

Experiências de longo prazo com dimensionamento e operação de Wetlands de fluxo vertical na América do Sul

Transcrição ao português da apresentação dos autores no congresso da IWA (2016)

TÍTULO ORIGINAL: Long term experiences with dimensioning and operation of vertical flow constructed wetlands in warm climate regions of South America

Platzer, C. Rotaria do Brasil, Rua Teodoro Manoel Dias, 421, CEP 88050-540, Santo Antônio de Lisboa, Florianópolis, SC; Brasil

Hoffmann, H. heike@rotaria.net; Rotaria do Brasil, Rua Teodoro Manoel Dias, 421, CEP 88050-540, Santo Antônio de Lisboa, Florianópolis, SC; Brasil

Miglio, R.M. Universidad Agraria La Molina, UNALM, Dpto. Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible, Av. La Molina s/n La Molina, 15024 Lima, Peru

Resumo

Este artigo apresenta uma visão geral de cerca de 15 anos de experiências em dimensionamento e operação de diferentes tipos de Wetland na América do Sul. O grande potencial do Wetland construído de fluxo vertical (WCFV) é discutido com base em exigências especiais para os sistemas de tratamento em situações descentralizadas, que tipicamente se caracterizam por ampla gama de variações nas concentrações e vazões de efluentes, em um contexto de exigências elevadas para a qualidade do efluente tratado e de redução das áreas disponíveis para a construção de sistemas de tratamento. Em particular, demonstra que o modelo de dimensionamento por demanda de oxigênio para WCFV é válido para climas quentes. Como fatores máximos de dimensionamento resultam a carga orgânica < 32 g DBO₅/ m².dia e/ou a carga hidráulica <200 mm/dia. São discutidos 8 casos que foram implementados com base de este dimensionamento, sendo que 3 WCFV servem para o tratamento de águas cinzas com reutilização do efluente tratado, 4 WCFV para o tratamento de esgoto sanitário com diferentes tecnologias de tratamento primário e um Wetland baseado no “Sistema Francês” para o tratamento primário e secundário de esgoto sanitário bruto. Por fim, o documento alerta sobre a problemática de sub-dimensionamento e de concepções inadequadas da tecnologia do Wetland construído.

Palavras-chave: Estudo de caso, Wetland construído de fluxo vertical (WCFV), dimensionamento, clima quente

Introdução

A oportunidade da reutilização de efluentes tratados tem se tornado cada vez mais importante e, em certas situações, até mesmo fator chave para os investimentos em ETE especialmente em situações descentralizadas. Estas ETE atendem áreas restritas de uma cidade ou até podem ser adotadas como solução individual para condomínios, Shopping Center, fábricas, hotéis entre outros tipos de empreendimentos novos que as vezes não contam com atendimento da rede pública de esgoto. A escolha da tecnologia adequada para seu tratamento se complica pelo fato de que estes efluentes podem diferir significativamente do esgoto da rede pública (Von Sperling & Chernicharo; 2005) e mesmo assim se esperam eficiências iguais, ou superiores às das ETE centralizadas.

Os Wetlands têm-se revelado na escala internacional inúmeras vezes como tecnologia adequada para o tratamento de águas residuais em situações descentralizadas (Langergräber, 2013). Os sistemas usam os processos naturais da degradação de matéria orgânica com a filtração biologicamente ativa no meio filtrante, possibilitando um processo de alta eficiência, mesmo em caso de grandes variações na concentração e vazão de esgoto e sem provocar elevados custos para a operação.

Por outro lado, os projetos de Wetlands exigem conhecimento e experiência profissional. Pôde ser observado, inclusive no Brasil, um crescente número de projetos que carecem deste conhecimento. Erros típicos incluem: i) superfície criticamente pequena em relação à carga do efluente, ii) problemas no projeto hidráulico, incluindo a forma de distribuição do efluente, a via de filtração e a forma de coleta do efluente tratado na drenagem, iii) material filtrante inadequado, fino ou grosso demais ou não suficientemente uniforme; iv) tratamento preliminar não responde ao tipo de efluente ou à capacidade do filtro plantado; vi) promessa de eficiências incumpríveis com a tecnologia projetada.

Desta forma, este conjunto de erros pode contribuir para um descrédito dos wetlands, assim como ocorrido durante o desenvolvimento e introdução desta tecnologia no mercado Europeu, dos anos 80 a 90, quando os problemas foram finalmente superados pela pesquisa aplicada e disseminação de experiências práticas. Neste contexto, a finalidade deste trabalho é compartilhar conhecimentos e aplicações de longo prazo em relação ao projeto e à operação de Wetlands em climas quentes. O artigo tem como enfoque o Wetland construído de escoamento sub-superficial e fluxo vertical (WCFV), principalmente devido a sua menor exigência de área de construção e maior potencial de eficiência em comparação ao Wetland construído de fluxo horizontal (WCFH), características estas que representam os argumentos mais importantes para um investimento em ETE descentralizadas ou individuais, especialmente em situações urbanas.

1. Abordagem de projeto para o Wetland em climas quentes

Os Wetlands construídos de fluxo vertical (WCFV) apresentados neste trabalho utilizam como material filtrante uma areia grossa e que seja o mais uniforme possível. Os dimensionamentos são baseados no modelo de balanço de oxigênio desenvolvido por Platzer (1999) e, no que concerne a sua adaptação às condições de clima quente, em Platzer et al. (2007). O modelo relaciona o fornecimento (oferta) de oxigênio pelo filtro com a demanda de oxigênio pelos processos aeróbicos da degradação da matéria orgânica do esgoto, principalmente pela oxidação de DQO/DBO e o processo da nitrificação. O processo da desnitrificação, que pode ocorrer até certo nível nas zonas anóxicas do filtro (por exemplo: zonas saturadas com água), diminuirá a necessidade de oxigênio, de acordo com:

$$1. \quad \text{Demanda } O_2 \text{ total} = \text{Demanda } O_2 \text{ Oxidação (DQO + Amônio)} - \text{Recuperação de } O_2 \text{ Desnitrificação}$$

A oferta de oxigênio no WCFV é possível devido aos processos de convecção e difusão, enquanto a contribuição de plantas é comparativamente pequena (Platzer 1999).

- **A convecção** somente se aplica ao WCFV, estando relacionada à entrada de ar que acompanha a infiltração do esgoto no filtro depois de sua distribuição pela superfície. O volume de ar depende da frequência e do volume de alimentações do esgoto.
- **A difusão** existe em todos os Wetlands e acontece continuamente pela sua superfície, se diminua quando o efluente fica acumulado na superfície. No WCFV, por exemplo, são realizadas de 4 a 8 alimentações de 10-30 min por dia.

$$2. \quad \text{Oferta } O_2 \text{ total} = \text{Entrada } O_2 \text{ CONVECÇÃO} + \text{Entrada } O_2 \text{ DIFUSÃO}$$

Para o dimensionamento da superfície do Wetland, a oferta de oxigênio deve ser igual ou superior a sua demanda pelos processos da degradação:

$$3. \quad 0 \leq \text{Oferta } O_2 \text{ total} - \text{Demanda } O_2 \text{ total}$$

O processo da convecção representa o instrumento chave para o dimensionamento de WCFV. A oxigenação nos Wetlands construídos de fluxo horizontal (WCFH) somente acontece por difusão e por isso são necessárias superfícies comparativamente grandes e, mesmo assim, sua oxigenação fica limitada; não alcançam, por exemplo, uma nitrificação relevante e em contrapartida são capazes, em certas condições, de realizar a desnitrificação (Platzer 1999).

Em relação ao modelo de balanço de oxigênio para o dimensionamento de Wetland construído de fluxo vertical, Platzer (1999) demonstrou para o clima frio a necessidade de uma superfície de 3 a 4 vezes maior em relação a área necessária para o abastecimento do filtro com oxigênio. Neste caso, o risco de colmatação determina as dimensões para prevenir a obstrução dos poros por elevada acumulação de biomassa e sólidos. Este risco é maior nas temperaturas baixas devido à lentidão no processo de degradação.

No clima quente, a aplicação do modelo de balanço de oxigênio apresentou um resultado diferente: Platzer et al. (2007) operaram sob condições quentes do Brasil (SC, Grande Florianópolis) um Wetland piloto com superfície de 4,44 m² e filtro de areia grossa ($d_{10} = 0,3$ mm, $d_{60} = 1,5$ mm, $U = 4,83$, $k_f = 9 \times 10^{-4}$ m/s) de 80 cm profundidade. O piloto foi alimentado durante 8 meses, 4 vezes/dia (cada 6 horas), com esgoto pré-tratado na fossa séptica. A pesquisa foi dividida em duas fases com cargas crescentes:

Fase 1: 28 g DBO₅/m².d; 146 l/m².d (387 mg DQO/L, 189 mg DBO₅/L, 72 mg NTK/L)

Fase 2: 35 g DBO₅/m².d; 205 l/m².d (357 mg DQO/L, 170 mg DBO₅/L, 57 mg NTK/L)

A Figura 1 apresenta a variabilidade na concentração de DBO, DQO, Alcalinidade e NTK de esgoto afluente nos primeiros 4 meses. A Figura 2 ilustra a redução de DBO, Amônio, Alcalinidade e Nitrato ao longo do tempo, resulta que:

- A DQO foi removida, em ambas as fases, em 78-79%. A eficiência da remoção de DBO₅ foi maior na fase 2 (92% em relação a 85% na fase 1).
- A nitrificação também foi maior na fase 2 (89% em relação a 84% na fase 1). Por outro lado, as concentrações ligeiramente elevadas de Amônio no efluente final (1. fase 7,6 mg NH₄-N/L e 2. fase 5,4 mg de NH₄-N/L) indicam certa limitação da oferta de oxigênio.
- A alcalinidade está sendo reduzida principalmente pelo processo da nitrificação (Hoffmann et al. 2007) e, como resultado, o pH decaiu durante a segunda fase a um valor de 4,2. Observa-se que a queda de pH no filtro de areia não reduziu a eficiência dos processos.

Com base nestes resultados, foi aplicado o modelo de balanço de oxigênio utilizando-se os seguintes fatores (Platzer, 1999):

- **DBO₅:** 1,2 g de O₂ por g de DBO₅;
- **Nitrificação:** 4,3 g de O₂ por g de NTK
- **Convecção:** 300 mg de O₂ por litro de ar que entra após cada litro de efluente
- **Difusão:** 1g de O₂/m² . h durante 22 h/dia (2 h/d os poros permaneçam fechados por causa de alimentação da superfície com esgoto)

A Tabela 1 compara, para as fases 1 e 2 de WCFV piloto, a oferta de oxigênio pelo sistema com i) a demanda teórica de oxigênio para a oxidação total (100%) de DBO₅ e de Amônio (pela nitrificação completa) e ii) o consumo real de oxigênio de acordo com as concentrações de DQO e Amônio restante no efluente final e, para i) e ii), considerando a recuperação de oxigênio pela desnitrificação parcial.

Os resultados comprovam que o uso de oxigênio pelos processos reais combinou perfeitamente com a oferta de oxigênio calculada pelo modelo, mas para completar especialmente a nitrificação a demanda total de oxigênio seria um pouco maior

Fase 1: oferta 292,7 g O₂/dia e demanda_{real} 292,2 g O₂/dia; demanda_{total} 332,9 g O₂/L

Fase 2: oferta 370,7 g O₂/dia e demanda_{real} 370,0 g O₂/dia; demanda_{total} 405,0 g O₂/L

Isto significa que pelo modelo de balanço de oxigênio o WCFV piloto foi operado no limite da carga possível, mas sem nenhuma ocorrência de colmatação. Vale ressaltar que esta situação seguiu por 4 meses sem amostragem sistemática.

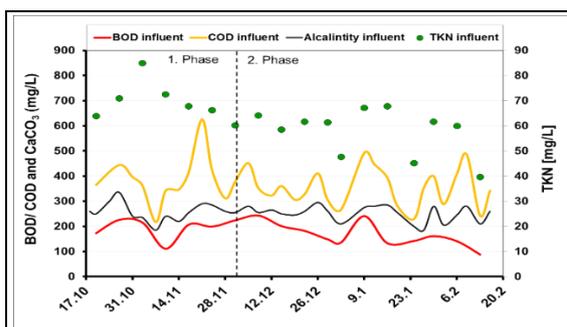


Figura 1: Concentração de afluente na planta.

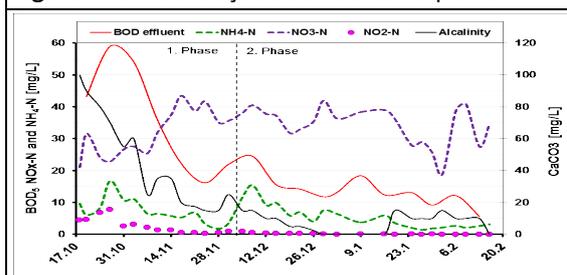


Figura 2: Concentração de efluente na planta

CÁLCULO	FASE 1 (g O ₂ /L)	FASE 2 (g O ₂ /L)
Calculo da oferta de oxigênio pelo sistema piloto		
Oferta REAL O ₂ CONVECÇÃO	195,0	273,0
Oferta REAL O ₂ DIFUSÃO	97,7	97,7
Resultado: Oferta TOTAL O₂	292,7	370,7
Calculo da demanda de oxigênio para oxidação completa		
Necessidade O ₂ DQO Oxidação teórica total	161,5	199,4
Necessidade O ₂ NTK Oxidação teórica total	171,3	225,4
Recuperação O ₂ Desnitrificação real	0	19,8
Resultado: 1. Necessidade TOTAL O₂	332,8	405,0
Calculo do uso real de sistema pelos processos realizados		
Uso O ₂ Oxidação real de DQO	145,2	186,3
Uso O ₂ Oxidação real de NTK	147,0	203,5
Recuperação O ₂ Desnitrificação real	0	19,8
Resultado: 2. Necessidade REAL O₂	292,2	370,0

Tabela 1: Oferta e demanda de oxigênio

Fonte de resultados: Platzer et al., 2007

Conclusões para os projetos: Platzer et al. (2007) concluíram para o dimensionamento de WCFV no clima quente a carga máxima de 32 g DBO₅/ m².dia. Nas mesmas condições climáticas, mas ainda considerando uma nitrificação completa, Sezerino (2006) recomendou cargas máximas de 41 g DQO /m².dia e 15 g SST /m².dia.

2. Abordagem das características de esgoto para ETE descentralizadas

A Figura 1 representou concentrações de esgoto doméstico de uma área residencial, este piloto foi operado no by-pass de uma ETE, ou seja, sua vazão diária permaneceu constante. As Figuras 3 a 6 representam características de efluentes gerados por empreendimentos, os quais apresentam situações típicas em que a instalação de um WCFV pode ser uma opção.

Qualidade/concentração: Os afluentes das Figuras 1, 3 e 4 foram analisados depois de pré-tratamento (fossa séptica ou caixa de gordura). O esgoto de um shopping (Figura 3) é caracterizado por altas e variadas concentrações de DBO₅, DQO, Amônio e Fósforo. Em comparação, o esgoto sem contribuição de restaurantes (Figura 4) tem tipicamente pouca matéria orgânica e concentrações elevadas de amônio e fósforo. Alta concentração de matéria orgânica é causada principalmente por gordura e resíduos de cozinha, enquanto elevadas concentrações de amônia e fósforo indicam alta contribuição de urina (banheiros). A concentração média (tabela 2) entre os 3 tipos de esgoto difere por fator 2,5 a 3 (Fósforo e Amônio-N) ao fator 20 (DBO₅ /DQO).

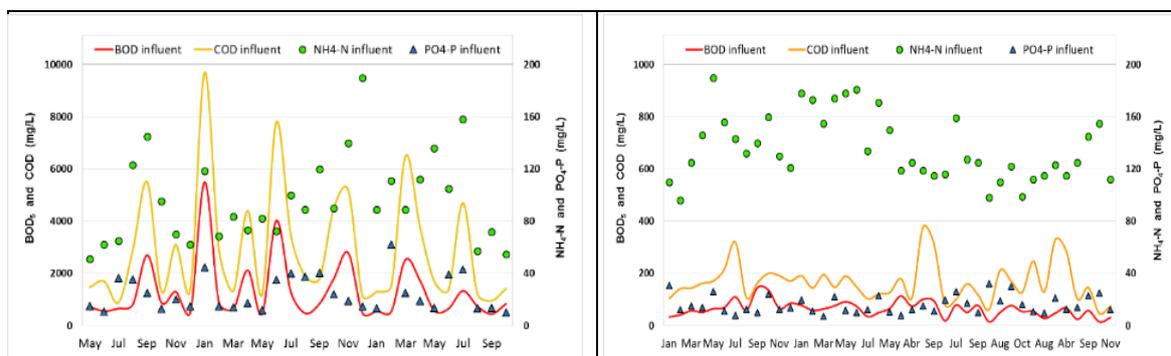


Figura 3: Composição de esgoto de um Shopping (banheiros e praça de alimentação)

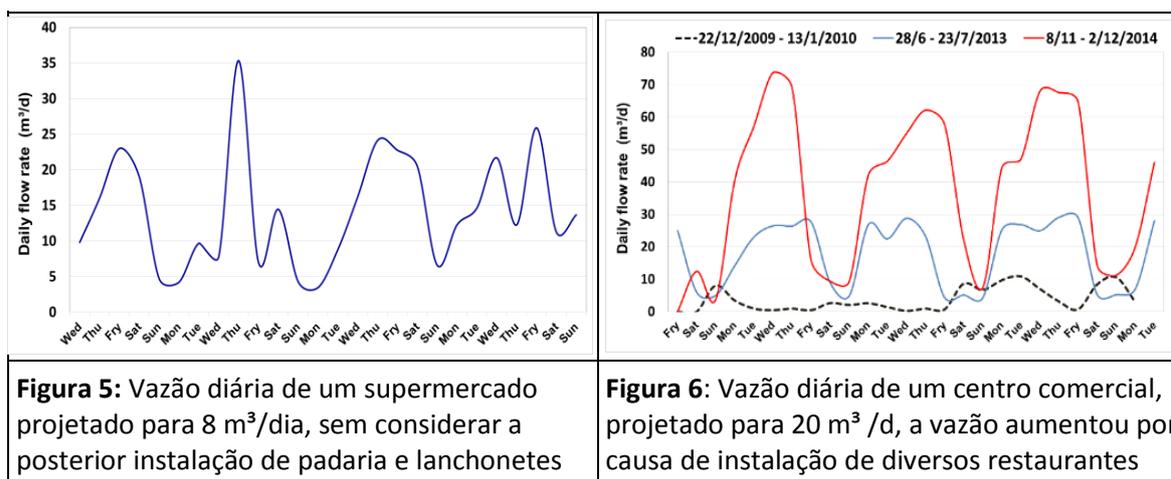
Figura 4: Composição de esgoto de uma fábrica (banheiros, chuveiros, sem próprio restaurante)

Tabela 2: Concentrações médias de esgotos (afluente ETE) das figuras 1, 3 e 4

	DBO ₅ (mgO ₂ /L)	DQO (mgO ₂ /L)	Amônio (mg N/L)	Fósforo (mg P/L)
Área residencial	176	367	48	10
Shopping	1.250	3.000	90	24
Fabrica	65	160	140	16

Quantidade/vazão: A vazão difere muito já nas áreas residenciais e ainda mais nas áreas comerciais (Figuras 5, 6), isto em função de: i) diferentes atividades relacionadas ao consumo de água durante o dia e ii) durante os dias da semana; iii) influência de férias e estações do ano. Um problema adicional representa o aumento da vazão por atividades que ainda não eram planejadas no projeto (figuras 5 e 6) e que, muitas vezes, tem como

consequência também o aumento da concentração do esgoto. No caso da figura 6, por exemplo, a carga de DBO₅ entre 2009 e 2014 aumentou em 400% (compare o estudo de caso ESGOTO 2).



Conclusões para os projetos: As grandes variações em situações descentralizadas na composição do esgoto, carga e vazão exigem certas considerações nos projetos para as ETE descentralizadas ou individuais em geral e os wetland em especial:

- Resultando da aplicação do modelo de balanço de oxigênio e considerando um possível aumento da carga, os projetos de WCFV apresentados foram desenhados com cargas entre 15 a 32 g DBO₅/m².d
- Diferente de tecnologias compactas (UASB, Lodo ativado), as altas cargas hidráulicas com baixa carga orgânica não reduzem a eficiência do WCFV. A consideração de carga hidráulica de 200 L/m² permite até absorver curtos picos hidráulicos maiores (Hoffmann et al 2011).
- O tratamento de efluentes com altas concentrações de amônia (Figura 4) tem o risco de queda de pH por causa da nitrificação. Diferentemente de outras tecnologias, o pH baixo não é crítico para a eficiência de um filtro de areia; por outro lado, si o pH no atende à legislação (CONAMA, 2011; MINAM 2010) a operação de WCFV com níveis elevados de água pode estabilizar o pH pelo aumento de processos anóxicos.
- Elevadas cargas orgânicas aumentam o risco de colmatação, especialmente quando efluentes de restaurantes e de processamento de alimentos contribuem ao esgoto. Nestes casos, um pré-tratamento, com retenção adequada de sólidos, de lodos e de gordura, é indispensável para uma operação sustentável de Wetland.

3. Estudo de casos

Em seguida são apresentados 8 estudos de caso de Wetland construído de fluxo vertical (WCFV), operados entre 5 a 8 anos em áreas costeiras do Peru e do sul do Brasil. De acordo indicado, os resultados foram gerados através de estudos das universidades UFSC (Brasil) e UNALM (Peru) ou no resultado do serviço da operação das estações de tratamento.

3.1 Experiências com tratamento de água cinza em WCFV

A separação de efluentes cinzas ($E_{FLCINZA}$) e seu tratamento por Wetlands é considerada como uma abordagem econômica e segura para a reutilização de efluente tratado e está sendo aplicada especialmente em regiões onde a água é escassa. Os WCFV nos 3 estudos apresentados ($E_{FLCINZA}$ 1-3) foram implantados em situações desérticas de Lima (Peru) e exclusivamente para fins da reutilização de efluente tratado.

<p>$E_{FLCINZA}$1: Escola, 70 PE (Lima, Peru 2008)</p> <p>Projeto: Tratamento de 1,5 m³/d de efluente cinza da padaria e cozinha após caixa de gordura (1m³) no WCFV de 16 m² (32 g DBO₅ /m².dia). Areia fina como material filtrante. Reuso de efluente tratado para a irrigação.</p> <p>Atual: A carga orgânica nos dias úteis é até 25% maior do que o esperado, mesmo assim o Filtro opera sem colmatação. A baixa vazão de esgoto nos fins de semana e nas férias possibilita secagem frequente da superfície.</p>						
<p>$E_{FLCINZA}$2: Albergue, 160 camas (Lima, 2011)</p> <p>Projeto: Tratamento de 6 m³/dia de efluente cinza (restaurante e lavanderia) após duas caixas de gordura (2 x 1,5 m²) em 2 WCFV de 50 m² (32g DBO₅ /m².dia).</p> <p>Atual: A carga é de 25 g de DBO₅/m².d (60% da vazão do projeto, mas a concentração de DBO₅ é 25% mais alto), apresentando excelente qualidade do efluente (tabela 3) que está sendo reutilizado (após a desinfecção) para descargas de vasos sanitários e irrigação do parque.</p>						
<p>Tabela 3: Caso $E_{FLCINZA}$2 resultados de 6 amostras mensais (amostra simples), por UNALM</p>						
	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	TSS mg/L	Turbidez NTU	Coliformes _{Total} NMP/100 ml	Colif. _{Termotoler.} NMP/100 ml
Efluente _{bruto}	390	550	132	163	9.9 x 10 ⁵	3.9 x 10 ⁵
Afluente _{Wetland}	381	516	103	144	3.9 x 10 ⁵	1.8 x 10 ⁵
Efluente _{Wetland}	10	25	2,6	3,5	2.5 x 10 ³	4.3 x 10 ²

Figure 7: Estudo de caso $E_{FLCINZA}$ 1

Figure 8: Estudo de caso $E_{FLCINZA}$ 2

Efl_{cinza3}: Área residencial Lima, Peru (2011)

Projeto; 1ª. etapa para 288 famílias, necessidade de 9 m³ água/d para irrigação de 4.350 m² área verde.

WCFV de 3 módulos, dimensionado por carga hidráulica de 150 L/m².dia (área completa 60 m²).

Água cinza coletada de chuveiros de 108 apartamentos; Tanque de sedimentação peneira; os 3 módulos ficam alimentado com sistema rotativo: cada modulo recebe durante 2 semas 6 cargas por dia e fica 1 semana no repouso.



Figura 9: Estudo de caso Efl_{cinza3}

Conclusões para tratamento de água cinza em WCFV: os efluentes cinzas são tratados com eficiência elevada e não foi observada nenhuma recusa dos usuários em relação à reutilização de efluente. Experiências demonstram que:

- De acordo reportado pelo Hernández et al. (2007), existe a tendência de superestimar o volume de água cinza e subestimar a concentração de matéria orgânica, que na realidade pode ficar na mesma faixa do esgoto doméstico (tabela 3), até pode chegar a concentrações mais elevadas, assim, por exemplo, uma amostra simples do estudo EFL_{CINZA1} (apenas cozinha, padaria) resultou em 1.200 mg de DBO₅ /L.
- Os sólidos na água cinza (areia, pasta de sabão, restos de alimentos) devem ser removidos antes do Filtro, mas as caixas de gorduras comerciais não permitem sua decantação e mesmo a retenção de gordura pode falhar, devido a: i) sobrecarga hidráulica na hora de lavagem, ii) água quente dissolve a gordura, iii) gordura e sólidos sedimentados não são removidos com frequência adequada. O desenho da caixa de gordura deve considerar pelo menos 30 min de retenção hidráulica na hora de pico, bem como a possibilidade de retirada de lodo sedimentado e flutuado.
- Uma carga orgânica temporariamente alta do WCFV (> 32 g de DBO₅ /m².dia) deve ser respondida com uma fase do repouso para prevenir a colmatação.
- Tratado no WCFV os efluentes cinzas são sem odor, transparente e incolor. No caso da EFL_{CINZA3} apareceram uma vez maus odores devido a um aumento do nível de água no filtro, que não deve superar 30% da altura de filtro. No caso de EFL_{CINZA2}, inicialmente o uso exagerado de detergentes provocou um efluente turvo, este problema se superou com utilização de detergentes biodegradáveis.
- A presença de bactérias coliformes (tabela 3) não pode ser excluída para água cinza e mesmo que os WCFV sejam capazes de reduzir as bactérias, a reutilização segura do efluente tratado requer uma desinfecção adicional.

3.2 Experiências com tratamento de águas residuas em WCFV e pre-tratamento

Os Wetlands construídos competem muitas vezes com tecnologias que ocupam menos área e isso resultou na tendência de diminuir cada vez mais a superfície de Wetland. Recentemente foram implementados no Sul do Brasil Wetlands com áreas menores de 0,3 m²/pe, que simplesmente são impossíveis de operar sem colmatção.

Como já abordado, o WCFV é mais econômico em ocupação de área do que o WCFH. Esta economia pode ser ampliada ainda por maior eficiência de pré-tratamento. Em seguida são discutidos quatro casos (ESGOTO 1-4) implantados no Sul do Brasil. Os casos ESGOTO 1 e 2 funcionam com fossa séptica como pré-tratamento e os casos ESGOTO 3 e 4 com ABR (Anerobic Baffled Reactor) ou RAC (reator anaeróbio compartimentado), adaptado com base em desenho de Sasse (1998).



Figura 10: Foto do estudo de caso ESGOTO1

Figure 11: Caso ESGOTO 2

ESGOTO 1: Empresa 300 funcionários, só banheiros sem restaurante (2009)

Projeto: Fossa séptica existente completado pelo WCFV 160 m² (30g DBO₅ /m².dia), precipitação (FeCl₃) e desinfecção (Cloro) para o efluente.

Atual: Até 2016 há apenas 150 funcionários, a carga orgânica é de 5g DBO₅/ m².dia, mas a carga de nitrogênio já chegou a 60% do projeto.

Efluente, média (controle mensal): 12 mg de DBO₅ /L; 50 mg DQO /L; 3,6 mg P/ L (lei <4 mg /L).

ESGOTO 2: Centro comercial projetado para 20m³ /dia (2009)

Desenvolvimento da vazão mostrado na Figura 6, composição do esgoto semelhante à Figura 4;

Projeto: Fossa séptica e 160 m² WCFV (32 g DBO₅ / m².dia), desinfecção e reuso para irrigação.

Atual: Em 2014, a carga de Filtro nos dias úteis foi de até 50 g de DBO₅ /m².dia e finalmente colmatou. Por causa de limitação de área foi colocado como tratamento principal um SBR (para 35 m³ /dia) e o WCFV foi trocado por um Filtro plantado com aeração forçada para absorver os altos picos de efluentes (compare com a informação sobre vazão da figura 6).



Figure 12: Estudo de caso ESGOTO 3 com problemas de colmatção e nova plantação

Figure 13: Estudo de caso ESGOTO 4 (6 meses após implantação)

ESGOTO 3: Empresa 200 funcionários, banheiros e restaurante (2009)

Projeto: ABR e 190 m² WCFV (15 g DBO₅ / m².d), desinfecção final com cloro.

Atual: Trein et al. (2015) documentaram para o ABR redução de apenas 16% DBO₅, devido a uma sobrecarga hidráulica por água de chuva que entrou na rede de esgoto. Para o filtro, a elevada carga orgânica e hidráulica resultou em colmatção, que foi controlada em 2016 através de secagem e nova plantação. Adicionalmente, o lodo de ABR foi retirado com mais frequência e foi melhorado o sistema rotativo de repouso das 4 áreas de WCFV.

Tabela 4: ESGOTO 3, Resultados de 22 amostras mensais (fonte: Trein et al., 2015)

	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	TSS mg/L	NH ₄ -N mg/L	NO ₃ -N mg/L	P mg/L	<i>E.coli</i> NMP/100 ml
Afluente ABR	390 +/-190	724 +/-395	134 +/-126	103 +/-37	-	27 +/-11	1.0 x 10 ⁸
Efluente ABR	329 +/-134	603 +/-108	109 +/- 75	98 +/-35	-	-	1.4 x 10 ⁸
Efl. WCFV	48	179	22	54	20	10	1.4 x 10 ⁷

ESGOTO 4: Parque residencial próximo à praia, projetado para 2.200 habitantes (2009)

Projeto: ABR e 3.140 m² WCFV (15 g DBO₅ / m².dia), desinfecção final com cloro.

Em 2014, Trein et al. documentaram apenas 100 habitantes (5% do projeto) e esgoto ainda relativamente diluída (tabela 4). O ABR chega a 47% remoção de DBO₅ e 50% de redução de sólidos. O sistema realiza remoção completa de carga orgânica e nutrientes. O ponto mais crítico para a operação foi a manutenção da vegetação de Papyrus devido à baixa carga hidráulica.

Tabela 5: ESGOTO 4, Resultados de 20 amostras mensais 2013-14 (fonte: Trein et al., 2015)

	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	TSS mg/L	NH ₄ -N mg/L	NO ₃ -N mg/L	P mg/L	<i>E.coli</i> NMP/100 ml
Afluente ABR	158 +/- 48	276 +/-138	54 +/-51	51 +/-18	-	15 +/- 8	3.3 x 10 ⁷
Efluente ABR	83 +/- 28	157 +/- 60	27 +/-18	43 +/-18	-	-	2.4 x 10 ⁶
Efl.WCFV	5	18	3	3	11	1	2.2 x 10 ⁴

Conclusões para tratamento de esgoto em WCFV: caso bem dimensionado e operado o tratamento de esgoto doméstico pre-tratado no Wetland de fluxo vertical pode até exceder as exigências legais em relação a eficiência, as experiências são:

- Comparado com a fossa séptica, o ABR (ou RAC), apresenta um pré-tratamento mais eficiente, com 3 compartimentos e retenção hidráulica de cerca de 1 dia, mostrou um potencial de redução 40 a 50% da carga orgânica.
- A eficiência de ABR, como também de Fossa séptica, depende da coleta regular de lodo fecal. Afim de prevenir o escape de lodo a superfície de filtro plantado, deve ser sacado com frequência o lodo dos compartimentos (sedimentado e flutuado).
- Cargas hidráulicas frequentemente maiores do que 200 mm/dia (caso ESGOTO2) evitam a secagem da superfície do filtro plantado e promovem sua colmatação (Platzer, 1999). Neste caso, a divisão da superfície em setores e sua operação rotativa tornam se importantes.
- Da mesma forma, a carga orgânica temporariamente elevada ($> 32 \text{ g DBO}_5 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$) deve ter como contração a divisão da superfície em setores e operação rotativa com repouso de 2 a 4 semanas de cada setor para prevenir a colmatação.
- Mesmo que a nitrificação não seja exigida por lei, este processo representa um importante indicador a respeito da eficiência do WCFV. No caso do ESGOTO 3, por exemplo, a carga elevada somente permite 48% de nitrificação e 28% de redução de N_{total} , enquanto que a baixa carga observada no ESGOTO 4 permite reduções de 97% de Amônio-N e 73% de N_{total} . Uma pesquisa mais profunda sobre estes processos deve incluir análise do parâmetro de NTK para realizar o balanço do nitrogênio.
- Mesmo que a desinfecção do esgoto doméstico tratado não seja exigida pela lei nacional o local, é uma importante condição para a reutilização do efluente. A desinfecção mais comum ainda é a aplicação de cloro e a ótima qualidade do efluente oferece as condições para a cloração sem o perigo de geração de subprodutos.

3.3 Experiências com tratamento de esgoto bruto no wetland de duas etapas

Em busca de um tratamento primário ainda mais eficiente, foi construído em Chíncha (Peru) (2011) o primeiro sistema do América do Sul na escala real que include o tratamento de esgoto bruto com dois filtros plantados em seguida: o primeiro filtro de brita para o tratamento primário de esgoto doméstico bruto e o segundo filtro de areia grossa como tratamento secundário.

O projeto é baseado nas experiências da França (Molle et al., 2005) onde este sistema é implementado desde os anos 90 como solução preferencial para pequenas cidades de 200 a 3.000 habitantes. Segundo Arias et al. (2014) existem na França atualmente mais que 1.600 destes sistemas e também outros países de Europa, como Espanha, Portugal, Itália e Alemanha introduziram o wetland de duas etapas para o tratamento de esgoto doméstico bruto e até existem sistemas de escala maior no clima frio, desenhados para o atendimento de 6.000 a 8.000 habitantes.

O desenho do projeto no Peru foi realizado com adaptação às condições locais, a cidade de Chincha está localizada no deserto, temperatura anual de 20° C, precipitação anual de 5-20 mm. A estação foi projetada para um asilo de 60 pessoas (total 7,5m³/dia) com a finalidade de reutilização completa de esgoto tratado para a irrigação da horta do asilo.

<p>ESGOTO_{BRUTO} (2011), adaptação do sistema francês</p> <p>1º. Filtro de brita (tratamento primário): Diferente de Molle et al. (2005), dividido em apenas - Dois setores e cada operado durante 3 dias. - Carga hidráulica (área total): 125 l/m².d (1m²/pe). Material de filtro diferente ao de Molle et al. (2005): - 60 cm brita de 6,4 mm (¼ ") - 25 cm brita de 12,7 mm (½ ") - 15 cm drenagem de brita de 19.1 mm (¾ ").</p> <p>2º. Filtro de areia (tratamento secundário) Diferente de Molle et al. (2005) é WCFV de 60 m² (1m²/pe) solo com areia como material filtrante: Areia d₁₀ = 0,33 mm; D₆₀ = 0,63 mm; U = 1,9</p>	
--	---

Tabela 6: Caso ESGOTO_{BRUTO} Resultados de 2 anos de operação (Hoffmann et al., 2015)

	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	Turb.. NTU	NH ₄ -N mg/L	NO ₃ -N mg/L	<i>Giardia</i> 1L	<i>Ent-amoeba</i> 1L	<i>Helmin.</i> (ova) (Nº)/L	<i>Coli- formes</i> 100 ml
Esgoto bruto	656	1960	470,0	23,0	-	75	30	< 1	4,3 x 10 ⁷
Filtro brita _{efl}	23	74	7,5	5,7	10,6	10	0	30	5,1 x 10 ⁶
Filtro areia _{efl}	4	16	1,3	< 0,2	8,4	0	0	< 1	9,4 x 10 ³

Conclusões para tratamento de esgoto bruto no wetland de duas etapas: a eficiência de este sistema no clima quente é surpreendentemente alta e a solução realmente promissora consiste na primeira etapa, ou seja, o tratamento primário de esgoto bruto. Comparado com o clima frio a eficiência de esta etapa é ainda elevada no clima quente e assim tem o potencial de resolver de forma sustentável os problemas de saneamento para comunidades e pequenas cidades.

- A primeira etapa (filtro de brita) quando comparada às outras tecnologias para o tratamento primário de esgoto bruto (Fossa séptica, RAC, Tanque Imhoff e até UASB), se mostrou mais eficiente e desta forma promove i) redução da área para a segunda etapa ou ii) possível atuação como única etapa, sem tratamento adicional:
 - Mole et al. (2015) utilizaram no clima quente também um filtro de brita com dois sectores, obtendo 74 a 91% de redução de DBO₅ com carga hidráulica (relacionado ao setor ativo) entre 0,35 e 0,99 m/dia e, através da uma recirculação de até 25% de efluente tratado, conseguiram aumentar a eficiência de remoção de DBO₅ ainda ao 85% a 95%.
 - No presente caso ESGOTO_{BRUTO}, a carga hidráulica da área ativa era no máximo de 0,25 m/dia e a eficiência em remoção de DBO e DQO ficou entre 96% a 98%. Adicionalmente, foi realizada uma nitrificação de 75% (Tabela 6), mostrando uma eficiência ainda maior que reportado por Mole et al. (2015).
- Diferentemente das tecnologias convencionais de tratamento primário de esgoto domésticos (Fossa Séptica, RAC, Tanque Imhoff ou até UASB) o filtro de brita:
 - Aplica processos aeróbios de tratamento, não libera maus odores, não produz efluentes escuros e a aparência visual do efluente durante dos primeiros 6 meses de operação mostrou uma redução constante da turbidez.
 - Não depende de um pré-tratamento mecânico avançado (caixa de areia e remoção de gordura), nem é influenciada pelas elevadas cargas hidráulicas.
 - Inclui o tratamento completo de lodo retirado, ou seja, sua mineralização (decomposição e secagem) na superfície do filtro. Sob as condições climáticas da França Molle et al. (2005) reportaram um crescimento da camada de lodo de 1 a 1,5 cm por ano e sua remoção depois de 15 anos como húmus seco. No estudo de caso ESGOTO_{BRUTO} não foi observada nenhuma camada durante os primeiros 5 anos da operação, o mesmo é reportado por Molle et al. (2015) para a operação de seus filtros de brita no clima quente.
- Referente à higienização (tabela 6), as recomendações da OMS (2006) para a reutilização de efluentes não foram cumpridas na primeira etapa, mas sim após a segunda etapa. Esta segunda etapa foi desenhada igual como os outros WCFV no presente documento como filtro unicamente composto de areia, que pode remover os germes com melhor eficiência. Este efeito é importante para certos fins de reuso, porque a aplicação de cloro e radiação UV inativa as bactérias coliformes, mas não necessariamente os patógenos como *Entamebia*, *Giardia*, *Cryptosporidium* e os parasitos (cistos ou ovos de Helminto).

Conclusões

Os estudos de caso demonstram um alto potencial de aplicação de Wetlands construídos de fluxo vertical (WCFV) para o tratamento descentralizado de efluentes sempre que a concepção de sistema estiver adaptada às condições locais e às características específicas do esgoto. Como requisitos mínimos para a concepção de WCFV, recomenda-se: um balanço de oxigênio positivo, uma carga hidráulica inferior a 200 mm /dia e uma carga orgânica máxima de 32 g DBO₅ /m².dia. Adicionalmente, se recomenda:

- a) Adaptação do desenho às exigências de qualidade final do efluente tratado (por exemplo, considerando possíveis objetivos de reuso);
- b) Escolha e desenho da tecnologia de pré-tratamento adaptada às características específicas de esgoto e demais afluentes a tratar;
- c) Seleção correta do material filtrante, que inclui, até certo nível, a adaptação do projeto aos materiais localmente disponíveis;
- d) Consideração da hidráulica de todo o sistema;
- e) Antecipação de setores de repouso para prevenir o efeito da colmatação em caso de sobrecargas periódicas orgânicas e / ou hidráulicas.

Os processos de tratamento primário podem chegar, em clima quente, à elevada eficiência (von Sperling & Chernicharo, 2005), e o uso deste potencial pode até economizar os custos para implementação e operação de Wetlands como sistemas de tratamento secundário. Em comparação com a Fossa séptica, o ABR (ou RAC) se mostrou como tecnologia mais compacto e mais eficiente. Por outro lado, o maior potencial como tecnologia de tratamento primário mostrou o filtro de brita plantado que é desenhado para tratar esgoto bruto sem produzir lodos fecais. Os primeiros resultados parecem comprovar a hipótese de Molle et al. (2015) que nas condições do clima quente esta tecnologia pode tratar o esgoto bruto até como única etapa e ainda com eficiência melhor das muitas outras tecnologias que permanecem ao tratamento secundário. Com essas características o filtro de brita plantado apresenta uma solução promissora para resolver de forma econômica o problema de falta de saneamento nas pequenas cidades também no Brasil.

Em relação as plantas não foi o foco deste trabalho pesquisar seu papel, no entanto deve ser notado que apresentam um elemento essencial para o funcionamento dos Wetlands. Sobre escolha de espécies pode se mencionar que no América Latino os clientes preferem as espécies decorativos, como papiro. *Cyperus papyrus* pode ser de difícil controle em relação ao seu crescimento especialmente tratando esgoto com elevada concentração de nutrientes. *Cyperus alternifolius* é resistente, com uso comum no Peru, mas não tanto no Brasil, *Cyperus haspan* é menos resistente à secagem do Wetland, bem como em caso da colmatação. Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) é usado em climas quentes para proteção de

áreas pendentes contra erosões, não é uma planta típica dos Pantanaís, mas foi usado pelos autores com êxito nos WCFV tanto no sul do Brasil como na costa Peruana.

A reutilização do efluente tratado no Wetland construído pode exigir ainda um tratamento adicional. Em relação à higienização, o efluente do WCFV tem a qualidade ótima para ser tratado sem problemas com cloro ou UV. Em alguns casos, surge uma coloração amarelada nos efluentes finais que pode provocar a rejeição dos usuários, especialmente em caso de reutilização para descargas no vaso sanitário (de cerâmica branca). A aparência amarelada do efluente tratado, quando não é acompanhada por turbidez ou odor, é causada por ácidos húmicos, ou seja, o material orgânico restante que não é biodegradável. Vale ressaltar que este fenômeno não foi observado no tratamento de água cinzas e, de qualquer maneira, se trata apenas de um problema estético.

A intenção dos autores é motivar mais pesquisa aplicada a respeito dos processos e eficiência de Wetlands construídos em grande escala, a fim de disseminar experiências fundamentadas e explorar ainda mais o potencial destes sistemas e suas variações, especialmente em climas quentes.

Referências

- Arias, L., Bertrand-Krajewski, J.-L. & Molle, P. (2014):** Simplified hydraulic model of French vertical-flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* 70 (5), 909–916
- CONAMA, 2011,** Conselho Nacional do Meio Ambiente - BRASIL Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União, Brasília, 16/05/2011
- Hernández Leal, L.; Zeeman, G.; Temmink, H.; Buisman, C (2007)** Characterization and biological treatment of greywater . *Water Science & Technology* Vol. 56 No 5 pp 193–200
- Hoffmann, H.; Costa, T.; Wolff, D. B.; Platzer, C.; Costa, R. H. (2007):** The Potential of Denitrification for the Stabilization of the Activated Sludge process affected by Low Alkalinity, *Brazilian Archives of Biology and Technology* Vol.50, n. 2 : pp.329-337,
- Hoffmann, H., Platzer Chr., von Münch E., Winker M. (2011):** Technology review Constructed Wetlands for greywater and domestic wastewater treatment in developing countries. Sustainable Sanitation and Ecosan Program of GIZ GmbH
- Hoffmann, H.; Gamarra, J.; Villafranca, B.; Platzer C. (2013):** Combinação de tratamento primário e secundário de esgoto em sistema de filtros plantados como solução descentralizado de alta eficiência e baixo custo operacional. 1º Simpósio Brasileiro sobre aplicação de Wetlands construídos no tratamento de águas residuais, Florianópolis, SC

- Langergräber, G. (2013):** Are Constructed Treatment Wetlands sustainable sanitation solutions? *Water Science Technology* **167** (10), 2133-2140.
- MINAM (2010)** Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, Peru; Limites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales; 24/03/2010
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G., Ivema, A. (2005)** How to treat raw sewage with constructed Wetlands, an overview of the French system. *Water Science & Technology* **51** (9), p. 11-21
- Molle, P.; Lombard Latune, R.; Riegel, C.; Lacombe, G.; Esser, D. (2015)** French vertical-flow constructed Wetland design: adaptations for tropical climates , *Water Science & Technology* **71** (10), p. 1516-1523
- Platzer, C. (1999)** Design Recommendation for Subsurface Flow Constructed Wetlands for Nitrification and Denitrification. *Water Science Technology*, v. 40, n. 3, p. 257-263,
- Platzer, Chr., Hoffmann, H.; Cardia, W. (2007):**. Dimensionamento de Wetland de Fluxo Vertical Com Nitrificação: adaptação de modelo europeu para as condições climáticas do Brasil. In: ABES, 24, Belo Horizonte, Brasil
- Sasse, L.; (1998):**DEWATS. Decentralized Wastewater Treatment in Developing Countries. Bremen: Bremen Overseas Research and Development Association (BORDA)
- Sezerino, P. H. (2006)** Potencialidade dos Filtros Plantados com Macrófitas (Constructed Wetlands) no Pós-Tratamento de Lagoas de Estabilização Sob Condições de Clima Subtropical. Tesis PhD UFSC
- Trein, C.M; Pelissari, C.; Hoffmann, H.; Platzer, C.; Sezerino, P.H. (2015)** Tratamento descentralizado de esgotos de empreendimento comercial e residencial empregando a Ecotecnologia dos Wetlands construídos. *Ambiente Construído, Porto Alegre*, V. 15, n. 4, p. 351-367.
- WHO (2006)** WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 4: Excreta and greywater use in agriculture. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Von Sperling M.; Chernicharo, C.A.L (2005);** Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions, Published by IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK