HFCW e na VFCW, 5,1% e 0,88% da taxa de carga influente de N.

Mander *et al.* (2014) analisaram artigos publicados em revistas e jornais internacionais mostrando que as emissões de CO₂-C foram significativamente menores em CW de fluxo superficial livre do que em CW de fluxo subsuperficial. Apesar de o artigo estar entre os citados no Quadro 7, não entra na análise foco desse trabalho, por isso seus dados não foram anexados ao banco de dados.

Sarmento *et al.* (2012) avaliaram o papel de *Cyperus sp.* na remoção de poluentes de águas residuárias da suinocultura. VFCW em escala piloto, operando

com um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 72 h, foram monitorados em uma estufa, em Viçosa (MG), Brasil. Foram observadas diferenças significativas para os seguintes parâmetros: N Kjeldahl, PT, alcalinidade e condutividade elétrica, com remoções médias de 37,5 e 28,5%, 55,9 e 44,4%, 30,2 e 25,6 e 26,1% e 22,9% (para CW plantadas e não plantadas, respectivamente). A evapotranspiração também foi estatisticamente superior nos CW plantadas. Assim, concluíram que plantas nos CW são importantes para atingir alta remoção de nutrientes.

Chagas *et al.* (Chagas *et al.*, 2011) buscaram obter o ajuste de modelo matemático adaptado de cinética de primeira ordem e os respectivos parâmetros cinéticos para descrição da degradação da matéria orgânica em CW cultivados com lírio amarelo (*Hamero callis flava*), no tratamento de esgoto doméstico. Para isso cultivaram CW com lírio amarelo e submeteram-nos a diferentes taxas de aplicação hidráulica (TAH) superficial de esgoto doméstico. Assim, o modelo matemático adaptado de decaimento do material orgânico apresentou bom ajuste e descreveu adequadamente a cinética de remoção de matéria orgânica (DQO) nos sistemas avaliados, apresentando, geralmente, R² superior a 75%.

Fia *et al.* (2010) cultivaram duas gramíneas forrageiras de inverno, azevém (*Lolium multiflorum*) e aveia preta (*Avena strigosa Schreb*), em CW para o tratamento de águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro (ARC) com o objetivo de se avaliar seu desempenho agrônomo. Essas forrageiras foram submetidas a diferentes cargas orgânicas (650 a 1.500 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DQO), proporcionadas pela aplicação dos efluentes de filtros anaeróbios, utilizados no tratamento da ARC. Os resultados permitiram concluir que, dentre as forrageiras estudadas, o azevém se mostrou mais adequado para ser cultivado em SACs utilizados no pós-tratamento da ARC efluente de filtros anaeróbios, já que apresentou maior rendimento de matéria seca e proteína bruta e, portanto, melhor adaptação ao sistema.

Von Sperling *et al.* (2010) compararam o desempenho de dois sistemas de tratamento que funcionam em paralelo, com a mesma água residual afluente: (i) UASB + três lagoas de polimento em série + filtro grosso (200 equivalentes de população) e (ii) UASB + *wetlands* construídos de fluxo subsuperficial (50 equivalentes de população). Duas unidades de CW, operando em paralelo, foram analisadas, sendo uma plantada (*Typha latifolia*) e a outra não plantada. Os sistemas estavam localizados em Belo Horizonte, Brasil. Os CW mostraram-se mais eficientes

na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos, levando a boas concentrações de DBO e de DQO e excelentes concentrações de SS no efluente. A CW plantada teve desempenho melhor do que a unidade não plantada, mas esta última também foi capaz de fornecer uma boa qualidade do efluente. O sistema de lagoas de polimento foi mais eficiente na remoção de nitrogênio (amônia) e de coliformes (*E. coli*). Os autores apresentam também as quantidades necessárias terra e considerações sobre o custo de tais sistemas.

5.2 CW DE FLUXO SUPERFICIAL LIVRE

Através da busca realizada conforme metodologia descrita no item 4.1, foram encontrados 68 resultados sobre este tipo de CW, os quais se restringem aos últimos cinco anos.

O artigo de maior relevância obtido nessa busca trata-se de uma revisão feita por Vymazal (2013). O autor explica que macrófitas emergentes desempenham papéis importantes nesses sistemas, citando diversas vantagens da utilização desse tipo de plantas nesses CW. Vymazal comenta que tem sido relatado que o desempenho do tratamento nesses CW plantadas é superior a lagoas sem vegetação, mas que tal desempenho seria possivelmente afetado pelas espécies vegetais utilizadas. A pesquisa de 643 CWFSL de 43 países registrou 150 espécies de plantas e revelou que os gêneros de macrófitas mais comumente utilizados foram *Typha*, *Scirpus* (*Schoenoplectus*), *Phragmites*, *Juncus* e *Eleocharis*. Em termos de espécies, as mais utilizadas foram *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Juncus effusus*, *Scirpus lacustris*, *Scirpus californicus* e *Phalaris arundinacea*. Em termos de continentes, *P. Australis* é a espécie mais freqüente na Europa e Ásia, *T. latifolia* na América do Norte, *Cyperus papiro* na África, *P. australis* e *Typha domingensis* na América Central e do Sul e *Scirpus validus* (*S. tabernaemontani*) na Oceania.

Foi incluído no banco de dados o artigo de Kotti et al (2013), intitulado Modelos de Lógica Fuzzi para a previsão de remoção de DQO em CWFSL (tradução nossa), o qual apresenta uma metodologia, com base em sistemas de inferência fuzzy (SIF), para avaliar a eficiência de remoção de matéria orgânica em CWFSL. Um modelo fuzzy foi desenvolvido e validado usando dados experimentais coletados em um período de dois anos em cinco unidades escala piloto de CWFSL. Os CW

diferiam em forma, substrato, espécies vegetais, e operando em quatro diferentes TDHs. Os resultados indicaram que as previsões do modelo apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

5.3 CW DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

De acordo com a metodologia descrita, foram encontrados 297 resultados sobre este tipo de CW. Dentre esses, 19 tratavam de revisão bibliográfica sobre o tema, sendo mais relevante a já descrita dentre os artigos brasileiros, no item 5.1, de Sezerino et al (2015).

Dos artigos que não eram de revisão bibliográfica, o mais relevante foi o de Vymazal e Svehla (2013), o qual foi incluído no banco de dados. O artigo intitulado “Ferro e manganês em sedimentos de tratamento de esgoto municipal em CWSSH” avaliou, em 2008, as concentrações de ferro e manganês nos sedimentos de sete CW com escoamento subsuperficial horizontal na República Checa. A pesquisa revelou que a quantidade de sedimentos no leito de filtração aumentou com a duração da operação. As concentrações de manganês no sedimento foram mais elevadas nos sistemas novos e diminuíram com o tempo de operação, geralmente prevalecendo nas camadas superiores. Essas concentrações foram encontradas dentro do intervalo em CW naturais não poluídas. A concentração de ferro no sedimento também diminuiu com o aumento do tempo de operação e foi similar a outros estudos de CW tratando esgoto, mas maior em relação a sedimentos poluídos, altamente anaeróbicos. Os resultados demonstraram que para avaliar a quantidade de ferro e de manganês nos substratos filtrantes, é necessário considerar tanto a concentração dos elementos como a quantidade de sedimento.

5.4 CW DE FLUXO SUBSUPERFICIAL VERTICAL

Por meio da metodologia citada, encontrou-se 246 resultados sobre este tipo de CW, dos quais, cinco tratavam de revisão bibliográfica sobre o tema.

A mais relevante das revisões abrange também CW de fluxo horizontal. Foi a de Saeed e Sun (2012), os quais tratam dos mecanismos de remoção de nitrogênio

e compostos orgânicos nos CW de fluxo de subsuperfície, incluindo a relação de parâmetros ambientais, condições de funcionamento e meio suporte.

Dentre os outros artigos, o mais relevante não fornecia os dados mínimos sobre o experimento buscados nesse banco de dados. Na sequência, o artigo que possuía texto integral disponível e dados mínimos para compor o banco, foi o de Dan *et al.* (2013), de título “Remoção de sulfonamidas e trimetoprima de esgoto sanitário por CW e fatores que influenciam-na” (tradução nossa). Tais autores estudaram doze CW em escala piloto com diferentes configurações. Os tratamentos foram quatro tipos de fluxo, três substratos, duas plantas e três taxas de aplicação hidráulica através de duas estações (verão e inverno). A maioria dos antibióticos-alvo foi eficientemente removida por CW específicos; em particular, todos os tipos de CW tiveram um bom desempenho para a degradação de sulfapiridina. O tipo de fluxo foi o fator de maior influência neste estudo, e a melhor remoção de sulfonamidas foi alcançada em CWSSVF; no entanto, o fenômeno oposto foi encontrado para a trimetoprima. Relações significativas foram observadas entre a degradação do antibiótico, temperatura mais elevada e potencial redox, o que indica que as vias microbiológicas foram as mais prováveis rotas de degradação para sulfonamidas e trimetoprima em CW. Os dados desses experimentos foram inseridos no banco de dados desse trabalho.

5.5 CW DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HÍBRIDAS

De acordo com a metodologia descrita anteriormente, encontrou-se 18 resultados sobre este tipo de CW, dos quais, nenhum se trata de revisão bibliográfica sobre o tema.

O artigo apontado como mais relevante foi o de Ávila *et al.* (2016), cujo título é “Influência da Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH), de simulações de eventos de tempestade, e da sazonalidade, sobre o desempenho de tratamento de um sistema de CW experimental híbrido de três estágios” (tradução nossa). Nesse artigo estudou-se um sistema híbrido experimental baseado em um reator anaeróbio seguido por três fases de diferentes configurações de CW. O sistema foi avaliado sob uma TAH alta ($0,27 \text{ m d}^{-1}$, considerando-se a área superficial das camadas de fluxo vertical) durante um ano. O sistema consistia em um reator UASB seguido por dois CWSSVF em paralelo de $1,5 \text{ m}^2$, depois por um CWSSH de 2 m^2 e por fim um

FSLCW de 2 m², que operavam em série. O sistema atingiu valores muito elevados de remoção de sólidos, matéria orgânica e nutrientes (82, 93, 96 e 75% para DQO, DBO₅, SSt_e N-NH₄, respectivamente). As remoções de P-PO₄ e SO₄²⁻, porém, foram relativamente baixas, de 11 e 10%, respectivamente. Houve um efeito sazonal no sistema para os parâmetros cuja remoção depende altamente da biodegradação, sendo reforçada sob condições mais quentes. O TDH experimental de todo o sistema foi de cerca de 38 h, maior do que o TDH teórico (28 h).

5.6 BANCO DE DADOS REFERENTE A TRATAMENTO DE ESGOTO MUNICIPAL

A partir dos artigos obtidos nas pesquisas anteriores, foi construído o banco de dados, exposto no Quadro 8, o qual foi constituído conforme as principais características dos *wetlands* incluídos, em termos do artigo, sistema, efluente, substrato, vegetação, bem como, as eficiências de remoção de cada CW.

O presente banco de dados sumariza os artigos obtidos, com exceção dos que eram revisão de literatura ou que não se obteve texto na íntegra, mas apenas ao resumo.

Dos estudos obtidos, pode-se notar que, em geral, os estudos obtiveram boas remoções dos compostos, entretanto nem sempre relacionados à presença ou não das plantas. Em termos gerais, as maiores remoções estiveram relacionadas aos tipos de fluxo e substrato presentes nos CW, sendo a presença das macrófitas mais relacionada a um polimento do efluente tratado.

Quadro 8 – Banco de dados de diversos tipos de *wetlands* construídos

Resultados obtidos de Hsu <i>et al.</i> (2011)														
ARTIGO		SISTEMA						EFLUENTE			MEIO SUPORTE	PLANTA		EFICIÊNCIA
Duração (meses)	Clima	Tratam.	Fluxo	Células	Área Superf. (m ²)	Profund. Média (m)	Volume (m ³)	Tipo	Taxa/vazão (m ³ /dia)	TDH(d)	Tipo	Espécie	Ind/m ²	Remoção Média (%)
48	Cfa	Primário e Secundário	CWFSL	5	33.000	n.r.	n.r.	esgoto municipal	2.700,00	5,50	(não se aplica)	<i>B. mutica</i> , <i>C. esculenta</i> , <i>H. pogonocalyx</i> , <i>entre outras.</i>	n.r.	DBO - 58.8% DQO - 51.1% NT - 35.6% PT - 20.7%
				8	85.000	n.r.	n.r.		11.000,00	5,00	(não se aplica)	<i>B. mutica</i> , <i>C. esculenta</i> , <i>H. pogonocalyx</i> , <i>entre outras.</i>	n.r.	DBO - 30.7% DQO - 48.7% NT - 51.4% PT - 52.3%

(continua...)

Resultados obtidos de Tietz <i>et al.</i> (2008)														
ARTIGO		SISTEMA						EFLUENTE			MEIO SUPORTE	PLANTA		EFICIÊNCIA
Duração (meses)	Clima	Tratam.	Fluxo	Células	Área Superf. (m ²)	Profund. Média (m)	Volume (m ³)	Tipo	Taxa/vazão (m ³ /dia)	TDH(d)	Tipo	Espécie	Ind/m ²	Remoção Média (%)
24	20-25°C	Primário e Secundário em Escala Piloto	CWFSSV, carga intermitente	6	1	0,50	0,50	esgoto municipal (9,15 g COT m ⁻² d ⁻¹)	0,06	2,50-3,00	0,06-4 mm, 4-8 mm e 16-32 mm	<i>Miscanthus sinensis giganteus</i>	40-130	7 a 14 % absorvido pelas plantas, 97% de remoção total.
				2	1	0,50	0,50	esgoto municipal (9,15 g COT m ⁻² d ⁻¹)	0,06	2,50-3,01	0,06-4 mm, 4-8 mm e 16-32 mm	(não se aplica)	n.r.	96,4%
12	Cfb	Primário e Secundário		3	18	n.r.	n.r.	esgoto municipal (8.65 g COT m ⁻² d ⁻¹)	0,79	n.r.	n.r.	<i>Phragmites australis</i>	n.r.	15 a 31% removido pelas plantas, 95% de remoção total

(continua...)

Resultados obtidos de Chagas <i>et al.</i> (2011)														
ARTIGO		SISTEMA						EFLUENTE			MEIO SUPORTE	PLANTA		EFICIÊNCIA
Duração (meses)	Clima	Tratam.	Fluxo	Células	Área Superf. (m ²)	Profund. Média (m)	Volume (m ³)	Tipo	Taxa/vazão (m ³ /dia)	TDH(d)	Tipo	Espécie	Ind/m ²	Remoção Média (%)
n.r.	Cwb	Secundário	CWFSSH, sistema em paralelo, fluxo contínuo.	4	24	0,30	7,20	esgoto doméstico (TCO de: 44 kg ha ⁻¹ d ⁻¹ de DBO)	0,74	3,90	brita nº 0, volume de vazios 48,4%.	lírio amarelo	n.r.	DQO - 72,1
									1,45	2,00				DQO - 63,7
			2,90						1,00	DQO - 72,2				
			3,80						0,75	DQO - 70,0				
			SSH, sistema em paralelo, fluxo contínuo.											

(continua...)

Resultados obtidos de Kotti <i>et al.</i> (2013)														
ARTIGO		SISTEMA					EFLUENTE			MEIO SUPORTE	PLANTA		EFICIÊNCIA	
Duração (meses)	Clima	Tratam.	Fluxo	Células	Area Superf. (m ²)	Profund. Média (m)	Volume (m ³)	Tipo	Taxa/vazão (m ³ /dia)	TDH(d)	Tipo	Espécie	Ind/m ²	Remoção Média (%)
28	Csa, Csb	Primário e Secundário em escala piloto	CWFSL	5	3	0,45	1,30	Esgoto Sintético	n.r.	6, 8, 14 e 20	areia	<i>Typha</i>	n.r.	DBO 35% a 100%
											argila	<i>Typha</i>	n.r.	DBO 35% a 100%
												<i>Phragmites</i>	n.r.	DBO 35% a 100%
												<i>Arundo donax</i>	n.r.	DBO 35% a 100%
												<i>Typha</i>	n.r.	DBO 35% a 100%. A unidade com a forma trapezoidal mostrou o melhor desempenho, remoções médias de 80,1%, 73,5%, 70,4%, 68,6%, 64,7% e 63,5% para DBO, DQO, NTK, N-NH ₄ , P-PO ₄ e PT.

(continua...)

Resultados obtidos de Vymazal e Svehla (2013)														
ARTIGO		SISTEMA					EFLUENTE			MEIO SUPORTE	PLANTA		EFICIÊNCIA	
Duração (meses)	Clima	Tratam.	Fluxo	Células	Área Superf. (m ²)	Profund. Média (m)	Volume (m ³)	Tipo	Taxa/vazão (m ³ /dia)	TDH(d)	Tipo	Espécie	Ind/m ²	Remoção Média (%)
24	n.r.	n.r.	CWFSSH	7	n.r.	n.r.	n.r.	esgoto municipal	n.r.	n.r.	Rocha (4–16 mm)	<i>P. arundinacea</i>	n.r.	n.r.
24											Rocha (4–8 mm)	<i>P. arundinacea</i>		
60											Cascalho (4–8 mm)	<i>P. arundinacea</i> + <i>P. australis</i>		
84											Cascalho (4–32 mm)	<i>P. australis</i>		
96											Rocha (4–8 mm)	<i>P. arundinacea</i> + <i>P. australis</i>		
108											Cascalho (4–8 mm)	<i>P. arundinacea</i> + <i>P. australis</i>		
192											Cascalho (0–16 mm)	<i>P. australis</i>		

(continua...)

Resultados obtidos de Ávila <i>et al.</i> (2016)														
ARTIGO		SISTEMA						EFLUENTE			MEIO SUPORTE	PLANTA		EFICIÊNCIA
Duração (meses)	Clima	Tratam.	Fluxo	Células	Área Superf. (m ²)	Profund. Média (m)	Volume (m ³)	Tipo	Taxa/vazão (m ³ /dia)	TDH(d)	Tipo	Espécie	Ind/m ²	Remoção Média (%)
12	Csa	Secundário	Híbrido	4	n.r.	n.r.	n.r.	esgoto municipal (103 g DBO ₅ m ² d ⁻¹)	0,80	1,58	variado	<i>Phragmites australis</i>	n.r.	BOD ₅ 85% NH ₄ -N 50% PO ₄ -P 0% SO ₄ ²⁻ -22%
														BOD ₅ 53% NH ₄ -N 38% PO ₄ -P 0% SO ₄ ²⁻ -3%
														BOD ₅ 22% NH ₄ -N 33% PO ₄ -P 0% SO ₄ ²⁻ -4%

Fonte: Autoria própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento dessa parcela da bibliografia atual permitiu uma visão geral sobre o tema. O banco de dados resultante forneceu subsídios à aplicação dos *wetlands* no tratamento de efluentes. A comparação entre os trabalhos estudados, permitiu que tais resultados pudessem ser utilizados como base na escolha pelo sistema mais adequado de acordo com o tratamento a ser realizado e as características locais.

Diante de tamanha variabilidade de estudos a respeito de CW, é conveniente que sejam realizadas periódicas revisões específicas a respeito de cada tipo de CW em termos de fluxo, ou até mesmo em termos das mais novas classificações propostas.

7 REFERÊNCIAS

AVILA, C.; GARCÍA, J.; GARFÍ, M. Influence of hydraulic loading rate, simulated storm events and seasonality on the treatment performance of an experimental three-stage hybrid CW system. **Ecological Engineering**, v. 87, p. 324-332, 2016.

BABATUNDE, A.; ZHAO, Y. Forms, patterns and extractability of phosphorus retained in alum sludge used as substrate in laboratory-scale constructed wetland systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 152, n. 1, p. 8-13, 2009.

BAO, Z.; JIN, D.; TENG, H. Constructed Wetlands Sewage Treatment Technology Purification Mechanism and Influence Factors. **Advanced Materials Research**, v. 518-523, p. 3003-3006, 2012.

BAVOR, H. J.; ROSER, D. J.; ADCOCK, P. W. Challenges for the development of advanced constructed wetlands technology. **Water Science and Technology**, v. 32, n. 3, p. 13-20, 1995.

BORGES, A. C. et al. Horizontal subsurface flow constructed wetlands for mitigation of ametryn-contaminated water. **Water Sa**, v. 35, n. 4, p. 441-445, 2009.

_____. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas alagados construídos operando sob condições climáticas tropicais. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 301-310, 2009.

_____. Potential for denitrification in sequencing batch constructed wetlands cultivated with *T. latifolia* and *C. zizanioides*. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 12, p. 5464-5472, 2016.

BRASIL. **Decreto nº 1.905, de 16 de maio de 1996**. Diário Oficial da União: Poder Executivo, Brasília, DF, 17 mai. 1996. Seção 1, p. 29514. 1996.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T.; SOARES, A. A. Planting and fenological performance of *Thypha* sp. used in the domestic wastewater treatment under constructed wetland system. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 266-272, 2007.

BRIX, H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the root-zone method. **Wat. Sci. Tech**, v. 19, n. 1/2, p. 107-118, 1987.

_____. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. **Constructed wetlands for water quality improvement**, p. 9-22, 1993.

CANO, V.; GOMES, B. G. L. A.; NOLASCO, M. A. Pós-tratamento de efluentes de reator uasb com wetlands construídos: avaliação do desempenho. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - AIDIS, 2012, Salvador. Anais... p.1-12.

CHAGAS, R. C. et al. Cinética de remoção de matéria orgânica em sistemas alagados construídos cultivados com lírio amarelo. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1186-1192, 2011.

COLLAÇO, A. B.; ROSTON, D. M. O uso de pneus picados como meio suporte de leitos cultivados para o tratamento de esgoto sanitário. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 3, n. 1, 2006.

CRITES, R. W.; MIDDLEBROOKS, E. J.; BASTIAN, R. K. **Natural wastewater treatment systems**. Civil and Environmental Engineering Series: CRC Press: 549 p. 2014.

FAULWETTER, J. L. et al. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 6, p. 987-1004, 2009.

FIA, R. et al. Performance of constructed wetlands used in the treatment of wastewater of coffee processing. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1323-1329, 2010.

FONDER, N.; HEADLEY, T. The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. **Ecological Engineering**, v. 51, p. 203-211, 2013.

HAMMER, D. A.; BASTIAN, R. K. Wetland ecosystems: natural water purifiers. In: HAMMER, D. A. (Ed.). **Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural**. 1. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1989. p.5-20.

HSU, C. B. et al. Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 10, p. 1533-1545, 2011.

HUETT, D. O. et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands. **Water Research**, v. 39, n. 14, p. 3259-3272, 2005.

KADLEC, R. H. et al. Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands: Implications for treatment response. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 4, p. 365-381, 2005.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. **Treatment wetlands**. 2. Boca Raton, Florida: CRC press, 2008. 1046 p.

KOTTEC, M. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, p. 259-263, 2006.

KROSS, C. S.; RICHTER, S. C. Species Interactions in Constructed Wetlands Result in Population Sinks for Wood Frogs (*Lithobates sylvaticus*) while Benefitting Eastern Newts (*Notophthalmus viridescens*). **Wetlands**, v. 36, n. 2, p. 385-393, 2016.

LACERDA, R. T. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão e Produção**, v. 19, n. 1, p. 59-78, 2012.

LANGERGRABER, G. Simulation of subsurface flow constructed wetlands - results and further research needs. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 157-166, 2003.

LANGERGRABER, G.; HABERL, R. Constructed wetlands for water treatment. **Minerva Biotecnologica**, v. 13, n. 2, p. 123-134, 2001.

MANDER, U. et al. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. **Ecological Engineering**, v. 66, p. 19-35, 2014.

PAWESKA, K.; MALCZEWSKA, B. Nitrogen compounds in drain sewage after constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 60, n. 10, p. 2613-2619, 2009.

PELISSARI, C. et al. Comportamento inicial de wetlands construídos empregados no tratamento de efluentes da bovinocultura de leite. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 9, n. 2, 2012.

_____. Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 307-310, 2014.

RAMSAR, C. S. **An Introduction to the Convention on Wetlands (previously The Ramsar Convention Manual)**. Gland, Suíça, 2016.

REED, S. C. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: a technology assessment. FAO, 1993.

ROCHA, P. V. D. Wetland não-plantada de fluxo vertical com leito de areia e conchas de ostra como pós-tratamento de efluentes para remoção de fósforo. Trabalho de Conclusão de Curso: UTFPR, 2012.

ROUSSEAU, D. P. L. et al. Constructed wetlands for water reclamation. **Desalination**, v. 218, n. 1-3, p. 181-189, 2008.

SARMENTO, A. P.; BORGES, A. C.; MATOS, A. T. Evaluation of Vertical-Flow Constructed Wetlands for Swine Wastewater Treatment. **Water Air and Soil Pollution**, v. 223, n. 3, p. 1065-1071, Mar 2012.

SEO, D. et al. Treatment Efficiencies and Decomposition Velocities of Pollutants in Constructed Wetlands for Treating Hydroponic Wastewater. **Korean Journal of Soil Science & Fertilizer**, v. 44, n. 5, p. 937-943, 2011.

SEZERINO, P. H. et al. Brazilian experiences with constructed wetlands applied to wastewater treatment: design parameters for horizontal systems. **Engenharia Sanitaria E Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 151-158, 2015.

_____. **Wetlands Brasil**. Florianópolis, SC: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. 2014.

SILVA, S. C. **Wetlands construídos de fluxo vertical com meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgotos domésticos**. 2007. 231 p. (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

TIETZ, A. et al. Bacterial carbon utilization in vertical subsurface flow constructed wetlands. **Water Research**, v. 42, n. 6-7, p. 1622-1634, Mar 2008.

UCKER, F. E. et al. Componentes do sistema de tratamento de esgoto com plantas. **Revista Monografias Ambientais (Fechada para submissões por tempo indeterminado)**, v. 13, n. 1, p. 2974-2981, 2014.

USEPA, U. S. E. P. A. **Wastewater Technology Fact Sheet Wetlands: Subsurface Flow**. Washington, D. C. 2000.

VON SPERLING, M.; DE LEMOS CHERNICHARO, C. A. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. IWA publishing, 2005..

VON SPERLING, M. et al. Comparison between polishing (maturation) ponds and subsurface flow constructed wetlands (planted and unplanted) for the post-treatment of the effluent from UASB reactors. **Water Science and Technology**, v. 61, n. 5, p. 1201-1209, 2010.

VYMAZAL, J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. **Ecological Engineering**, v. 18, n. 5, p. 633-646, 2002.

_____. Constructed wetlands for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 5, p. 475 - 477, 2005a.

_____. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 5, p. 478-490, Dec 1 2005b.

_____. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 380, n. 1-3, p. 48-65, 2007.

_____. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 1, p. 1-17, 2009.

_____. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. **Water**, v. 2, n. 3, p. 530-549, 2010.

_____. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. **Water Research**, v. 47, n. 14, p. 4795-4811, 2013.

_____. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 724-751, 2014.

VYMAZAL, J. et al. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. **Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe**, p. 17-66, 1998.

WANG, Y. et al. A simulation model of nitrogen transformation in reed constructed wetlands. **Desalination**, v. 235, n. 1, p. 93-101, 2009.