

II-219 – AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DESCENTRALIZADO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS EM ESCALA REAL COMPOSTO POR TANQUE SÉPTICO E *WETLAND* CONSTRUÍDA HÍBRIDA

Alexandre Antonio Jacob de Mendonça⁽¹⁾

Eng.º Civil (FAAP – Fundação Armando Álvares Penteado). Especialização em Engenharia de Saneamento Básico (FSP/USP). Mestre em Ciências pelo PPG em Saúde Pública, Área de Concentração: Saúde Ambiental, Linha de Pesquisa: Sistemas e Tecnologias de Saneamento Ambiental (FSP/USP). Eng.º Civil na CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, alocado no Setor de Avaliação Ambiental de Sistemas de Tratamento de Efluentes. Experiência profissional com projetos, serviços e obras de saneamento básico.

Marcelo Antunes Nolasco⁽²⁾

Bacharelado e licenciatura em Ciências Biológicas (UFSCAR). Mestrado Interunidades em Bioengenharia (USP). Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Livre-Docente na USP. Professor Associado 2 de Gestão Ambiental da EACH/USP, do mestrado e doutorado no PPG em Sustentabilidade da EACH/USP e do mestrado profissional em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade da FSP/USP. Coordenador do Grupo de Pesquisa “Água, Saneamento e Sustentabilidade” – GEPASS, do Lab. de Pesquisa em Saneamento Ambiental – LabSan e do InovaLab de Sustentabilidade Ambiental (ensino, pesquisa e extensão).

Endereço⁽¹⁾: Av. Prof.º Frederico Hermann Jr., Nº 345 – Alto de Pinheiros – São Paulo/SP - CEP: 05459-900 - Brasil - Tel: +55 (11) 3133-3767 - e-mail: alexandreajmendonca@usp.br

RESUMO

O presente estudo, parte integrante e um dos produtos da Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados – RENTED, apresenta a avaliação de uma estação experimental de tratamento de esgotos em escala real, construída nas dependências do CTH/Escola Politécnica no campus Butantã da USP em São Paulo/SP, constituída por tanque séptico seguido por *wetland* construída híbrida, composta por uma câmara com fluxo contínuo subsuperficial vertical seguida por uma câmara com fluxo contínuo subsuperficial horizontal, ambas cultivadas com capim Vetiver. Sua finalidade foi contribuir para a viabilização de uma solução simplificada e de baixo custo para o tratamento descentralizado de esgotos domésticos próximo das fontes geradoras, especialmente de habitações e núcleos habitacionais isolados, incluindo os de interesse social, em áreas periurbanas e rurais desprovidas de serviços públicos coletivos de esgotamento sanitário. O monitoramento do experimento em campo, incluindo o período inicial de partida, durou 6 meses consecutivos. Foram avaliados os parâmetros físico-químicos e microbiológicos do esgoto bruto e do efluente do tanque séptico e das câmaras da *wetland* construída híbrida durante 97 dias consecutivos. As eficiências médias de remoção constatadas no efluente final tratado quanto à matéria orgânica carbonácea foram de 96% para DBO_{5,20} e 90% para DQO, 40% para N-total, 23% para N-amoniaco, 60% para P-total, 52% para P-PO₄, 74% para SST, 96% para SSV, 75% para sólidos sedimentáveis, 44% para SDV, 88% para sulfeto total, e 97% para óleos e graxas totais, variando entre 73% e 100%. Cerca de 80% da fração orgânica da matéria nitrogenada presente no esgoto bruto foi removida. A remoção de coliformes termotolerantes foi, em média, de 2 a 3 unidades log, e de *Escherichia Coli*, média de 1 a 3 unidades log; *Giardia sp*, remoção média de 99,995%; *Cryptosporidium sp*, remoção média de 98,7%; enterovírus, remoção média de 99,6%; e *Ascaris sp*, concentração mínima de 0,10 ovo/L no efluente final tratado. A remoção de sulfetos propiciou a geração de efluente tratado sem odores desagradáveis. O capim Vetiver apresentou bom potencial de utilização em *wetlands* construídas para tratamento de esgotos domésticos. A qualidade do efluente tratado final atendeu às condições de lançamento e aos padrões de emissão de efluentes líquidos em corpos d’água e em sistemas públicos de esgotamento sanitário definidos na legislação ambiental federal e do Estado de São Paulo. A tecnologia de *wetlands* construídas híbridas associada ao tratamento de efluentes de tanque séptico apresentou bom potencial para o tratamento descentralizado de esgotos domésticos, próximo às fontes geradoras, inclusive em regiões com pouca disponibilidade de área livre.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de esgoto descentralizado, Tecnologias naturais, *Wetland* construída híbrida, Tanque séptico, Capim Vetiver, Saneamento sustentável.

INTRODUÇÃO

A concentração demográfica e de sistemas coletivos de esgotamento sanitário dentro do perímetro urbano da maioria dos municípios brasileiros dificulta o fornecimento de serviços de tratamento de esgotos domésticos à habitações e núcleos habitacionais isolados situados em áreas periurbanas e rurais, principalmente em municípios de pequeno porte (IBGE, 2010), intensificando os danos provocados pela poluição de origem antrópica ao meio ambiente e à preservação da saúde pública.

O presente estudo experimental em escala real pretendeu contribuir com o avanço do conhecimento em uma abordagem até então pouco explorada que consiste na utilização de *wetlands* construídas híbridas (ou filtros plantados com macrófitas) no tratamento descentralizado de esgotos domésticos próximo às fontes geradoras, especialmente de habitações e núcleos habitacionais isolados, incluindo os de interesse social, em áreas periurbanas e rurais desprovidas de serviços públicos coletivos de esgotamento sanitário.

METODOLOGIA

O esgoto bruto utilizado na estação de tratamento de esgoto (ETE) experimental, construída em escala real nas dependências do Centro Tecnológico de Hidráulica – CTH da Escola Politécnica da USP, é proveniente do alojamento de alunos do Conjunto Residencial da USP – CRUSP e do restaurante central da Cidade Universitária, no campus Butantã da USP, em São Paulo/SP.

O tanque séptico (TS) foi adquirido comercialmente e é fabricado em material estanque (plástico reforçado com fibra de vidro) passível de instalação sobre a superfície do terreno e à exposição permanente às intempéries climáticas. A *wetland* construída híbrida (WC Híbrida), construída em alvenaria de tijolos cerâmicos sobre o nível do solo, foi internamente dividida em duas câmaras justapostas e operando em série (ver Quadro 1 e Figura 1).

A primeira câmara, que recebe por gravidade o esgoto do tanque séptico, exerce a função de uma *wetland* construída de fluxo vertical (WCFV), subsuperficial e descendente, e a segunda, alimentada por gravidade pelo efluente da primeira câmara, de uma *wetland* construída de fluxo horizontal (WCFH), subsuperficial e ascendente.

O meio filtrante das câmaras é composto por camadas de brita Nº 1, com porosidade de 35%, e de brita Nº 2, com porosidade de 40%, dispostas horizontalmente e verticalmente, conforme consta na Figura 1.

No meio filtrante das câmaras, foram transplantadas, em 10/12/2014 e 20/01/2015, mudas com raízes nuas (de 2 a 5 cm de comprimento) e mudas com substrato natural (raízes com 15 cm de comprimento), totalizando 50 mudas na WCFV (13 mudas/m²) e 90 mudas na WCFH (25 mudas/m²), além de touceiras adultas com substrato natural, sendo duas na WCFV e uma na WCFH (raízes com comprimento de 15 cm), da espécie de macrófita aquática emergente denominada popularmente como capim Vetiver, de nome científico *Vetiveria zizanioides*.

Quadro 1. Principais características físicas da WC Híbrida

Características Físicas	Wetland Construída de Fluxo Vertical (WCFV)	Wetland Construída de Fluxo Horizontal (WCFH)
Formato em planta	Retangular	Retangular
Comprimento	3 m	3 m
Largura	1,20 m	1,20 m
Altura total	1 m	0,60 m
Altura útil do meio filtrante	0,95 m	0,50 m
Profundidade submersa do leito filtrante	0,50m	0,50m
Área superficial do leito filtrante (A _s)	3,6 m ²	3,6 m ²
Razão comprimento/largura	2,5:1	2,5:1
Declividade do fundo do leito	1%	1%

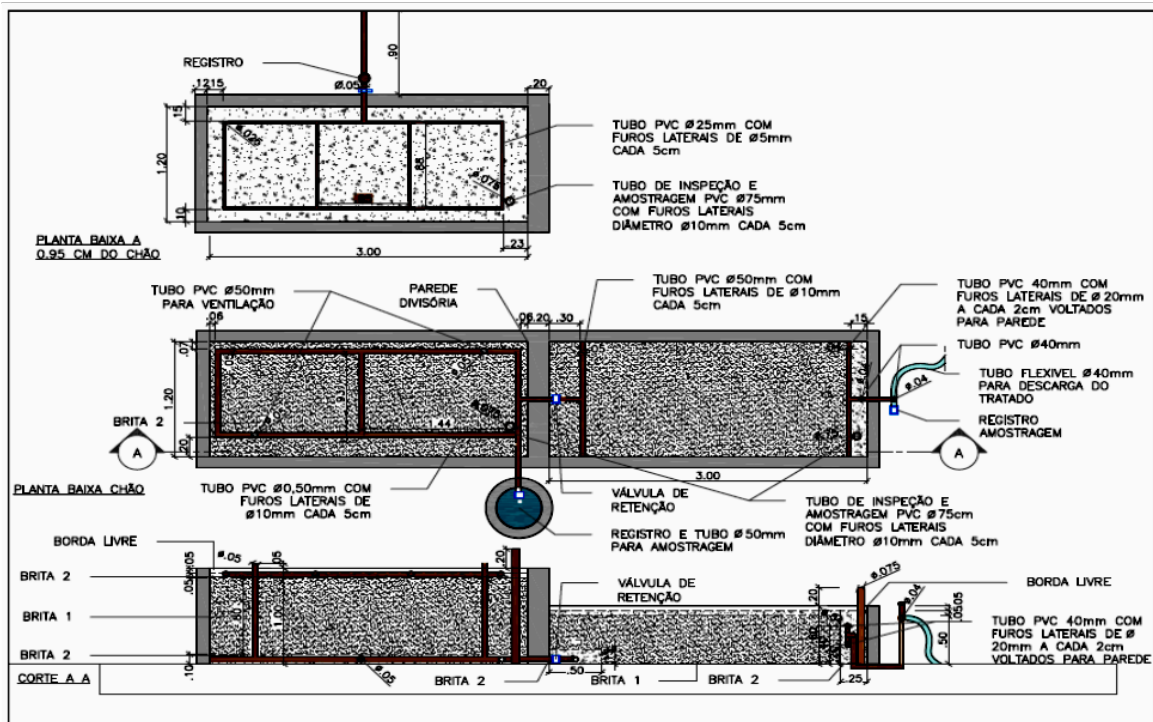


Figura 1. Desenho esquemático da WC Híbrida (plantas e corte)

O monitoramento do experimento em campo, incluindo o período inicial de partida, durou aproximadamente 6 meses consecutivos.

Após a conclusão dos serviços de Engenharia para construção do experimento, transcorridos entre 20/10/2014 e 11/11/2014, deu-se início ao período pré-operacional que durou 76 dias, de 12/11/2014 a 27/01/2015.

A vazão média de projeto, de 640 L/dia ou 27 L/h, foi aplicada em regime contínuo durante 37 dias consecutivos, de 27/01/2015 a 05/03/2015.

Para avaliar a flexibilidade operacional do sistema proposto em períodos de sobrecarga, situação possível especialmente em unidades habitacionais litorâneas, turísticas e de veraneio, e em municípios de médio e grande portes, a vazão de esgotos foi elevada até um valor máximo ou de pico de 1.600 L/dia, aproximadamente 70 L/h (2,6 vezes superior à vazão média), e aplicada em regime contínuo durante 60 dias, de 05/03/2015 a 04/05/2015 (Quadro 2).

As populações (ou equivalente populacional) usadas na estimativa das vazões média e máxima de projeto do sistema foram, respectivamente, de 4 e 10 usuários, considerando-se a contribuição *per capita* de esgoto gerado em uma residência de alto padrão (ABNT, 1993), e de 7 e 16 usuários, considerando-se a contribuição de uma residência de baixo padrão (ABNT, 1993). O padrão de ocupação característico de unidades habitacionais no Brasil é de 3 a 3,5 habitantes por domicílio (IBGE, 2011).

Quadro 2. Parâmetros de projeto, características hidráulicas e condições operacionais da WC Híbrida

Parâmetros de Projeto, Características Hidráulicas e Condições Operacionais	Vazão média (Q_m)	Vazão máxima de pico ($Q_{máx}$)
Regime de alimentação	Contínuo	Contínuo
Relação A_s /Vazão (Q)	11,25 m ² / m ³ × dia	4,5 m ² / m ³ × dia
Relação A_s /habitante	1,8 m ² / hab.	0,72 m ² / hab.
Taxa de carregamento hidráulico ou taxa de aplicação hidráulica superficial (TCH)	89 mm/dia	222 mm/dia
Taxa de carregamento orgânico superficial (TCO)	18,7 g DBO ₅ / m ² ×dia 187 Kg DBO ₅ / ha×dia	46,7 g DBO ₅ / m ² ×dia 467 Kg DBO ₅ / ha×dia
Tempo de detenção hidráulica na WCFV (TDH _{FV})	1,8 dias ≈ 43,5 h	0,7 dia ≈ 17,4h
Tempo de detenção hidráulica na WCFH (TDH _{FH})	1 dia = 24 h	0,4 dia = 9,6 h
Tempo de detenção hidráulica total na WC Híbrida	2,8 dias = 67,5 h	1,1 dias = 27 h

Para a caracterização qualitativa do esgoto bruto e dos efluentes do TS, da WCFV e da WCFH, foram concebidos e instalados 4 pontos de amostragem (Figura 2): [P1] Esgoto bruto = Entrada TS (item a); [P2] Saída TS = Entrada WCFV (item b); [P3]: Saída WCFV = Entrada WCFH (item c); [P4]: Efluente tratado final = Saída WCFH (item d).

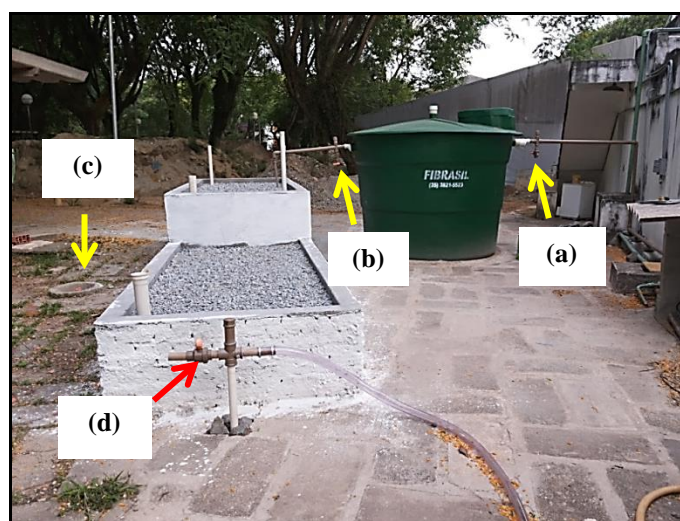


Figura 2. Pontos de amostragem e coleta de esgoto

O planejamento e as atividades de coleta, preservação e armazenamento das amostras de águas residuárias foram baseados no “Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos”, publicado em 2011 pela Agência Nacional de Águas – ANA. As análises foram realizadas nos laboratórios da sede da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, em São Paulo/SP.

Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos quantificados e avaliados foram os seguintes: temperatura do ar, temperatura do líquido, pH, OD, turbidez, cor verdadeira, DBO_{5,20}, DQO, ST, SV, SST, SSV, SDT, SDV, sólidos sedimentáveis, N-NTK, N-NH₃, N-NO₂, N-NO₃, P-total, P-PO₄, óleos e graxas totais, sulfato, sulfeto, alcalinidade, acidez a frio, odor, coliformes termotolerantes, *Escherichia Coli*, enterovírus, *Giardia sp*, *Cryptosporidium sp* e *Ascaris sp*.

Foram coletadas 13 amostras semanalmente para os parâmetros físico-químicos, 12 amostras semanalmente para os parâmetros coliformes termotolerantes e *Escherichia Coli* e 3 amostras (no início, na metade e no fim do período de monitoramento) para os parâmetros enterovírus, *Giardia sp*, *Cryptosporidium sp* e *Ascaris sp* (Quadro 3).

Quadro 2. Quantidade total de amostras, frequência, tempo total, período e datas de amostragem para os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos

	Parâmetros físicos e químicos	Parâmetros microbiológicos	
		Coliformes termotolerantes e <i>Escherichia Coli</i>	Vírus, protozoários e helmintos
Quantidade Total de Amostras	13	12	3
Frequência de Amostragem	semanal	semanal	76°, 117° e 173° dias
Período de Amostragem	28/01/2015 a 29/04/2015	27/01/2015 a 04/05/2015	
Tempo Total de Amostragem	91 dias	97 dias	
Datas de Amostragem	<ul style="list-style-type: none"> • 28/01/2015 • 4, 12, 19 e 26/02/2015 • 5, 11, 18 e 25/03/2015 • 8, 15, 22 e 29/04/2015 	<ul style="list-style-type: none"> • 27/01/2015 • 3, 9 e 23/02/2015 • 2, 9, 16, 23 e 30/03/2015 • 6 e 13/04/2015 • 04/05/2015 	<ul style="list-style-type: none"> • 27/01/2015 • 09/03/2015 • 04/05/2015

Foram abordadas e investigadas as seguintes questões:

- Avaliação da capacidade da ETE experimental para remoção de matéria orgânica carbonácea, nitrogênio, sólidos, fósforo, compostos de enxofre (sulfeto e sulfato), odores, óleos e graxas, micro-organismos patogênicos (enterovírus, *Giardia sp*, *Cryptosporidium sp* e *Ascaris sp*) e micro-organismos indicadores de contaminação fecal (coliformes termotolerantes e *Escherichia Coli*), diante das vazões aplicadas (média e máxima ou de pico);
- Avaliação da qualidade do efluente tratado final da ETE experimental quanto ao atendimento às condições de lançamento e aos padrões de emissão de efluentes líquidos em corpos d'água e em sistemas públicos de esgotamento sanitário definidos na legislação ambiental federal e do Estado de São Paulo;
- Avaliação da viabilidade de uso da tecnologia de *wetlands* construídas híbridas como alternativa ao pós-tratamento de efluentes domésticos de tanques sépticos;
- Avaliação da adaptação após transplântio e do crescimento inicial das mudas e touceiras de capim Vetiver, bem como do potencial de utilização do capim Vetiver no tratamento de esgotos domésticos em *wetlands* construídas;
- Avaliação da influência da evapotranspiração e da precipitação pluviométrica locais na qualidade do efluente tratado da *wetland* construída híbrida;
- Caracterização físico-química e microbiológica do esgoto bruto usado no experimento proveniente do campus Butantã da USP em São Paulo/SP.

Foram coletadas amostras compostas no ponto P1 e amostras simples nos pontos de amostragem P2, P3 e P4 para os parâmetros físicos e químicos, exceto para óleos e graxas totais e sulfeto, cujas amostras coletadas nos pontos P1, P2 e P4 foram simples.

Para os parâmetros microbiológicos, foram coletadas amostras simples nos pontos de amostragem P1, P2 e P4, exceto para o parâmetro enterovírus, cujas amostras simples foram coletadas somente nos pontos P1 e P4.

Semelhante à metodologia utilizada por VALENTIM (2003), para identificar os comprimentos médios, mínimos e máximos das mudas e touceiras de capim Vetiver em cada câmara, bem como a taxa média de crescimento das mudas e touceiras em cada leito filtrante, foram selecionadas e medidas aos 71 e 145 dias após o primeiro transplântio, com auxílio de uma trena metálica graduada, respectivamente, 23 mudas e duas touceiras transplantadas à WCFV e 24 mudas e uma touceira transplantadas à WCFH.

Para a avaliação da possível interferência da evapotranspiração na caracterização da qualidade do efluente final tratado da WC Híbrida, adotou-se como referência a medição nos dias de amostragem, de 19/02/2015 a 04/05/2015, da quantidade de água potável evaporada no interior de duas provetas graduadas de polipropileno de volume 1L mantidas próximas ao experimento, expostas às condições ambientais semelhantes às aquelas atuantes na WC Híbrida (temperatura do ar, umidade do ar, insolação).

RESULTADOS E ANÁLISE

O esgoto bruto apresentou características de esgoto sanitário, predominantemente doméstico, de média concentração, e boa condição de biodegradabilidade. Foram observadas elevadas concentrações de matéria orgânica carbonácea em termos de $DBO_{5,20}$, de nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e cloretos; valores em torno da média em termos de DQO, nitrogênio orgânico, fósforo total, fósforo inorgânico, sólidos dissolvidos, óleos e graxas totais, sulfato, alcalinidade, pH, temperatura, coliformes termotolerantes, *Escherichia Coli* e *Giardia sp* e valores abaixo da média em termos de fósforo orgânico, sólidos em suspensão e sólidos sedimentáveis, *Cryptosporidium sp*, *Ascaris sp* e enterovírus.

As unidades constituintes do sistema experimental operaram sob temperaturas próximas às ideais, com média de 24,3°C, favorecendo o crescimento e a reprodução dos micro-organismos atuantes nos processos biológicos de tratamento (JORDÃO e PESSOA, 2005; VON SPERLING, 2007; CAVALCANTI, 2012).

A análise e comparação dos resultados do balanço hídrico permitem deduzir que a perda de água por evapotranspiração (205,7 mm) e o ganho de água pela precipitação (261 mm) não foram suficientes para provocar distorções na caracterização da qualidade do efluente tratado da WC Híbrida por meio da quantificação das concentrações de remoção de poluentes.

Durante o período de monitoramento, não foi constatada a colmatção dos leitos filtrantes de nenhuma das câmaras da WC Híbrida.

Tanto as mudas jovens quanto as touceiras adultas de capim Vetiver adaptaram-se bem à exposição e ao contato com o esgoto e às condições ambientais presentes após o transplântio em ambas câmaras da WC Híbrida, apresentando desenvolvimento e crescimento rápidos (com crescimento ligeiramente superior na WCFV) mesmo diante das oscilações pluviométricas e de temperatura observadas no local do experimento (Figura 3).

Durante o período total de monitoramento das macrófitas aquáticas, de 145 dias, o índice de mortalidade de mudas foi de aproximadamente 25%. A quantidade de mudas mortas ou sem broto verde em cada câmara foi praticamente igual nas duas medições. Todas as mudas e touceiras, independentemente do comprimento atingido, apresentavam tecidos aéreos (colmos) resistentes e eretos.

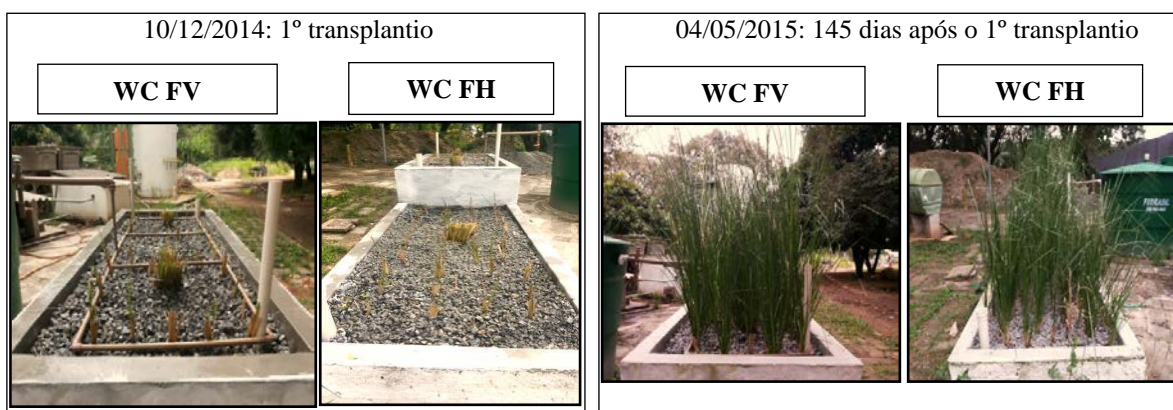


Figura 3. Desenvolvimento e crescimento das mudas e touceiras de capim Vetiver

Considerando-se as mudas, o crescimento médio mensal e os comprimentos médio, mínimo e máximo foram, respectivamente, de 22 cm/mês, 124 cm, 45 cm e 200 cm na WCFV, e de 20 cm/mês, 111 cm, 80 cm e 145 cm na WCFH. Considerando-se as touceiras adultas, o crescimento médio mensal e o comprimento médio foram, respectivamente, de 30 cm/mês e 160 cm na WCFV, e de 26 cm/mês e 140 cm na WCFH.

A presença de insetos sobrevoando os leitos filtrantes foi imperceptível, sem gerar incômodo aos frequentadores do local. Também não foram encontrados animais rasteiros, como roedores e anfíbios. A manutenção da frequência de irrigação das mudas e touceiras no período inicial de trato após transplântio foi o único procedimento de manejo necessário ao longo do monitoramento. Possíveis pragas não foram constatadas

ou não foram capazes de prejudicar o desenvolvimento das plantas aquáticas. O tempo médio para formação e início do amadurecimento das mudas jovens do capim Vetiver foi de aproximadamente 71 dias, sendo que as touceiras adultas precisaram de menor tempo para readaptação e retomada do crescimento após o transplante. Os mecanismos de reprodução exclusivamente através de mudas e de crescimento dos tecidos aéreos superficiais das macrófitas aquáticas para os lados permitem a formação de uma barreira vegetal viva e possibilitam a valorização estética do sistema de tratamento, caso esse aspecto seja considerado na concepção e projeto do mesmo.

O sistema experimental apresentou remoção de matéria orgânica carbonácea elevada, com eficiências médias de 96% e 90% em termos de DBO_{5,20} e DQO, respectivamente, sob aplicação da vazão média de projeto. As concentrações no efluente tratado alcançaram valores mínimos de 8 mg O₂/L e 30 mg O₂/L para DBO_{5,20} e DQO, respectivamente. Quanto à DBO_{5,20}, o desempenho obtido no experimento foi igual ou superior ao relatado em CALIJURI e col. (2009), de 80%, DORNELAS e col. (2008), de 63%, PLATZER e col. (2007), de 88%, e VAN KAICK e col. (2008), entre 77% e 97%. Quanto à DQO, a eficiência média, sob aplicação da vazão média, foi ligeiramente superior à relatada em SILVA (2013), de 87%.

A manutenção do pH próximo à neutralidade, variando entre 6,4 e 7,5, assim como observado por ANDRADE (2012), os baixos e constantes valores de acidez (inferiores a 2 mg/L), e a preservação de elevados valores de alcalinidade nos efluentes do TS e da WC Híbrida, entre 244 mg CaCO₃/L e 415 mg CaCO₃/L, indicam boas condições de tamponamento da solução aquosa. A redução da alcalinidade na WCFV pode ter sido consequência, entre outros fatores, da nitrificação biológica parcial nesta câmara, tendência também observada por CANO (2014). A produção de alcalinidade na WCFH pode ter sido decorrente da desnitrificação biológica parcial nesta câmara.

A indisponibilidade de OD no interior do leito filtrante da WCFV pode indicar que o mesmo tenha sido prontamente consumido pela biomassa microbiana em seus processos metabólicos de oxidação biológica da matéria orgânica. Na WCFH, o meio ambiente manteve-se predominantemente anaeróbico.

A remoção de nitrogênio total não foi elevada, porém ficou dentro das expectativas, com média de 40% sob aplicação da vazão média, e concentrações no efluente tratado variando entre 30 mg N/L e 65 mg N/L. O mesmo comportamento foi constatado por ANDRADE e PINTO (2013) com eficiência média de 33% quanto à remoção de nitrogênio em um experimento com uma *wetland* construída de fluxo vertical afogado, com meio filtrante de brita e areia, tratando o efluente de um tanque séptico em uma comunidade rural no Estado do Paraná.

Cerca de 80% da fração orgânica da matéria nitrogenada presente no esgoto bruto foi removida. O melhor desempenho quanto à remoção de nitrogênio total foi constatado na WC Híbrida, e quanto a sua parcela amoniacal, na WCFV, ambos durante o período de aplicação de vazão média. Apesar de parciais, observaram-se indícios da ocorrência da nitrificação biológica na WCFV (limitada pela baixa concentração de OD) e da desnitrificação biológica na WCFH.

As eficiências médias alcançadas quanto à remoção de fósforo total, de 60%, e de sua parcela inorgânica, P-PO₄, de 52%, foram significativas, principalmente sob aplicação da vazão média, com concentrações de P-total no efluente tratado variando entre 1 mg P/L e 9,5 mg P/L. Durante a aplicação da vazão média, a eficiência média de remoção de P-total foi ligeiramente superior à verificada por CALIJURI e col. (2009), de 52%, DORNELAS e col. (2008), de 44%, e BITAR e col. (2009), de 42%.

Sob vazão máxima (TDH = 27 h), a eficiência média de remoção de P-total, apesar de menor do que em relação ao período de vazão média, também foi relevante, considerando-se ter sido idêntica aos melhores resultados observados por VALENTIM (2003) em uma *wetland* construída de formato quadrado cultivada com *Typha sp*, porém com TDH de 6 dias, muito mais elevado que o adotado no presente experimento, e praticamente igual à média constatada por ZANELA (2008), de 27%.

Quanto à remoção de P-PO₄, a eficiência média foi superior às relatadas por OLIJNYK e col. (2007), de 40% e 42%, obtidas em duas *wetlands* construídas de fluxo horizontal subsuperficial em escala real implantadas em municípios de pequeno porte no interior (Videira) e no litoral (Camboriú) do Estado de Santa Catarina, usadas para tratamento de efluentes de tanques sépticos, e à obtida por ANDRADE (2012), de 46%, em uma *wetland*

construída com fluxo afogado, e de 41%, em uma *wetland* construída com fluxo livre. O bom desempenho obtido na presente ETE experimental quanto à remoção de fósforo deveu-se quase que exclusivamente à WC Híbrida, provavelmente pela presença do meio filtrante de brita e do capim Vetiver.

Considerou-se relevante o desempenho da ETE experimental quanto à remoção de materiais flutuantes e resíduos sólidos objetáveis e das diversas formas de apresentação de sólidos no esgoto, principalmente SST (remoção média de 74% e concentração mínima no efluente tratado de 10 mg/L), SSV (remoção média de 96%) e sólidos sedimentáveis (remoção média de 75% e concentração mínima no efluente tratado de 0,1 mg/L em ambas câmaras da WC Híbrida) (ver Figura 4).

O desempenho médio global obtido no experimento quanto à remoção de SST e sólidos sedimentáveis, operando sob as vazões média e máxima de projeto, foi igual ou superior a de sistemas convencionais usuais de pequeno porte que empregam o filtro biológico anaeróbio de leito fixo e fluxo ascendente como pós-tratamento de efluentes de tanque séptico, cujas eficiências típicas quanto aos SST e sólidos sedimentáveis são, respectivamente, de 60% a 90% e superior a 70%, com concentrações de SST na faixa de 30 mg/L a 60 mg/L (ABNT, 1997; VON SPERLING, 2005), bem como de alguns experimentos realizados no Brasil como o de CALIJURI e col. (2009), com eficiência de 70% quanto a SST, VALENTIM (2003), com eficiência de 60,5%, e OLIJNYK e col. (2007), com eficiência de 57%, este em uma *wetland* construída de fluxo horizontal subsuperficial em escala real implantada para tratamento do efluente de tanques sépticos em São Joaquim, município de pequeno porte no interior de Santa Catarina.

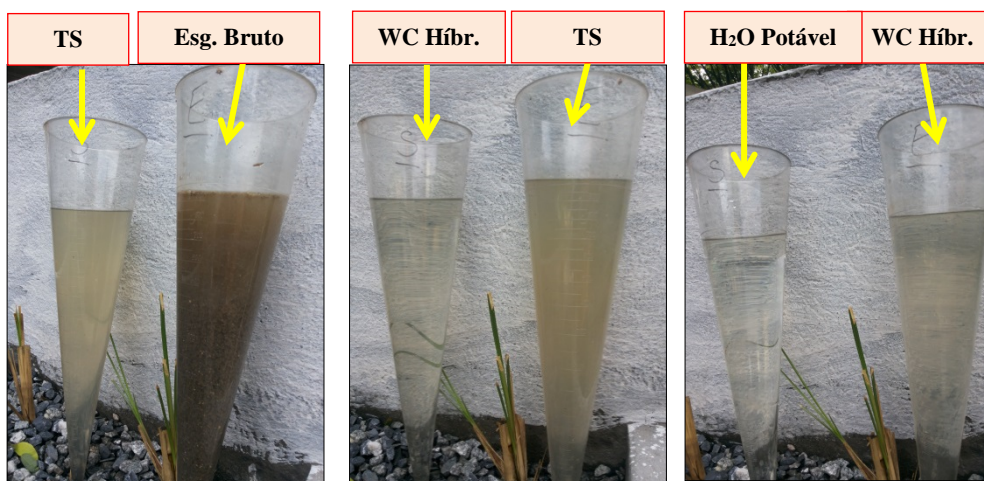


Figura 1. Comparação visual da qualidade do esgoto bruto e dos efluentes do TS e da WC Híbrida

A concentração da fração volátil total (SV) dos ST apresentou redução média de 69%, sugerindo a predominância de boas condições ambientais para a biodegradação da matéria orgânica. A diminuição da concentração de SDV no efluente de cada uma das unidades da ETE experimental (remoção média de 44%) e a obtenção de concentrações de SDT em todas as amostras do efluente tratado final da ETE inferiores aos padrões de qualidade mais restritivos dos corpos d'água, de 500 mg/L, indicam a viabilidade de remoção, mesmo que parcial e limitada, de sólidos dissolvidos em *wetlands* construídas híbridas com leito filtrante composto por brita N°1.

A eficiência na remoção de sulfetos na ETE experimental, especialmente na WC Híbrida, com média de 88% e concentração mínima no efluente tratado de 0,3 mg S/L, propiciou a geração de efluente tratado sem odores desagradáveis característicos de sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos, indicando boa capacidade da WC Híbrida testada para esse fim.

A concentração máxima de sulfato no efluente da ETE, de 117 mg SO₄/L, atende aos padrões de qualidade de corpos d'água definidos na legislação ambiental federal (concentração inferior a 250 mg SO₄/L).

O desempenho da ETE experimental quanto à remoção de óleos e graxas totais foi alto, mesmo em situações de elevada carga afluente, com a eficiência variando entre 73% e 100% e a concentração no efluente tratado compreendida entre zero e 17 mg/L, indicando a robustez do sistema estudado, com resultados melhores que os alcançadas em 3 *wetlands* construídas em escala real tratando esgotos domésticos de uma comunidade na província de Edirne na Turquia, monitoradas por ÇAKIR e col. (2015), de 62,1% e 74,5%, testadas sob taxas de aplicação hidráulica superficial menores (75 mm/dia e 125 mm/dia) e TDH maiores (3,7 dias e 2,2 dias) que os respectivos parâmetros aplicados no presente estudo.

As remoções dos micro-organismos indicadores de contaminação fecal foram relevantes, especialmente durante o período de aplicação de vazão média. Sob vazão média, para o parâmetro coliformes termotolerantes, a remoção média foi de 99,6%, com redução média entre 2 e 3 unidades log, redução máxima de 4 unidades log e concentrações no efluente tratado variando entre 400 UFC/100mL e 9×10^5 UFC/100mL.

A eficiência máxima obtida no sistema experimental estudado quanto à remoção de coliformes termotolerantes (4 unidades log e 99,995%) foi semelhante às alcançadas nos experimentos de SEZERINO e PHILIPPI (2000) e SOUZA e col. (2000), de 4 unidades log, e pouco superior à obtida por ALMEIDA RA e ALMEIDA NAM (2005), de 99,5%, por ANDRADE e PINTO (2013), de 98%, e por SMITH e col. (2005), este implantado no Canadá, de 99,7%.

Com relação à *Escherichia Coli*, a eficiência média durante o período de aplicação da vazão média também foi de 99,6%, próxima à obtida por PY-DANIEL e col. (2013), de 99,8%, e acima da verificada por VALENTIM (1999), entre 94% e 97%, e BORGES e col. (2002), de 95%. As reduções médias situaram-se entre 1 e 3 unidades log, semelhantes às obtidas por OLIJNYK e col. (2007) e LANA e col. (2013), com remoção de 1 a 2 unidades log. A redução máxima foi de 4 unidades log e as concentrações no efluente tratado variaram entre 280 UFC/100mL e $7,2 \times 10^5$ UFC/100mL.

A filtração proporcionada pela presença do meio filtrante de brita e das raízes e rizomas do capim Vetiver pode ter contribuído para evitar maiores oscilações no desempenho da WC Híbrida durante o período de vazão máxima (sobrecarga) com relação à remoção dos micro-organismos indicadores de contaminação fecal.

As concentrações médias de *Giardia sp* e *Cryptosporidium sp* no efluente tratado final da ETE experimental foram, respectivamente, de 0,05 cistos/L e 0,05 oocistos/L, com eficiências médias de 99,995% e 98,7%, iguais ou superiores às obtidas em 5 *wetlands* construídas com fluxo subsuperficial horizontal, com leito filtrante de cascalho, macrófitas dos gêneros *Typha* e *Scirpus* e unidades de controle sem plantas, implantadas nos EUA, Estado do Arizona, operadas com tempos de detenção hidráulica situados entre 3,3 e 16,7 dias e taxas de carregamento hidráulico de 36 a 59 mm/dia, cujas remoções de *Cryptosporidium sp* e *Giardia sp* variaram, respectivamente, entre 79% a 100% e entre 95% a 100% (KADLEC, 2009).

A concentração média de enterovírus no efluente tratado final foi baixa, de 0,043 UFP/L, com a eficiência média de 99,6% situando-se muito próxima ao valor mínimo obtido na amostra em que se obteve eficiência máxima, de 99,8%, indicando a estabilidade do sistema. O desempenho da WC Híbrida testada atingiu resultados semelhantes a de *wetlands* construídas com fluxo superficial recebendo efluente não desinfestado, de 1 a 2 unidades log, relatados por JASPER e col. (2013) e ficou dentro da faixa de variação medida em pesquisas em locais variados nos EUA que apontam remoções superiores a 90% (KADLEC, 2009).

A concentração média de *Ascaris sp* no efluente tratado final também foi baixa, atingindo o valor do limite inferior de quantificação do método laboratorial (0,10 ovo/L). A WC Híbrida apresentou bom potencial para redução na concentração de helmintos (o TS não influenciou na eficiência do sistema de tratamento estudado quanto à remoção desse patógeno), possivelmente superior ao de sistemas de tratamento de pequeno porte compostos por tanque séptico seguido de filtro anaeróbio, com concentração típica de helmintos no efluente tratado superior a 1 ovo/L, e dentro da faixa observada em 6 *wetlands* construídas com fluxo subsuperficial horizontal, com leito filtrante de cascalho e solo local, cultivados com macrófitas do gênero *Phragmites* e unidades de controle sem plantas, implantadas na Cidade do México, que alcançaram remoção da espécie *Ascaris* entre 67% a 100% nos leitos plantados e de 33% nos leitos não plantados (KADLEC, 2009). O desempenho da WC Híbrida quanto à remoção dos protozoários e helmintos investigados foi superior e mais estável que o do TS.

As remoções de matéria orgânica carbonácea, nitrogênio, fósforo, sólidos em suspensão, sólidos sedimentáveis, sulfetos e óleos e graxas totais apresentaram tendência de melhoria com a diminuição da vazão aplicada e com a elevação do TDH.

A recuperação e a estabilização da eficiência das unidades do sistema de tratamento diante da variação na vazão afluyente aplicada demandaram, em média, de 15 a 35 dias, em torno de duas a 5 semanas.

Ficou evidente o benefício da associação de *wetlands* construídas com fluxo vertical e horizontal no sentido de amortizar possíveis perdas momentâneas de eficiência em uma das câmaras da WC Híbrida.

O sistema experimental, mesmo sendo compacto e com dimensões reduzidas, apresentou flexibilidade operacional, mantendo bom desempenho inclusive nos períodos de sobrecarga (com aplicação de coeficiente de vazão de pico de 2,6), e mostrando capacidade para tratamento das contribuições diárias de esgotos domésticos de até 10 pessoas (considerando o consumo de água em residências de alto padrão) e de até 16 pessoas (considerando o consumo de água em residências de baixo padrão), podendo também ser modulado e expandido para tratamento de maiores vazões de esgoto.

CONCLUSÕES

O capim Vetiver apresentou-se como uma espécie de macrófita aquática emergente com bom potencial de utilização em *wetlands* construídas para tratamento de esgotos domésticos, podendo inclusive contribuir para a difusão da utilização dessa tecnologia junto às comunidades locais, pois permite a formação de uma barreira vegetal viva e possibilita a valorização estética do sistema de tratamento, caso esse aspecto seja considerado na concepção e projeto do mesmo.

A ETE experimental, mesmo sendo compacta e com dimensões reduzidas, apresentou flexibilidade operacional e bom desempenho para remoção de matéria orgânica carbonácea, nitrogênio, sólidos, fósforo, compostos de enxofre (sulfeto e sulfato), odores, óleos e graxas totais, micro-organismos patogênicos (enterovírus, *Giardia sp*, *Cryptosporidium sp* e *Ascaris sp*) e micro-organismos indicadores de contaminação fecal (coliformes termotolerantes e *Escherichia Coli*), inclusive nos períodos de sobrecarga.

A qualidade do efluente tratado final da ETE experimental, em relação aos parâmetros de interesse para esgotos sanitários aqui estudados, permite o atendimento às condições de lançamento e aos padrões de emissão de efluentes líquidos em corpos d'água e em sistemas públicos de esgotamento sanitário definidos na legislação ambiental federal e do Estado de São Paulo.

Mesmo considerando-se que a avaliação da ETE experimental foi baseada no seu desempenho durante o período inicial de operação, provavelmente antes de sua plena estabilização, foi possível constatar o potencial do sistema de tratamento testado e, principalmente, da tecnologia de *wetlands* construídas híbridas para o tratamento descentralizado de esgotos domésticos próximo às fontes geradoras, especialmente de habitações e núcleos habitacionais isolados, incluindo os de interesse social, situados em áreas periurbanas e rurais desprovidas de serviços públicos coletivos de esgotamento sanitário, inclusive em regiões com pouca disponibilidade de área livre, colocando-a como uma alternativa para o tratamento de efluentes domésticos de tanques sépticos.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Marcelo Antunes Nolasco, meu orientador no mestrado, ao Eng.º Civil Roque Passos Piveli e ao Eng.º Químico Regis Nieto, membros das bancas de qualificação do projeto de pesquisa e de defesa da dissertação. À Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, pela viabilização da possibilidade de realização das análises físico-químicas e microbiológicas em seus laboratórios e pelo empréstimo de materiais e equipamentos para uso nas campanhas de amostragem. À FINEP, pelo fornecimento de recursos financeiros para a construção e montagem da ETE experimental. Aos pesquisadores do Grupo de Pesquisa em Água, Saneamento e Sustentabilidade – GEPASS da EACH/USP, especialmente aos amigos Helisson e Vitor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7.229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro; 1993.
2. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13.969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro; 1997.
3. Almeida RA, Almeida NAM. Remoção de coliformes do esgoto por meio de espécies vegetais [periódico na internet]. Revista Eletrônica de Enfermagem. 2005 [acesso em 31 jan 2015]; 07(03): 308-318. Disponível em <URL: <http://www.revistas.ufg.br/index.php/fen>>
4. Andrade HHB de. Avaliação do desempenho de sistemas de zona de raízes (wetlands construídas) em escala piloto aplicados ao tratamento de efluente sintético. Curitiba; 2012. [Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná]
5. Andrade HHB de, Pinto FM. Zona de raízes como alternativa tecnológica para adequação de esgotos domésticos em comunidade rural de Morretes-PR [on line]. In: 1º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias; 2013 mai 9-11; Santa Catarina, Brasil. [acesso em 26 jan 2014]. Disponível em <URL: <http://www.lswbrasil.com.br/Anais1SW.pdf>>
6. Bitar AL, Tornisielo SMT, Santos AAO, Malagutti EN, Silva IM. Tratamento de efluentes de pesque-pague em sistemas construídos de áreas alagadas. HOLOS Environment, v. 9, n. 2, p. 17 – 35, Brasil, 2009.
7. Borges KP; Tauk-Tornisielo SM; Domingos RN; Angelis DF. “Tratamento de efluentes contaminados com microrganismos por wetland construído”. Proceedings: X Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, APESB, Braga/Portugal, 16 a 19 de set. de 2002, T2-2.2_266, CD-ROM.
8. Calijuri ML, Bastos RXX, Magalhães TB, Capelete BC, Dias EHO. Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/wetlands construídas de fluxo horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. Engenharia Sanitária Ambiente, v. 14, n.3, p. 421 – 430, Brasil, 2009.
9. Cano V. Estratégias de tratamento de lixiviado de aterro sanitário com foco na matéria orgânica biodegradável e nitrogênio amoniacal. São Paulo; 2014. [Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo]
10. Cavalcanti JEW de A. Manual de tratamento de efluentes industriais. 2ª ed. ampliada. São Paulo (BR): Engenho Editora Técnica Ltda; 2012.
11. Çakir R, Gidirislioglu A, Çebi U. A study on the effects of different hydraulic loading rates (HLR) on pollutant removal efficiency of subsurface horizontal-flow constructed wetlands used for treatment of domestic wastewaters. Journal of Environmental Management [on line]. 2015 [acesso em 24 nov 2015]; 164: 121-128. Disponível em: <URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.037>>
12. Dornelas LF, Machado MB, Von Sperling M. Performance of planted and unplanted subsurface-flow constructed wetlands for the post-treatment of UASB reactor effluents. In: 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, India, 2008.
13. IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico [on line]. Rio de Janeiro; 2010. [acesso em 02 mar 2014]. Disponível em: <URL: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>
14. IBGE. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. Banco de Dados Agregados: 2011. [on line]. [acesso em 13 mai 2013]. Disponível em: <URL: <http://www.sidra.ibge.gov.br/pnad/pnadpb.asp?o=3&i=P>>
15. Jasper JT, Nguyen MT, Jones ZL, Ismail NS, Sedlak DL, Sharp JO, Luthy RG, Horne AJ, Nelson KL. Unit Process Wetlands for Removal of Trace Organic Contaminants and Pathogens from Municipal Wastewater Effluents. Environmental Engineering Science 2013; 30 (8): 421-436.
16. Jordão EP, Pessôa CA. Tratamento de Esgotos Domésticos. 4ª ed. Rio de Janeiro (BR): SEGRAC; 2005.
17. Kadlec RH, Wallace SD. Treatment wetlands. 2nd ed. Boca Raton (FL): CRC Press; 2009.
18. Lana LCO, Moraes DC, Vasconcellos GR, Cota RS, Von Sperling M. Pesquisas da UFMG com sistemas de wetlands construídos de escoamento vertical: lições após cinco anos de estudos [on line]. In: 1º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias; 2013 mai 9-11; Santa Catarina, Brasil. [acesso em 31 jan 2015]. Disponível em <URL: <http://www.lswbrasil.com.br/Anais1SW.pdf>>
19. MENDONÇA, Alexandre Antonio Jacob de. Avaliação de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos em escala real composto por tanque séptico e *wetland* construída híbrida. 2016.

- Dissertação (Mestrado em Saúde Ambiental) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-25052016-122129/>>
20. Olijnyk DP, Sezerino PH, Fenelon FR, Panceri B, Philippi LS. Sistemas de tratamento de esgoto por zona de raízes: análise comparativa de sistemas instalados no estado de Santa Catarina. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2007 set 2-7; Belo Horizonte (MG). ABES.
 21. Platzer C, Senf C, Hoffman H, Cardia W, Costa RHR. Dimensionamento de wetland de fluxo vertical com nitrificação – adaptação de modelo europeu para condições climáticas do Brasil. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, ABES, 2007.
 22. Py-Daniel SS, Utumi EYK, Silva ENS, Darwich AJ. Eficiência do uso de plantas para tratamento de esgoto doméstico na zona rural de Manaus, Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Tupé, Amazonas [on line]. In: 1º Simpósio Brasileiro sobre Aplicação de Wetlands Construídos no Tratamento de Águas Residuárias; 2013 mai 9-11; Santa Catarina, Brasil. [acesso em 01 fev 2015]. Disponível em <URL: <http://www.lswbrasil.com.br/AnaisISW.pdf>>
 23. Sezerino PH; Philippi LS. “Utilização de um sistema experimental por meio de "wetland" construído no tratamento de esgotos domésticos pós tanque séptico”. Proceedings: IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Porto Seguro-BA/Brasil, 9 a 14 de abr. de 2000. III-012, CD-ROM.
 24. Silva MV. Avaliação da aplicabilidade de sistema de wetland construído híbrido no tratamento de esgoto sanitário. São Paulo; 2013. [Trabalho de graduação apresentado ao Centro Universitário SENAC – Campus Santo Amaro, como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental].
 25. Smith E, Gordon R, Madani A, Stratton G. Pathogen Removal by Agricultural Constructed Wetlands in Cold Climates [periódico na internet]. Journal of Environmental Informatics. 2005 [acesso em 30 jun 2013]; 6(1): 46-50. Disponível em <URL: <http://www.iseis.org/jei>>
 26. Souza JT, Van Haandel AC, Guimarães AAV. Post-treatment of anaerobic effluents in constructed wetland system. In: Proc. VI Latin-American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion; 2000. p. 314-320.
 27. Valentim MAA. Uso de leitos cultivados no tratamento de efluente de tanque séptico modificado [dissertação]. Campinas (SP); 1999.
 28. Valentim MAA. Desempenho de leitos cultivados (“constructed wetland”) para tratamento de esgoto: contribuições para concepção e operação [tese]. Campinas (SP); 2003.
 29. Van Kaick TS, Macedo CX, Presznuk RAO. Jardim ecológico - tratamento de esgoto por zona de raízes: análises e comparação da eficiência de uma tecnologia de saneamento apropriada e sustentável. In: VI Semana de Estudos da Engenharia Ambiental UNICENTRO, 2008, Irati. VI Semana de Estudos da Engenharia Ambiental, 2008.
 30. Von Sperling M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; 2005. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.1).
 31. Von Sperling M. Reatores anaeróbios. 2ª ed. ampliada e atualizada. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; 2007. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.5).
 32. Zanella L. Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: Wetlands-construídos utilizando brita e bambu como suporte. Tese (Doutorado) Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2008.