

WETLAND FRANCÊS: UM COMPONENTE PROMISSOR NO CAMINHO PARA A UNIVERSALIZAÇÃO DO SANEAMENTO - EXPERIÊNCIAS DE LONGO PRAZO

Heike Hoffmann⁽¹⁾

Bióloga pela Universidade de Greifswald. Doutora em Ecologia dos Sistemas Aquáticos pela Universidade de Rostock. Sócia-diretora da Rotária do Brasil.

Rosa María Miglio⁽²⁾

Engenheira Agrícola pela Universidade Nacional Agrária La Molina (UNALM). Mestre em Engenharia Agrícola pela Escola de Pós-Graduação da Universidade Nacional Agrária La Molina (EPG/UNALM). Doutoranda em Engenharia e Ciências Ambientais pela Universidade Nacional Agrária La Molina (UNALM). Professora na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNALM.

Christoph Platzer⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Técnica de Munique (TUM). Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlim (TU Berlin). Sócio-diretor da Rotária do Brasil.

Camila Haiml⁽⁴⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Especialista em Gestão de Projetos pela Faculdade Estácio de Sá. Sócia da Rotária do Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Rua Teodoro Manoel Dias, 421 - Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis - SC - CEP: 88050-540 - Brasil - Tel: +55 (48) 3234-3164 - e-mail: heike@rotaria.net

RESUMO

O objetivo de universalizar o serviço de saneamento impulsiona a busca por soluções eficientes e robustas na operação, especialmente para Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) de menor porte, onde o custo operacional é um fator decisivo. Nesse contexto, este estudo analisou o potencial de um tipo de Wetland conhecido internacionalmente como "sistema francês", que utiliza dois estágios para o tratamento primário e secundário de esgoto bruto. Com base em experiências operacionais de duas ETEs que utilizam essa tecnologia há 12 e 8 anos, foram estabelecidos requisitos que permitem utilizar o primeiro estágio como um tratamento único, alcançando consistentemente uma remoção superior a 85% da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), respeitando um limite de 60 mg de DBO/L. No que diz respeito ao segundo estágio, foram comparadas as eficiências de wetlands de fluxo vertical e horizontal. Ambas demonstraram efetividade na remoção da DBO, alcançando concentrações finais de DBO inferiores a 8 mg/L no efluente tratado e atendendo aos requisitos necessários para o reúso do efluente, quando aplicável. Essas experiências de longo prazo evidenciam o imenso potencial dos wetlands e suas variações tecnológicas para contribuir de forma econômica e sustentável com as demandas de saneamento básico no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento Básico, ETEs de pequeno porte, Wetland Francês.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de soluções de baixo custo para o tratamento de efluentes, especialmente em termos de custos de operação (OPEX), é fundamental para alcançar a universalização do saneamento. Especialmente em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) de menor porte, os custos operacionais têm um impacto significativo (VON SPERLING e PLATZER, 2019). Nesse contexto, a implementação de tecnologias eficientes em larga escala se torna crucial.

Um exemplo promissor é o sistema de wetland francês, desenvolvido na França, que consiste em dois estágios de wetlands com funções distintas, um tratamento primário e um secundário. O segundo estágio é um wetland "clássico" de escoamento subsuperficial vertical com areia como material filtrante. A inovação está no primeiro estágio, que utiliza um filtro de brita, e é projetado para reter na superfície, secar e mineralizar completamente o lodo do esgoto bruto, antes que o efluente passe por tratamento neste filtro (MOLLE *et al.*, 2005; LATUNE e MOLLE, 2017). Essa abordagem elimina a necessidade de tratamentos convencionais prévios ao wetland "clássico" de escoamento subsuperficial, como tanques sépticos, tanques Imhoff, filtros anaeróbios, ou UASB, reduzindo os custos no dimensionamento do segundo estágio (MOLLE *et al.*, 2005; DOTRO *et al.*, 2017).

O sistema francês é amplamente utilizado na França, com mais de 4.000 sistemas construídos para atender a populações médias de 1.000 habitantes equivalentes, e que até 2015 representavam mais de 20% de todas as ETEs domésticas no país (MORVANNOU *et al.*, 2015; DOTRO *et al.*, 2017). Para países de clima quente, Latune e Molle (2017) indicam que esses sistemas podem atender a até 5.000 habitantes, principalmente devido às maiores eficiências associadas às altas temperaturas (VON SPERLING e PLATZER, 2019). Devido ao seu grande potencial no primeiro estágio do sistema nessas regiões, pesquisas têm explorado sua aplicabilidade no Caribe, Brasil e Peru, apresentando resultados promissores (HOFFMANN *et al.*, 2013; MOLLE *et al.*, 2015; DOTRO *et al.*, 2017).

Com base nas experiências em clima quente, algumas considerações específicas têm sido desenvolvidas. Em termos de projeto, em vez da recomendação para climas frios de dividir o primeiro estágio em três áreas de 0,4 m² por habitante, totalizando 1,2 m², sugere-se a utilização de apenas duas áreas de tamanho igual, totalizando 0,8 m², o que deve manter ou até aumentar a eficiência do sistema (MOLLE *et al.*, 2015; LATUNE e MOLLE, 2017; TREIN *et al.*, 2021). Essa adaptação pode até dispensar a segunda etapa do sistema, dependendo das exigências legais e ambientais (LATUNE e MOLLE, 2017; VON SPERLING e SEZERINO, 2018; TREIN *et al.*, 2021). Von Sperling e Platzer (2019) reforçam o potencial do sistema francês para áreas em que seja necessária simplicidade operacional e baixos custos de manutenção, uma vez que a tecnologia dispensa o uso de pré-tratamento e de tratamento adicional para lodos.

Nesse contexto, o presente artigo busca fornecer uma análise mais precisa dessas recomendações, considerando diferentes realidades e necessidades relacionadas ao saneamento básico, com foco nas condições específicas do Brasil. Para isso, foram analisados dois sistemas francês aplicados como ETEs de pequeno porte, que apresentaram resultados estáveis ao longo de 12 e 8 anos. O objetivo foi identificar as condições que garantem a melhor eficiência com o menor custo possível.

Com base nessas análises, propomos a denominação "Fito Filtro" para o primeiro estágio do sistema francês adaptado ao clima quente, enfatizando sua capacidade de filtrar e tratar o esgoto bruto por meio de um filtro de brita plantado com macrófitas. Essa nomenclatura também destaca a possibilidade de utilizar o Fito Filtro como um tratamento único, em certas condições, dispensando a necessidade de etapas adicionais. No entanto, caso seja necessário destinar o efluente tratado para reuso ou outros fins mais exigentes, tecnologias complementares podem ser empregadas para o pós-tratamento do efluente.

OBJETIVO

Apresentar o potencial do sistema wetland francês, com destaque para o primeiro estágio denominado "Fito Filtro", quando aplicado em condições reais e de longo prazo. Além disso, pretende-se ressaltar a contribuição dessas tecnologias para a universalização do saneamento básico e explorar a viabilidade do reuso do efluente tratado. O intuito é fornecer informações e evidências concretas que respaldem a adoção dessas tecnologias no contexto brasileiro, promovendo a sustentabilidade, eficiência e qualidade no tratamento de efluentes.

METODOLOGIA UTILIZADA

Neste trabalho, os autores utilizaram dados de diferentes etapas de pesquisa para comparar o desenvolvimento da eficiência de dois sistemas localizados no Peru. O primeiro sistema, localizado na província de Chincha, foi analisado em 2013 (HOFFMANN *et al.*, 2013; PLATZER *et al.*, 2016) e novamente em 2020 (HOFFMANN *et al.*, 2022). O segundo sistema está localizado na *Universidad Nacional Agraria La Molina* (UNALM), em Lima, e tem operado de forma contínua ao longo de 6 anos. Este estudo compara os resultados de 3 fases de pesquisa (LEÓN *et al.*, 2018; GUEVARA *et al.*, 2020; HOFFMANN *et al.*, 2022) em relação à adequação dos efluentes do Fito Filtro e dos wetlands de tratamento de fluxo vertical (WFV) e horizontal (WFH) para o reuso.

DESCRIÇÃO DO PRIMEIRO SISTEMA – ETE CHINCHA

Em 2011, foi colocado em operação o primeiro sistema francês no Peru, localizado em Chincha, uma região desértica. O projeto foi desenvolvido pelos autores para uma casa de repouso, com o objetivo de obter um efluente tratado para irrigação de áreas verdes. O sistema francês é composto por dois estágios, como ilustrado na Figura 1.

O primeiro estágio é o Fito Filtro, que possui uma área total de 60 m², dividida em duas partes de 30 m², proporcionando 1 m² por pessoa equivalente. O filtro é composto por:

- 40 cm de borda livre
- 60 cm de camada filtrante de cascalho fino (4-6 mm)
- 25 cm de camada de transição de cascalho (20-30 mm)
- 15 cm de camada de drenagem de cascalho (30-40 mm)

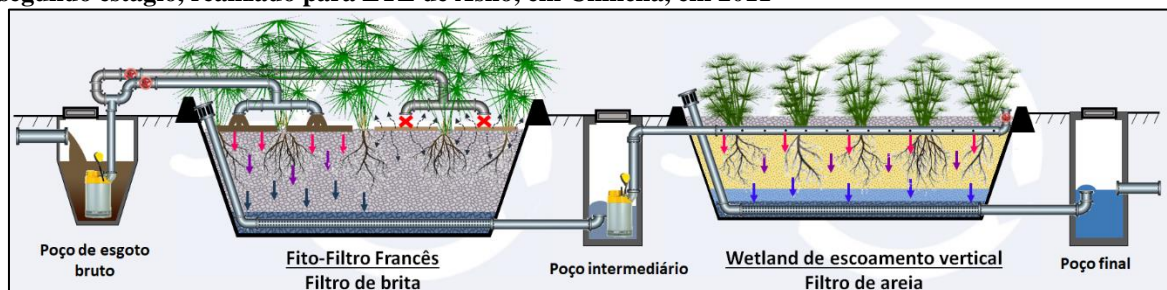
As áreas são alimentadas por 2 bombas trituradoras com troca automática entre as áreas em ciclos de 3,5 dias. A carga hidráulica da área ativa é de 0,25 m/d. As duas áreas são plantadas com *Vetiver* e *Cyperus alternifolius*.

O segundo estágio é um wetland de fluxo vertical (WFV) com uma área total de 57 m², correspondendo a 0,95 m² por pessoa equivalente. O filtro é composto por:

- 20 cm de borda livre
- 60 cm de areia fina d₁₀ = 0,33 mm; d₆₀ = 0,63 mm; (U = 1,9)
- 20 cm de camada de drenagem de cascalho fino (4 - 6 mm)

A alimentação do segundo estágio se dá por bomba submersível, controlada pelo nível de efluente do Fito Filtro. O efluente é distribuído por toda a superfície. O filtro é plantado com Papiros Chinês (*Cyperus alternifolius*).

Figura 1 – Esquema de Fito Filtro como primeiro estágio, seguido pelo wetland de fluxo vertical como segundo estágio, realizado para ETE de Asilo, em Chincha, em 2011



Fonte: Rotária do Brasil.

DESCRIÇÃO DO SEGUNDO SISTEMA – ETE UNALM

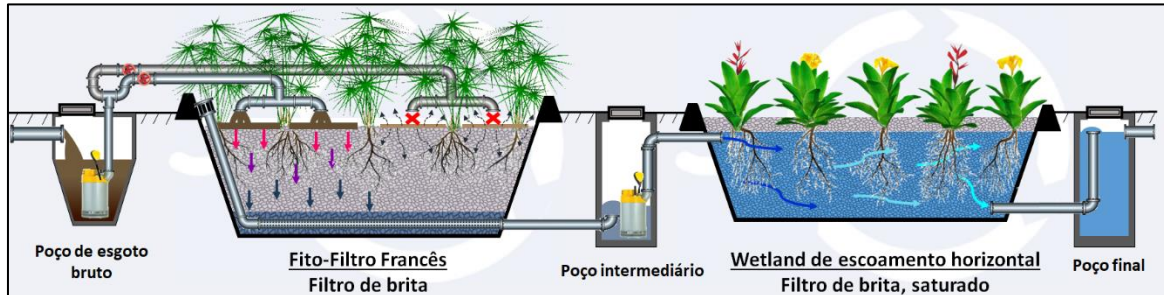
O segundo sistema, também projetado pelos autores, foi implantado em 2015 em um campo piloto de Wetlands de tratamentos modulares da *Universidad Nacional Agraria La Molina* (UNALM), em Lima. O campo piloto inclui o Fito Filtro e um Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) como tratamentos para as águas residuais brutas, combinados com dois wetlands de fluxo vertical com areia (WFV) e dois wetlands de fluxo horizontal com brita (WFH). A ETE está em operação desde 2016, com cargas entre 0,12 e 0,98 m/d (área ativa). A carga analisada é de 0,25 m/d de águas residuais brutas.

O primeiro estágio é o Fito Filtro com uma área total de 36 m², dividida em duas áreas de 18 m². Cada área possui 2 pontos de descarga e é alimentada por 2 bombas trituradoras com controle automático. A composição do filtro é semelhante à utilizada na ETE de Chincha.

O segundo estágio é um WFV com uma área total de 30 m², dividido em dois wetlands separados. A composição do filtro é semelhante à utilizada na ETE de Chincha. Os filtros são plantados com *Vetiver* e *Papiros Chinês*. A carga aplicada para o estudo neste estágio foi de 0,10 m/d de efluente do Fito Filtro. O esquema do tratamento corresponde ao apresentado na Figura 1.

Alternativamente ao WFV, também foi utilizado WFH com uma área total de 30 m², dividido em dois wetlands. A composição do filtro inclui uma camada de cascalho de 60 cm de altura com brita 0 e uma camada de brita 2 como distribuidor e coletor na entrada e saída. Os filtros são plantados com *Vetiver* e *Papiros Chinês*, e estão sendo operados em condições totalmente saturadas com efluente. A carga aplicada para o estudo foi de 0,10 m/d de efluente do Fito Filtro. O esquema do tratamento corresponde ao apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de Fito Filtro como primeiro estágio, seguido por wetland de fluxo horizontal como segundo estágio, realizado como alternativa para o fluxo vertical. Ambas as configurações foram realizadas e analisadas com a ETE da UNALM



Fonte: Rotária do Brasil.

RESULTADOS E ANÁLISE

O sistema de wetland de tratamento do tipo francês em Chinchá tem sido usado para tratar as águas residuais de uma casa de retiro desde 2011, sendo operado pelos seus proprietários (Figura 3). A principal razão para investir nesse sistema de tratamento foi a necessidade de água para irrigação e por não haver serviço de gestão de lodo fecal na região, tornando o sistema francês a única alternativa viável.

Figura 3 – Chinchá 2015: primeiro sistema francês em escala real no Peru, no quarto ano de operação



Fonte: Rotária do Brasil.

Após 12 anos de operação, apenas uma bomba trituradora para bombeamento de águas residuais brutas precisou ser substituída. Essa substituição ocorreu durante a medição realizada em 2020, quando o sistema estava funcionando com apenas uma bomba por cerca de 1 ano, resultando no ressecamento das plantas no outro lado. Durante esse período, foi possível examinar o efluente de entrada (Figura 4) e a deposição de lodo na superfície do primeiro estágio (Fito Filtro) (Figuras 5, 6 e 7).

A espessura média do lodo depositado foi de 6,26 cm em uma parte dos 9 anos de operação e 5,63 cm na outra parte dos 8 anos de operação (Figuras 5 e 6). O crescimento médio do lodo de 0,7 cm por ano é menor do que o relatado por outros estudos (MOLLE *et al.*, 2015), o que pode ser atribuído à carga relativamente baixa do sistema (1 m³/habitante, além da não continuidade da ocupação máxima da casa de retiro durante os 9 anos) e ao clima muito seco.

Esses resultados indicam que o sistema pode operar por pelo menos mais 15 anos, totalizando 24 anos, antes que seja necessário remover a camada de lodo seco.

Figura 4 – Chinchá 2022: amostragem do efluente do primeiro estágio



Figura 5 – Chinchá 2022: medição da camada de lodo acumulada na superfície ao longo do tempo



Fonte: (HOFFMANN *et al.*, 2022).

A umidade do sólido depositado (após 3 dias de secagem natural na superfície, Figura 5) variou entre 25% e 40%. A relação entre Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Suspensos Totais (SST) foi inferior a 30%, o que indica uma alta estabilização de lodo primário, por processo de oxidação e mineralização.

Figura 6 – Distribuição da camada de lodo depositada nas áreas 1 e 2, a partir do ponto de descarga até a borda do Fito Filtro

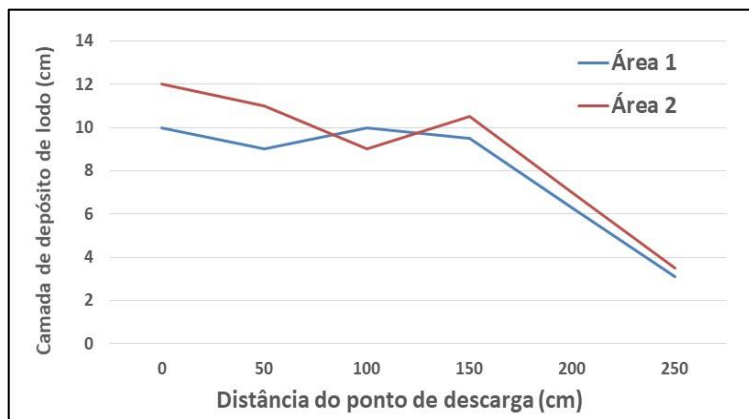


Figura 7 – Amostra de lodo depositado para análise



Fonte: (HOFFMANN *et al.*, 2022).

A Tabela 1 permite comparar as eficiências de tratamento entre os testes realizados em 2013 e 2020, diferenciando o desempenho do Fito Filtro e do WFV. Ao analisar especificamente a eficiência do Fito Filtro, observa-se que ele atinge mais de 90% na remoção de DBO, DQO e Sólidos Suspensos (SS). A concentração de DBO₅ do efluente do Fito Filtro foi inferior a 30 mg/L DBO₅, e no caso do DQO, foi inferior a 80 mg/L DQO, indicando a capacidade do sistema de atender aos requisitos da resolução CONAMA 430 (BRASIL, 2011).

Os valores médios registrados no efluente do Fito Filtro em 2020, de 12,6 mg SS/L, estão dentro dos limites recomendados para reuso na irrigação em áreas de "acesso livre" (SS < 30 mg/L), de acordo com uma nova proposta no Peru em 2021 e orientada pelas novas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006). No entanto, embora o Fito Filtro apresente uma boa retenção de ovos de helmintos, não garante sua eliminação completa, o que é necessário para o reuso em condições restritivas ou não restritivas (WHO, 1989). Além disso, apesar do aumento na camada de lodo entre os testes realizados em 2013 e 2020, foram observados episódios de presença de ovos de helmintos no efluente do Fito Filtro em ambas as ocasiões, correspondendo aproximadamente a 25-33% das análises realizadas. Adicionalmente, houve um aumento nas concentrações de bactérias coliformes, passando de 5,1x10⁶ NMP/100 ml em 2013 para 2,4x10⁷ NMP/100 ml em 2020, bem como um aumento na turbidez de 7,5 NTU em 2013 para 21 NTU em 2020.

Tabela 1 – Efluentes do sistema francês em Chinchá, resultados de 2020 comparados com 2013

ETE CHINCHA	Parâmetros Químicos								Ovos Helmintos (OH)				Bactérias colif.
	Nº	DQO mg/L	DBO ₅ mg/L	Turbd. NTU	SS mg/L	P _{total} mg/L	NH ₄ -N mg/L	NO ₃ -N mg/L	Nº	Nº ovos / 1L			NMP/100 ml
2013 esgoto bruto	2	934	343	269	7,9	23,0	/	5				4,26E+07	
Fito Filtro efluente	3	75	23	7,5	5,5	5,7	10,6	3	0	60	0	5,10E+06	
WFV efluente	4	17	4	0,3	4,4	0	8,4	3	0	0	0	9,40E+03	
2020 esgoto bruto	6	377	245	195	195	4,7	25,3	4	370	40	120	50	6,30E+07
Fito Filtro efluente	6	78	29	21,3	12,6	4,7	2,2	7,9	4	0	0	30	2,40E+07
WFV efluente	6	6,3	2,2	0,9	0,9	3,7	0	4,4	4	0	0	0	6,40E+03

Fonte: Rotária do Brasil.

Nesse contexto, fica evidente que o segundo estágio de tratamento, o WFV, desempenha um papel crucial para alcançar o objetivo de reúso, especialmente no que diz respeito à eliminação de ovos de helmintos, como mostrado na Tabela 1. Embora o efluente do WFV apresente valores extremamente baixos em todos os parâmetros, as concentrações de bactérias coliformes ainda estão ligeiramente acima do limite usual para reúso em áreas de "acesso livre" (NMP < 1.000/100 ml). É importante ressaltar que não existem limites gerais para reúso no Brasil, portanto sua aplicação é considerada em áreas de "acesso restrito", ou a implementação de um estágio adicional de desinfecção deve ser exigida para atender aos padrões mais elevados.

A comparação com os resultados dos wetlands no campo universitário da UNALM em Lima, Peru, revelou descobertas semelhantes. O sistema (Figura 8) tem estado em operação contínua desde 2015 e, para a presente avaliação, foram selecionadas duas pesquisas com cargas semelhantes ao projeto de Chinchá (0,25 m/d para o Fito Filtro e 0,1 m/d para o segundo estágio, como WFV e WFH).

Figura 8 – Wetlands da UNALM, 2018, da esquerda para a direita: Fito Filtro, 2 células de WFV e 2 células de WFH



Fonte: Rotária do Brasil.

O objetivo inicial da pesquisa na UNALM em 2015 era investigar a opção de operar o Fito Filtro como um único estágio, inclusive para fins de reúso. Com esse objetivo, uma camada de serragem e palha foi colocada na superfície de uma das duas partes do Fito Filtro (Figuras 9 e 10) para reforçar a filtração desde o início, ou seja, antes que o filtro de lodo se depositasse naturalmente.

Figura 9 – Fito Filtro, área esquerda com camada de palha e serragem, área direita sem camada



Figura 10 – Lodo depositado na superfície, área com camada e área sem camada



Fonte: (LEÓN *et al.*, 2018).

Das três sequências de pesquisa com variações de carga (LEÓN *et al.*, 2018), apenas os resultados da segunda fase foram selecionados para este estudo, pois apresentavam carga similar aos outros dois casos aqui apresentados. Na Tabela 2, os resultados da parte do Fito Filtro que foi coberta com uma camada de palha e serragem, e a parte sem camada, juntamente com o efluente final tratado pelo WFV, são comparados.

As eficiências de remoção de DQO, DBO₅ e SS no Fito Filtro (Tabela 2), em torno de 90%, são semelhantes aos resultados obtidos no sistema na ETE Chinha (Tabela 1), embora se observe uma turbidez consideravelmente mais alta (parte sem camada: 113 NTU e parte com camada: 84 NTU). Por outro lado, apesar da turbidez, os resultados para a área com camada de serragem e palha parecem ser mais elevados do que para a parte sem a camada. Embora a análise estatística dos resultados completos (considerando as 3 fases) não tenha confirmado diferenças significativas, é possível que tenha ocorrido uma lixiviação de ligninas das serragens e palhas na segunda fase, o que poderia ter aumentado a DQO, por exemplo.

Tabela 2 – Efluentes do sistema da UNALM: resultados da fase 2 da 1ª pesquisa. Fito Filtro com e sem camada de apoio e Wetland de fluxo vertical (WFV) como segundo estágio

ETE UNALM 2016	DQO DBO ₅ Turbd. SS P _{total} NH ₄ -N NO ₃ -N								Ovos Helmintos Bacterias colif.		
	Nº	mg/L	mg/L	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Nº	Nº ovos/1L	NMP/100 ml
Esgoto bruto	16	875	546	611	540	7,2	42,6		12	585	4,10E+08
Fito Filtro com palha	7	100	48	84	18	4,8	21,1	3,0	4	0	7,10E+06
Fito Filtro sem palha	9	81	32	113	13	4,1	17,6	1,9	5	0	6,40E+06
WFV efluente	16	11	7,8	0,8	3,3	1,2	3,8	6,6	12	0	3,10E+03

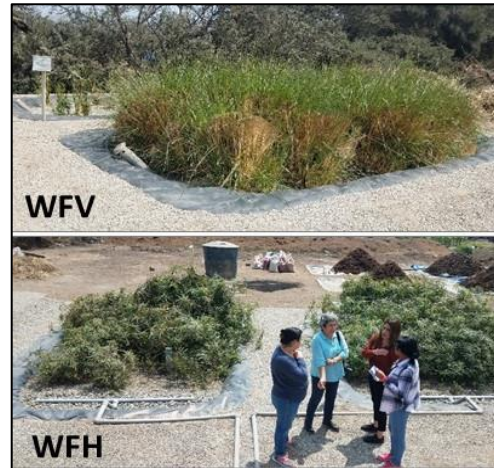
Fonte: Rotária do Brasil.

De acordo com os resultados da Tabela 2, o Fito Filtro conseguiu eliminar completamente os ovos de helmintos, independentemente de ter ou não a camada de serragem e palha. O mesmo se aplica para as outras 2 fases realizadas, que não são apresentadas aqui, e levaram à classificação do efluente do Fito Filtro na apresentação de LEÓN *et al.*, 2018, como adequado para a Classe B, de acordo com a OMS (WHO, 1989). No entanto, levando em consideração os mais novos resultados do mesmo Filtro Francês (Tabela 3), essa conclusão precisa ser corrigida.

Quanto ao Wetland de tratamento de fluxo vertical com areia como material filtrante (Tabela 2), sua excelente capacidade de pós-tratamento foi confirmada, assim como observado no sistema em escala real (Tabela 1). No entanto, a concentração de coliformes bacterianos no efluente final ainda exigia desinfecção para atender aos padrões de reuso em áreas de "Acesso Livre" ou conforme classe A da OMS (MPN < 1.000/100 ml) (WHO, 1989).

As pesquisas no sistema piloto da UNALM continuaram com outros objetivos e uma reforma foi realizada no sistema de distribuição do Fito Filtro (Figura 11). Até o ano de 2019, uma carga igual à dos dois casos anteriores foi repetida. Nesta pesquisa, o objetivo era comparar a eficiência do WFH com o WFV (Figura 12), ambos como pós-tratamento do Fito Filtro.

Figura 11 – Fito Filtro, após reforma no sistema de distribuição de esgoto bruto em 2018 **Figura 12 – Wetland de fluxo vertical (WFV) e horizontal (WFH) em 2020**



Fonte: (HOFFMANN *et al.*, 2022).

Os resultados são apresentados na Tabela 3. Novamente, o Fito Filtro demonstra eficiências extremamente altas, ultrapassando os 90% na remoção de DQO, DBO e SS. Ao contrário dos resultados anteriores (Tabela 2), desta vez também foi possível manter a turbidez em valores baixos (20 NTU). Isso confirma a aplicabilidade do Fito Filtro para atender às demandas que se referem exclusivamente à redução da carga orgânica, atendendo à CONAMA 430 (BRASIL, 2011), como é comum em pequenas comunidades.

Em relação aos parâmetros microbiológicos, foi observada uma menor concentração de ovos de helmintos no esgoto bruto afluente em comparação com ocasiões anteriores, com valores variando entre 20 e 120 ovos de helmintos / L em um total de 12 amostras (Tabela 3). Em 11 das 12 amostras de efluente do Fito Filtro, eles foram totalmente retidos. No entanto, foi identificado um caso em que ovos de helmintos foram encontrados no efluente, confirmando os resultados obtidos no sistema de Chinha (Tabela 1) e tornando necessário corrigir as afirmações com base nos resultados anteriores da Tabela 2. As concentrações de coliformes bacterianos no efluente do Fito Filtro permaneceram na faixa de NMP 10^6 a 10^7 / 100 ml, semelhante aos casos anteriores.

A eficiência do WFV na Tabela 3 também confirma os resultados dos casos anteriores (Tabelas 1 e 2). Embora haja um leve aumento na DQO (48 mg/L) e na concentração de coliformes bacterianos (NMP 2×10^4 / 100 ml), esse aumento pode ser atribuído às cargas mais altas aplicadas em ensaios anteriores, que não estão relatadas nesse contexto. Apesar disso, é importante destacar que as eficiências obtidas permanecem altas e constantes ao longo do tempo de operação, superando outras tecnologias de tratamento em termos de eficiência e qualidade.

–Tabela 3 - Efluentes do sistema da UNALM: resultados da fase 1 da 3ª pesquisa. Fito Filtro como primeiro estágio e Wetland de fluxo vertical (WFV) em comparação com Wetland de fluxo horizontal (WFH) como segundo estágio

ETE UNALM 2019	DQO DBO ₅ Turbd. SS P _{total} NH ₄ -N NO ₃ -N								Ovos Helmintos		Bacterias colif.
	Nº	mg/L	mg/L	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Nº	Nº ovos/1L	NMP/100 ml
Esgoto bruto	12	710	368	450	690	4,7	42,9		12	20 - 120 ovos/amostra	3,33E+07
Fito Filtro	12	69	19	20	17	4,0	16,8	5,1	12	1 amostra com 7 ovos	3,75E+06
WFV efluente	12	48	4,9	4,6	1,9	0,6	0,4	7,8	24	0	2,04E+04
WFH efluente	12	53	7,5	5,3	3,1	0,7	16,4	2,0	12	0	4,45E+05

Fonte: própria dos autores.

O mesmo se aplica ao WFH, que apresenta resultados ligeiramente mais altos do que o WFV (Tabela 3). Ambos os sistemas garantem a qualidade de reúso da Classe B da OMS (WHO, 1989) ou "acesso restrito", e uma última desinfecção pode ser aplicada para atender aos padrões de qualidade da Classe A (ou "acesso livre") sem problemas. Além disso, ao contrário do WFV, no fluxo horizontal não ocorre a nitrificação e o nitrogênio amoniacal (16,4 mg/L) é mantido, o que aumenta o valor do efluente para uso em ferti-irrigação.

CONCLUSÕES

Nas condições apresentadas, foram consistentemente alcançadas altas eficiências de tratamento em 2 sistemas com wetland de tipo Sistema Francês instalado e operado em condições reais. A eficiência do Fito Filtro, como primeiro estágio, foi constantemente cerca de 90% para DBO, DQO, SS, e a turbidez foi mantida entre 10 e 100 NTU. Isso demonstra um altíssimo potencial do Fito Filtro como estágio único para uso na universalização do saneamento, resolvendo o problema do lodo primário, que é um dos problemas mais críticos em tratamentos de pequenas unidades. O lodo primário foi armazenado com ciclos de 15 anos ou mais no filtro, com eficiente estabilização do lodo. É importante ressaltar que, no caso do sistema francês em escala real de Chinha, o período de remoção desse lodo foi de somente a cada 24 anos.

Em relação à aplicação para reuso, é importante destacar que, embora uma boa quantidade de ovos de helmintos tenha sido eliminada pelo Fito Filtro, sua retenção segura não foi alcançada, e uma concentração ainda elevada de bactérias coliformes foi observada, ultrapassando 10^6 NMP/100 ml. O mecanismo de retenção de parâmetros microbiológicos no Fito Filtro não parece estar relacionado à altura ou às características da camada de lodo depositada em sua superfície. Embora não seja possível descartar a possibilidade de acúmulo na camada de lodo, eles também podem ser filtrados ou sedimentados no fundo do filtro.

Como pós-tratamento do efluente do Fito Filtro, tanto o wetland de fluxo vertical quanto o de fluxo horizontal alcançaram alta eficiência de tratamento, com retenção completa de ovos de helmintos e redução significativa de coliformes fecais, atingindo valores entre 10^3 e 10^4 NMP/100 ml no wetland de fluxo vertical e 10^5 NMP/100 ml no wetland de fluxo horizontal. Embora o wetland de tratamento de fluxo horizontal tenha uma eficiência ligeiramente menor, apresenta outras vantagens, como uma melhor manutenção de nutrientes no efluente. Além disso, o uso de brita como material do filtro no wetland de fluxo horizontal pode resultar em custos mais baixos em comparação com o wetland de fluxo vertical, que requer areia grossa.

Para cumprir as exigências da CONAMA 430 e as exigências estaduais mais rigorosas, o Fito Filtro Francês como tratamento único tem demonstrado ser eficaz e possui um alto potencial de implementação em ETEs de até 30 L/s no Brasil. Essa tecnologia combina alta eficiência com custos operacionais baixos, sendo consideravelmente superior às tecnologias convencionais utilizadas nesse contexto. No entanto, no caso de buscar o reuso do efluente, sua excelente eficiência também permite considerar opções mais simples para o pós-tratamento. Por exemplo, em casos de lagoas de tratamento existentes, saturadas ou sobrecarregadas, a Célula Francesa pode substituir a primeira etapa, aproveitando as lagoas remanescentes como pós-tratamento.

Por fim, é importante destacar uma solução inovadora que não foi discutida no presente artigo: a opção promissora de utilizar o Fito Filtro operado com filtro de brita saturado e aerado com compressores de ar. Essa abordagem mantém a mesma ocupação da área e aproveita a excelente característica de retenção de lodo na superfície, garantindo uma eficiência com valores inferiores a 20 mg/L de DBO₅ no efluente e uma completa nitrificação a partir do tratamento de esgoto bruto em um único estágio "intensificado".

Essas opções mencionadas demonstram a variedade de alternativas disponíveis no setor de wetlands, que está em constante expansão devido à alta demanda por sistemas baseados na natureza, oferecendo oportunidades significativas para a universalização e sua implementação e adaptação no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. *Resolução CONAMA N° 430 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA*. Brasil 2011.
2. DOTRO, G., LANGERGRABER, G., MOLLE, P., NIVALA, J., PUIGAGUT, J., STEIN, O., VON SPERLING, M. *Treatment Wetlands*. 2017. 172 ISBN 9781780408774. Disponível em: <<https://iwaponline.com/ebooks/book/330/Treatment-Wetlands>>.
3. GUEVARA, V. B., MIGLIO, T. R., LEÓN, M. V., HOFFMANN, H., VELA, C. R. *Comparación entre un humedal artificial de flujo vertical y un humedal horizontal para el tratamiento del efluente de la primera etapa del sistema francés, bajo condiciones climáticas cálidas*. V. Conferencia Panamericana de Humedales. Florianópolis, Brasil: GESAD 2020.

4. HOFFMANN, H., GAMARRA, J., VILLAFRANCA, B., PLATZER, C. J. *Combinação de tratamento primário e secundário de esgoto em sistema de filtros plantados como solução descentralizada de alta eficiência e baixo custo operacional*. 1º Simpósio Brasileiro sobre aplicação de Wetlands no tratamento de águas residuais. Florianópolis, Brasil: GESAD 2013.
5. HOFFMANN, H., R., M., D., S., B., G., S., L. T. *The potential of the French Wetland System for reuse - results of a long-term project in the Peruvian arid coastal area* IWA 17th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Lyon, França: IWA 2022.
6. LATUNE, R. L., MOLLE, P. *Les filtres plantés de végétaux pour le traitement des eaux usées domestiques en milieu tropical. Guide de dimensionnement de la filière tropicalisée*. OFB, p. 75, 2017. Disponível em: < <https://hal.inrae.fr/hal-02606940/document> >.
7. LEÓN, M. V. A., HÖLLMANN, M., HOFFMANN, H., MIGLIO, T. R., LOOSE, D. *Comparison of strategies to fit raw water treatment in French system for water reuse purposes in warm climate conditions*. 16. IWA Specialist Conference on Wetland Systems. Valencia, Espanha: IWA 2018.
8. MOLLE, P., LATUNE, R. L., RIEGEL, C., LACOMBE, G., ESSER, D., MANGEOT, L. *French vertical-flow constructed wetland design: adaptations for tropical climates*. Water Sci Technol, v. 71, n. 10, p. 1516-23, 2015. ISSN 0273-1223 (Print).
9. MOLLE, P., LIÉNARD, A., BOUTIN, C., MERLIN, G., IWEMA, A. *How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems*. Water Science and Technology, v. 51, n. 9, p. 11-21, 2005. ISSN 0273-1223.
10. MORVANNOU, A., FORQUET, N., MICHEL, S., TROESCH, S., MOLLE, P. *Treatment performances of French constructed wetlands: results from a database collected over the last 30 years*. Water Sci Technol, v. 71, n. 9, p. 1333-9, 2015. ISSN 0273-1223 (Print). Disponível em: < <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25945849> >.
11. PLATZER, C., HOFFMANN, H., MIGLIO, R. *Long term experiences with dimensioning and operation of vertical flow constructed wetlands in warm climate regions of South America*. IWA Specialist Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Gedansk, Polónia: IWA 2016.
12. TREIN, C. M., ANDRADE MORAES, M. A., VON SPERLING, M. *Wetlands construídos de escoamento vertical (modelo francês) adaptados à realidade brasileira para o tratamento de esgoto de pequenas comunidades*. In: SEZERINO, P. H. e PELISSARI, C. (Ed.). *Wetlands construídos como ecotecnologia para o tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras*. 1ª edição. Curitiba: Brazil Publishing, 2021. cap. 5, p.175. ISBN 978-65-5861-293-3.
13. VON SPERLING, M., PLATZER, C. *Treatment wetlands in developing regions*. In: LANGERGRABER, G., DOTRO, G., NIVALA, J., RIZZO, A. e STEIN, O. R. (Ed.). *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*: IWA Publishing, 2019. cap. 4.2, p.18 - 22. ISBN 9781789060171.
14. VON SPERLING, M., SEZERINO, P. H. *Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil*. Boletim Wetlands Brasil, p. 65, 2018. ISSN 2359-0548. Disponível em: < <http://gesad.ufsc.br/boletins/> >.
15. WHO. *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture : measures for public health protection*. World Health Organization & United Nations Environment Programme, 1989. ISBN 9241542489.
16. WHO. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture and aquaculture*. Geneva: World Health Organization, 2006. ISBN 9241546867 (set). Disponível em: < <https://apps.who.int/iris/handle/10665/78265> >.