

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SISTEMA HÍBRIDO COM WETLANDS CONSTRUÍDOS NA ETE DE CAMPO DO MEIO – MG

Leticia Daniele Puras¹; Tatsuo Shubo²

Abstract: This study evaluates the performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSF-CW) system at Campo do Meio WWTP, Minas Gerais, Brazil. Operational data (2023-2024) assessed parameters including BOD, COD, TSS, E. coli, and pH. Results show removal efficiencies of >99.5% (BOD) and 81% (COD), with effluent compliant with CONAMA Resolution 430/2011. The system's low energy demand (0.1 kWh/m³), minimal maintenance, and 90% cost savings compared to activated sludge highlight its viability for small-scale sustainable sanitation.

Resumo: Este estudo avalia a eficiência de wetlands construídos de fluxo subsuperficial horizontal (WCFSH) na ETE Campo do Meio (MG). Dados operacionais (2023-2024) indicam remoções de >99,5% (DBO) e 81% (DQO), atendendo à Resolução CONAMA 430/2011. O sistema apresenta baixo consumo energético (0,1 kWh/m³), manutenção simplificada e economia de 90% frente a lodos ativados, reforçando sua aplicabilidade em saneamento sustentável para pequenos municípios.

Palavras-Chave – Wetlands construídos; tratamento de esgoto; sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Durante o século passado, a lógica desenvolvimentista focou as ações de saneamento nos grandes centros, utilizando tecnologias que dependem investimentos vultuosos e de grandes quantidades de energia para o tratamento, como é o caso dos lodos ativados. Assim, em termos de universalização do saneamento, as áreas rurais e os municípios de pequeno porte, por não terem capacidade de pago, foram deixados à margem das políticas públicas, afetando a saúde e o bem estar destas populações (Saúde, 2019).

A universalização do saneamento básico ainda representa um dos principais desafios enfrentados pelos municípios de pequeno porte no Brasil. As limitações orçamentárias, a baixa capacidade técnica instalada e os elevados custos de implantação e operação dos sistemas convencionais, tornam a busca por soluções alternativas uma prioridade nas agendas locais. Neste cenário, as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) se apresentam como soluções viáveis, técnica e economicamente.

Lagoas anaeróbias

As lagoas anaeróbias são unidades de tratamento biológico utilizadas para reduzir a carga orgânica de esgotos domésticos através da decomposição biológica da matéria orgânica presente no esgoto, realizada por microrganismos anaeróbios. Neste processo, as eficiências na remoção da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e de Sólidos em Suspensão (SS) podem chegar a 60% de redução.

1) Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca – ENSP/FIOCRUZ, Rua Leopoldo Bulhões, 1480, Manguinhos, CEP 21041-210, Rio de Janeiro – RJ, Brasil. Fone: (21) 2598-2000, Fax: —, e-mail: leticia.puras@aluno.fiocruz.br

2) Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental da Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca – ENSP/FIOCRUZ, R. Leopoldo Bulhões, 1480, Manguinhos, CEP 21041-210, Rio de Janeiro – RJ, Brasil. Fone: (21) 2598-2469 / (21) 99921-0149, Fax: —, e-mail: tatsuo.shubo@fiocruz.br

Sua manutenção é simples, sendo basicamente focada na remoção do lodo acumulado no fundo. Contudo a remoção de nutrientes é baixa e requer tratamento complementar.

A simplicidade do sistema e os baixos custos de implantação e operação tornam as lagoas anaeróbias uma opção popular, especialmente em áreas rurais ou com infraestrutura limitada.

Zonas de Raízes ou Wetlands Construídos

As **Zonas de Raízes** (ZR) são sistemas de tratamento de esgotos concebidos com a lógica de reproduzir de forma controlada processos naturais de degradação da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, que ocorrem em áreas alagadas como manguezais, charcos e pântanos. Esses sistemas são capazes de tratar diversos tipos de efluentes, incluindo os industriais e agrícolas, podendo também ser utilizados para controle de enchentes e de poluição difusa, quando associados à drenagem. Dentre as principais vantagens das ZRs aplicadas ao tratamento de esgotos, podemos destacar sua operação simplificada, baixo custo de implementação de operação, alta eficiência de tratamento e resiliência às variações de cargas do sistema (Al, 2019).

Via de regra, as ZRs são divididas em função do sentido do escoamento do esgoto dentro do sistema, podendo ser ZR de escoamento horizontal subsuperficial, ZR de escoamento vertical, ambos recebendo efluente pré-tratado, e Sistema Francês, que recebe esgoto bruto, tratando o efluente por escoamento vertical.

As ZRs construídas de fluxo subsuperficial horizontal (WCFSH), em particular, têm demonstrado resultados promissores em termos de remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e organismos patogênicos, necessidade mínima de manutenção e elevada capacidade de integração com o ambiente. Esses sistemas configuram-se como alternativas viáveis e sustentáveis, especialmente para localidades de pequeno porte e zonas rurais, promovendo a descentralização e democratização do acesso ao saneamento (Al, 2019); (Kadlec; Wallace, 2009).

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de um sistema híbrido de tratamento de esgoto implantado na **Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Campo do Meio**, localizada no estado de Minas Gerais. O município possui uma população de 11.377 habitantes (IBGE, 2022) e conta com um sistema que trata **100% do esgoto gerado na área urbana**.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O desempenho do sistema foi avaliado com base em dados operacionais e laboratoriais dos anos de 2023 e 2024, com foco na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST), *Escherichia coli* e estabilidade do pH, sendo os resultados comparados aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011. A análise visa contribuir com evidências técnicas para a adoção de soluções sustentáveis e replicáveis em contextos semelhantes.

2.1. Caracterização do Sistema

O sistema de tratamento de esgoto analisado está localizado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município de Campo do Meio, Minas Gerais ($21^{\circ}06'03.33''$ S, $45^{\circ}49'11.19''$ O). Trata-se de um sistema híbrido configurado da seguinte forma:

- **Pré-tratamento físico:** composto por gradeamento e caixa de areia, destinado à remoção de sólidos grosseiros.
- **Lagoas de estabilização em série (Figura 1):**
 - *Lagoa anaeróbia:* responsável pela redução inicial da carga orgânica por meio de processos anaeróbios.
 - *Lagoa facultativa:* complementa o tratamento biológico, promovendo a estabilização adicional da matéria orgânica.



Figura 1 – Lagoas de estabilização em série da ETE Campo do Meio (MG).

- **Zona de Raízes de fluxo subsuperficial horizontal (WCFSH):** atua como etapa final de polimento, consistindo em um leito filtrante com meio granular (areia e brita) e cobertura vegetal com macrófitas, promovendo remoção eficiente de DBO, DQO, sólidos e microrganismos patogênicos.

As principais características técnicas do sistema estão descritas na Tabela 1. Já a Figura 2, apresenta uma foto aérea da ETE de Campo do Meio, sendo possível observar sua configuração.

Tabela 1 – Caracterização técnica da ETE Campo do Meio

Item	Descrição
Tipo de sistema	Zona de Raízes de fluxo subsuperficial horizontal (WCFSH)
Vazão média	30,68 L/s ($\approx 2.650 \text{ m}^3/\text{dia}$)
Área total do sistema	2.800 m ²
Tempo de detenção hidráulica (TDH)	2 a 3 dias
Meio filtrante	Areia e brita
Espécies vegetais utilizadas	<i>Typha domingensis</i> e <i>Urochloa humidicola</i> (braquiária humidícola)



Figura 2 – Vista geral aérea do sistema de tratamento da ETE Campo do Meio (MG).



Figura 3 – Canaletas por onde chega o esgoto proveniente das estações elevatórias.



Figura 4 – Vista da primeira lagoa de estabilização responsável pelo início do tratamento biológico dos efluentes.



Figura 5 – Segunda lagoa de estabilização, anterior ao sistema de filtragem nas wetlands.



Figura 5 – Área de filtração com plantas macrófitas, composta por *Typha domingensis* e *Urochloa humidicola* (braquiária humidícola), responsáveis pela etapa final de polimento do efluente.

2.2. Parâmetros Analisados

Foram analisados dados laboratoriais referentes ao período de janeiro de 2023 a abril de 2024, obtidos por meio de coletas sistemáticas nos pontos de entrada e saída do sistema de tratamento. As análises foram realizadas pela empresa Mesquita Análises Laboratoriais, credenciada e sediada em Alfenas/MG.

2.3. Métodos Analíticos

As análises laboratoriais seguiram metodologias padronizadas, baseadas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), e foram executadas pela empresa Mesquita Análises Laboratoriais. Os procedimentos utilizados incluem:

- DBO e DQO: determinação conforme APHA (2017).
- SST: quantificação por gravimetria após filtração em membrana.
- E. coli: estimativa por Número Mais Provável (NMP), utilizando o método Colilert®.
- pH: medição por potenciometria com eletrodo de vidro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias dos resultados dos principais parâmetros analisados nos afluentes e efluentes e os percentuais de remoção são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados analíticos de afluente e efluente da ETE Campo do Meio (2023–2024)

Parâmetro	Afluente	Efluente	Remoção (%)
DBO (mg/L)	220	<1	>99,5%
DQO (mg/L)	690	130	81%
Sólidos Suspensos Totais (SST, mg/L)	25	<1	>96%
Escherichia coli (NMP/100 mL)	$2,5 \times 10^5$	$1,5 \times 10^1$	>99,9%
pH	6,5 – 7,5	6,8 – 7,2	Dentro da faixa permitida (CONAMA 430/2011)

3.1. Eficiência de Remoção

Os resultados laboratoriais obtidos entre 2023 e 2024 demonstram que o sistema híbrido implantado na ETE de Campo do Meio apresentou elevada eficiência na remoção de cargas poluidoras. A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) foi reduzida de 220 mg/L no afluente para valores inferiores a 1 mg/L no efluente, representando uma eficiência superior a 99,5%, superando com ampla margem os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) apresentou redução de 690 mg/L para 130 mg/L, com remoção de 81%, resultado acima da meta mínima recomendada de 70% para efluentes tratados.

Os Sólidos Suspensos Totais (SST) também apresentaram excelente desempenho, com concentração reduzida de 25 mg/L para menos de 1 mg/L, o que representa uma eficiência de remoção superior a 96%.

Quanto à remoção microbiológica, observou-se uma expressiva redução nos valores de Escherichia coli, de $2,5 \times 10^5$ NMP/100 mL no afluente para $1,5 \times 10^1$ NMP/100 mL no efluente, correspondendo a uma eficiência superior a 99,9%.

O parâmetro pH manteve-se estável e dentro da faixa permitida para lançamento, variando de 6,8 a 7,2 no efluente final, indicando estabilidade química do sistema.

Esses resultados indicam que o sistema híbrido WCFSH + lagoas de estabilização é eficaz não apenas na remoção de matéria orgânica e sólidos, mas também no controle de patógenos, assegurando a qualidade ambiental do corpo receptor.

3.2. Comparativo com Tecnologias Convencionais

Quando comparado a sistemas convencionais de lodos ativados, o arranjo híbrido adotado em Campo do Meio demonstrou vantagens significativas. Além de apresentar eficiências equivalentes ou superiores, o sistema requer menor demanda energética ($\approx 0,1$ kWh/m³), baixa complexidade operacional e menor custo de implantação e manutenção, o que o torna altamente apropriado para municípios de pequeno porte.

Em relação ao consumo energético anual, o levantamento de contas da concessionária CEMIG referente ao ano de 2024 indicou um gasto total de R\$ 19.230,56, considerando todas as unidades vinculadas ao SAAE. A média mensal foi de R\$ 1.012,14. Cabe destacar que **não há consumo de energia elétrica nas unidades de tratamento da ETE em si**, estando os gastos concentrados no funcionamento das bombas que direcionam o esgoto às elevatórias, o que contribui para a baixa demanda energética global do sistema.

No que se refere à manutenção do sistema, a principal atividade de manejo consiste na roçada periódica das macrófitas utilizada na cobertura vegetal do leito filtrante. Essa operação visa evitar o sombreamento excessivo e a senescência acelerada das plantas, mantendo a eficiência do sistema. A biomassa vegetal excedente deve ser removida do leito preferencialmente a cada seis meses, evitando obstruções, excesso de nutrientes e a formação de zonas anóxicas indesejadas. Essa rotina de manutenção é realizada com mão de obra local e sem necessidade de equipamentos especializados, o que reforça o caráter de baixo custo e adaptabilidade da tecnologia em contextos de pequenos municípios.

Outro aspecto positivo é a resiliência operacional, com bom desempenho mesmo sob variações hidráulicas e cargas orgânicas flutuantes, que são comuns em pequenos sistemas descentralizados.

3.3. Conformidade Legal e Sustentabilidade

O efluente final atendeu integralmente aos padrões exigidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, tanto em parâmetros físico-químicos quanto microbiológicos. A incorporação de macrófitas nativas e adaptadas ao leito filtrante, como *Typha domingensis* e *Urochloa humidicola*, favoreceu o desempenho do sistema por meio do estímulo à atividade rizosférica, que intensifica a absorção de nutrientes, o fornecimento de oxigênio à zona radicular e a fixação de biofilmes microbianos.

Tais características posicionam as Zonas de Raízes como Soluções Baseadas na Natureza (SbN), alinhadas às diretrizes de sustentabilidade e ao Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), promovendo sinergia entre desempenho técnico e conservação ambiental.

3.4. Considerações Ambientais

Medições realizadas no corpo hídrico receptor, a jusante do ponto de lançamento, evidenciaram melhora na qualidade da água, com os seguintes resultados após o tratamento:

- DBO: 3 mg/L
- Oxigênio Dissolvido (OD): 5,97 mg/L
- E. coli: $1,5 \times 10^1$ NMP/100 mL

Esses dados indicam baixo impacto ambiental residual e reforçam o papel do sistema na recuperação e proteção de corpos d'água em áreas urbanas de pequeno porte.

A sinergia entre lagoas de estabilização e o WCFSH contribuiu para a elevada eficiência geral (>99% para os principais parâmetros), sendo que as lagoas são responsáveis por cerca de 60% da remoção da carga poluidora, viabilizando a etapa de polimento final no wetland.

REFERÊNCIAS

- AL, Pablo Heleno Sezerino et. **Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário.** [S.l.]: Copiart, 2019.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.* Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 maio 2011.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Campo do Meio – MG: panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/campo-do-meio.html>. Acesso em: 27 jun. 2025.
- KADLEC, Robert H.; WALLACE, Scott D. **Treatment wetlands.** 2nd ed ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- MESQUITA ANÁLISES LABORATORIAIS. *Relatórios técnicos de monitoramento da ETE Campo do Meio – MG (jan. 2023 a abr. 2024).* Alfenas, 2024.
- SAÚDE, Fundação Nacional de. **Programa Nacional de Saneamento Rural.** [S.l.]: Funasa, 2019.

AGRADECIMENTOS - Agradecemos ao SAAE de Campo do Meio pelo apoio técnico e pela disponibilização dos dados operacionais utilizados neste estudo.