

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL ALEXSANDER KORELO

CAPACIDADE MÁXIMA DE VAZÃO OPERACIONAL DE UM TANQUE DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE BANCADA CULTIVADO COM SAMAMBAIA
(*Nephrolepis exaltata*) EM AMBIENTE DE CULTIVO PROTEGIDO

PONTA GROSSA

2024

GABRIEL ALEXSANDER KORELO

CAPACIDADE MÁXIMA DE VAZÃO OPERACIONAL DE UM TANQUE DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE BANCADA CULTIVADO COM SAMAMBAIA
(*Nephrolepis exaltata*) EM AMBIENTE DE CULTIVO PROTEGIDO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Magdalena
Ribas Döll

PONTA GROSSA

2024

GABRIEL ALEXSANDER KORELO

CAPACIDADE MÁXIMA DE VAZÃO OPERACIONAL DE UM TANQUE DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE BANCADA CULTIVADO COM SAMAMBAIA
(*Nephrolepis exaltata*) EM AMBIENTE DE CULTIVO PROTEGIDO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Magdalena Ribas Döll

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Guilherme Araújo Vuitik

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Eng. Kaio Gustavo Gomes

Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP)

Ponta Grossa, ____ de _____ de 2024

AGRADECIMENTO

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria Magdalena Ribas Döll, por toda a orientação, dedicação, atenção e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho e durante a graduação.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Guilherme Araújo Vuitik e Eng. Kaio Gustavo Gomes, pelo aceite ao convite e por todas as sugestões e colaborações para este trabalho.

À UEPG (Universidade Estadual de Ponta Grossa), pela disponibilização dos meios e espaço do Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil para a realização deste trabalho.

À Simepar (Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná), pela disponibilização dos dados meteorológicos para esta pesquisa.

Aos meus amigos, Elaine, Flávia, Grasielle, Gustavo do Prado e Gustavo Brassanini, que me acompanharam e auxiliaram durante toda a graduação.

À minha família, por todo o apoio e incentivo durante esta jornada. Em especial à minha namorada, Nicole, por todo apoio e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho e no decorrer da graduação. À minha tia, Jônia, que me incentivou, auxiliou e proporcionou as condições para estudar.

RESUMO

KORELO, Gabriel Alexsander. **Capacidade máxima de vazão operacional de um tanque de evapotranspiração de bancada cultivado com samambaia (*Nephrolepis exaltata*) em ambiente de cultivo protegido.** Orientador: Maria Magdalena Ribas Döll. Ponta Grossa, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2024.

O tanque de evapotranspiração é uma tecnologia que se apresenta como alternativa ao tratamento convencional de esgoto, tendo como principais vantagens a sua facilidade de implantação e operação, baixo custo, desempenho para tratamento de águas residuárias domésticas, sendo uma de suas maiores vantagens a emissão zero de efluente final devido ao processo de evapotranspiração das águas pelas plantas. Os métodos comuns de dimensionamento deste tanque não indicam a vazão de operação limite para evitar a acumulação hídrica excessiva ou o extravasamento do tanque. Este trabalho objetivou verificar a capacidade máxima de vazão operacional de um tanque de evapotranspiração de bancada cultivado com espécie de samambaia (*Nephrolepis exaltata*) em condições ambientais de cultivo protegido, ou seja, sem a incidência direta do sol e ausência de precipitação. Foram aplicadas diferentes e crescentes vazões de entrada de água potável até a vazão limite para a acumulação de água ou extravasamento do tanque com monitoramento da temperatura e umidade relativa do ambiente. Como resultados, observou-se que o sistema foi capaz de operar com vazão de 250 mL.d^{-1} , ou taxa de aplicação superficial de $3,33 \text{ mm.d}^{-1}$ sem a acumulação de água da camada de solo. Houve a acumulação de água na camada de solo até o ponto de encharcamento com a vazão de $312,5 \text{ mL.d}^{-1}$, ou taxa de aplicação superficial de $4,16 \text{ mm.d}^{-1}$, verificada visualmente e com o ensaio de umidade solo que indicou que a capacidade máxima de vazão do sistema foi a de 250 mL.d^{-1} . O sistema apresentou capacidade de receber vazão sem a ocorrência de acumulação de água no solo inferior ao de outros sistemas de evapotranspiração presentes na literatura, que utilizam comumente a cultura de taioba (*Xanthosoma sagittifolium* (L.)) ou a bananeira (*Musa sp*), com taxa de aplicação superficial em cerca de $7,76 \text{ mm.d}^{-1}$. Apesar disso, o sistema apresentou a capacidade de realizar a evapotranspiração em ambiente de cultivo protegido, sendo necessários mais estudos em ambientes externos.

Palavras-chave: tanque de evapotranspiração; acumulação de água do solo; esgoto doméstico; samambaia.

ABSTRACT

KORELO, Gabriel Alexsander. **Maximum operational flow capacity of a benchtop evapotranspiration tank cultivated with fern (*Nephrolepis exaltata*) in a protected cultivation environment.** Advisor: Maria Magdalena Ribas Döll. Ponta Grossa, 2024. Course Completion Work (Bachelor of Civil Engineering) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2024.

The evapotranspiration tank is a technology that presents itself as an alternative to conventional sewage treatment, with its main advantages being its ease of implementation and operation, low cost, performance for treating domestic wastewater, one of its biggest advantages being zero emissions. of final effluent due to the process of water evapotranspiration by plants. Common methods for sizing this tank do not indicate the limit operating flow to avoid excessive water accumulation or overflow of the tank. This work aimed to verify the maximum operational flow capacity of a benchtop evapotranspiration tank cultivated with a fern species (*Nephrolepis exaltata*) in environmental conditions of protected cultivation, that is, without direct sunlight and absence of precipitation. Different and increasing inflows of drinking water were applied up to the limit flow for water accumulation or overflow from the tank with monitoring of the temperature and relative humidity of the environment. As a result, it was observed that the system was capable of operating with a flow rate of 250 mL.d^{-1} , or a superficial application rate of $3,33 \text{ mm.d}^{-1}$ without the accumulation of water in the layer of soil. There was an accumulation of water in the soil layer up to the point of flooding with a flow rate of $312,5 \text{ mL.d}^{-1}$, or surface application rate of $4,16 \text{ mm.d}^{-1}$, visually verified and with the soil moisture test which indicated that the maximum flow capacity of the system was 250 mL.d^{-1} . The system presented a capacity to receive flow without the occurrence of water accumulation in the soil lower than that of other evapotranspiration systems present in the literature, which commonly use the culture of taioba (*Xanthosoma sagittifolium* (L.)) or banana (*Musa sp*), with a superficial application rate of around 7.76 mm.d^{-1} . Despite this, the system presented the ability to perform evapotranspiration in a protected cultivation environment, requiring further studies in external environments.

Keywords: evapotranspiration tank; accumulation of water in the soil; domestic sewage; fern.

LISTAS DE FIGURA

Figura 1 - Fluxograma de uma ETE baseado no tratamento aeróbio por lodos ativados	15
Figura 2 - Tanque de Evapotranspiração e suas camadas	17
Figura 3 - Bananeira (<i>Musa sp</i>).....	21
Figura 4 - Taioba (<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.))	21
Figura 5 - Desenho esquemático da fossa verde (seção transversal) incluindo setas indicativas do fluxo do esgoto dentro da estrutura séptica considerando entrada e saídas para o balanço hídrico.	25
Figura 6 - Vista superior e lateral do TEvap de bancada montado e em operação...27	
Figura 7 - Solo classe A comercial utilizado como camada do topo do TEvap e suas características	28
Figura 8 - Determinação do volume de vazios do solo experimentalmente.	29
Figura 9 - Mini samambaia (<i>Nephrolepis exaltata</i>) cultivada no TEvap.....	30
Figura 10 – Foto da vista superior do tanque de controle de bancada para monitoramento da evaporação local.	31
Figura 11 - Termo-higrômetro digital utilizado para monitorar as condições ambientais no laboratório.	32
Figura 12 - Localização Laboratório de Saneamento da UEPG e da estação do Simepar cód. ANA: 2550071	33
Figura 13 - Aparato experimental utilizado no trabalho	37
Figura 14 - Camada de solo não saturada na fase 1	38
Figura 15 - Camada de solo não saturada na fase 2	38
Figura 16 - Camada de solo não saturada na fase 3	39
Figura 17 - Camada de solo saturada na fase 4	39
Figura 18 – Gráfico 1: Temperatura ambiente e umidade relativa do ar, medidas em laboratório no período de 04/09/2024 a 09/10/2024.....	42
Figura 19 – Gráfico 2: Dados umidade relativa média do ar e temperatura média do ar da Estação da Simepar cód ANA:2550071 entre o período de 01/09/2024 a 09/10/2024.	42
Figura 20 - Gráfico 3: TAS de operação do TEvap e evaporação do ambiente do período de 04/09/2024 a 09/10/2024	43
Figura 21 - Gráfico 4: Teor de umidade da camada de solo do TEvap	47

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Fases e condições operacionais do sistema do TEvap durante o experimento.....	34
Tabela 2 – Condições ambientais monitoradas no laboratório no período de 04/09/2024 a 09/10/2024	40
Tabela 3 - Dados meteorológicos da Estação da Simepar cód ANA:2550071 entre o período de 01/09/2024 a 09/10/2024.	41
Tabela 4 – Comparação dos valores médios dos dados de laboratório e dados da estação Simepar	44
Tabela 5 - Balanço hídrico do TEvap em cada fase de operação do sistema.....	45
Tabela 6 - Coeficiente de evapotranspiração do TEvap.....	45
Tabela 7 - Valores de coeficiente de cultura (estimado para a samambaia) obtidos experimentalmente.....	46
Tabela 8 - Valores de evapotranspiração de cultura com coeficiente teórico de grama.	46

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1 - Coeficientes de cultura Kc teóricos	24
Quadro 2 - Métodos de cálculo da evapotranspiração	24
Quadro 3 - Variáveis experimentais na operação do TEvap	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVOS GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS	14
3.2	SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO POR TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	16
3.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TEVAP	17
3.4	CONSTRUÇÃO E PREENCHIMENTO	19
3.5	ESPÉCIES VEGETAIS CULTIVADAS NO TEVAP	20
3.6	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	22
3.7	BALANÇO HÍDRICO	24
4	METODOLOGIA	26
4.1	TEVAP DE BANCADA	26
4.2	ESPÉCIES VEGETAIS UTILIZADAS NO TEVAP	29
4.3	OPERAÇÃO DO TEVAP	30
4.4	FASES EXPERIMENTAIS	33
4.5	ESTIMATIVA DE BALANÇO HÍDRICO	35
4.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38

5.1	OBSERVAÇÕES DO TEVAP SUBMETIDO A DIFERENTES VAZÕES E TAXAS DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL.....	38
5.2	MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS.....	40
5.3	BALANÇO HÍDRICO DO TEVAP	44
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
6	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico impacta diretamente na qualidade dos recursos hídricos, considerados essenciais à vida. A qualidade dos recursos hídricos influencia a sociedade tanto no âmbito econômico, quanto na saúde da população, além da preservação de ecossistemas, essencial para a sobrevivência das espécies (Benjamin, 2013).

A busca por soluções e técnicas alternativas para o tratamento de esgoto doméstico mostra-se fundamental para os problemas relacionados às áreas da saúde da população que não tem coleta e afastamento de esgoto sanitário, turismo rural, educação e preservação ambiental.

Um dos maiores desafios é fornecer integralmente à população a coleta e tratamento adequado do esgoto, a busca por alternativas técnica e economicamente viáveis para a aumentar a abrangência deste serviço é necessária, sendo uma delas o tanque de evapotranspiração (TEvap) que vem sendo utilizado há décadas como um sistema de tratamento e sumidouro de águas cinzas e negras domésticas em meio rural onde não há rede coletora de esgoto (Vymazal; Kröpfelová, 2009) (Paulo *et al.*, 2019).

A técnica é composta por um tanque impermeabilizado, preenchido com diferentes camadas de substrato e plantio com espécies vegetais de folhas largas, crescimento rápido e alta demanda por água, tais como a bananeira (Oliveira *et al.*, 2018), a taioba (Venturi, 2004), entre outras espécies.

A operação deste sistema é operada empiricamente de forma que o efluente seja tratado por um tempo de detenção hidráulica até evapotranspirar, sem a emissão de um efluente final.

Para tanto, a operação deve ser monitorada a partir do controle de vazão de entrada e a capacidade e eficiência em evapotranspirar todo o efluente do tanque, que é diretamente influenciada pelo seu volume e espécies de vegetais adotadas no projeto. Para tal, a análise de balanço hídrico e capacidade de tratamento de efluente sem que haja a verificação de excesso de água, observado visualmente, e até mesmo seu encharcamento se torna necessária.

Quando o solo está saturado, a água começa a se acumular, o que pode prejudicar as plantas e os microrganismos do solo. Além disso, a falta de espaço para a água infiltrar-se pode levar ao encharcamento, o que diminui a quantidade de oxigênio disponível para as raízes das plantas.

O sistema de tratamento a partir do TEvap é um tema presente na literatura científica, (Paulo e Bernardes, 2004; Galbiati, 2009; Oliveira *et al.*, 2018), porém com lacunas sobre métodos de dimensionamento, montagem e operação provavelmente devido à ausência de norma técnica específica para este sistema.

Assim, buscou-se neste trabalho avaliar a operação de um TEvap de bancada, submetido a vazões gradualmente crescentes, sendo cultivada com a planta *Nephrolepis exaltata*, uma espécie de samambaia que ainda não possui estudos realizados nestes sistemas em ambiente de baixa insolação e ausência de precipitação.

Esta espécie de samambaia tem alta demanda hídrica e adequada para regiões de clima tropical subtropical (Barros *et al.*, 2006; Zuquim *et al.*, 2008), promovendo a evapotranspiração da água mais rapidamente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a capacidade máxima de vazão de entrada e taxa de aplicação superficial (TAS) operacional de um tanque de evapotranspiração de bancada cultivado com samambaia (*Nephrolepis exaltata*) em ambiente de cultivo protegido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar a capacidade limite de operação do TEvap em diferentes vazões de entrada e taxas de aplicação superficial, sem que ocorra a acumulação de água no solo e o extravasamento de água potável em um TEvap em escala de bancada.

Estimar o balanço hídrico em diferentes vazões de entrada e taxas de aplicação superficial de um TEvap em ambiente protegido.

Avaliar a influência e eficiência de evapotranspiração da planta *Nephrolepis exaltata* utilizada na operação do TEvap, na evapotranspiração no sistema cultivado em ambiente protegido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS

A literatura científica indica que os sistemas convencionais de tratamento de efluentes, mais comumente difundidos são as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) onde o efluente é recebido, centralizado, tratado, com disposição do efluente final em corpos de água (Von Sperling, 2014).

Uma alternativa para suprir a deficiência dos sistemas convencionais é a segregação de esgotos sanitários em sua origem, simplificando assim o tratamento dos mesmos, como indica Oliveira *et al.* (2018). O esgoto doméstico pode ser classificado em duas principais classes: águas cinzas e negras.

As águas cinzas são provenientes de pias, chuveiros e lavanderias, que podem ser reutilizadas. E as águas negras são provenientes do esgoto sanitário, contendo água, urina e fezes, possuindo deste modo, maior concentração de patógenos (Rezende, 2019).

Neste sentido, a busca por soluções alternativas para o tratamento de esgoto com elevados teores patógenos se torna necessária para a preservação de recursos hídricos e da qualidade de vida da população.

Em um sistema convencional de tratamento de esgoto, o tratamento preliminar é a primeira etapa do processo. Segundo Silva (2019), este tipo de tratamento visa remover os sólidos de grande granulometria, de forma física, por meio da utilização de grades e desarenadores ou caixas de areia.

Após as unidades de tratamento preliminar, o efluente pode passar por uma unidade de sedimentação (decantador primário) ou de flotação para a remoção de sólidos sedimentáveis. A etapa de tratamento primário tem como principal objetivo reduzir a velocidade das águas caudais para que os sólidos possam sedimentar, como afirma Gazola *et al.* (2020).

Completada a etapa do tratamento primário, o esgoto segue para o tratamento secundário. Gazola *et al.* (2020) explicam que o tratamento secundário tem por objetivo a remoção da matéria orgânica, podendo estar presente em forma dissolvida ou ainda em suspensão.

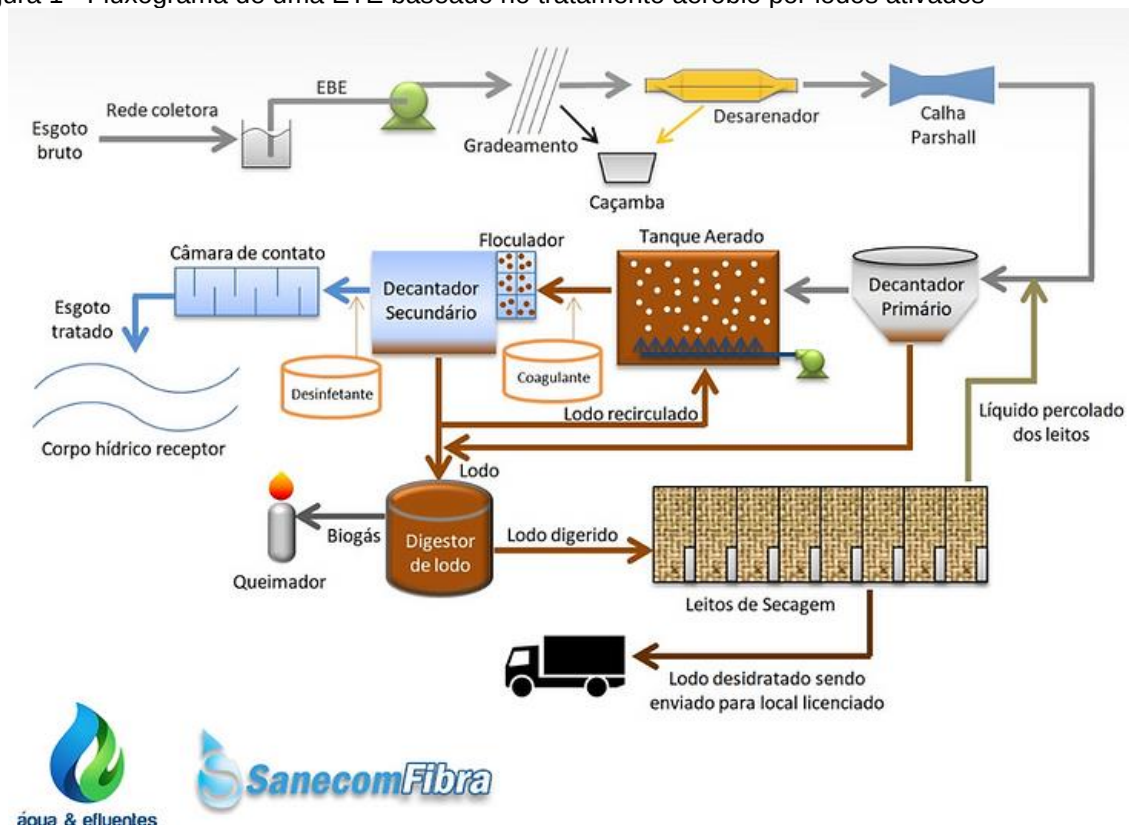
O processo de tratamento é realizado por meio de reações bioquímicas efetivadas por microrganismos aeróbios ou anaeróbios, que convertem os sólidos orgânicos em sólidos inorgânicos ou orgânicos estáveis e ainda em produtos líquidos

e gasosos, permitindo a remoção da maior parte da matéria orgânica biodegradável, de forma controlada (Braga *et al.*, 2023).

Os métodos mais comuns adotados para o tratamento secundário são: lagoas de estabilização, reatores anaeróbios ou aeróbios com biofilmes, lodos ativados, e lagoas ou canais artificiais (Braga *et al.*, 2023)

Uma vez que o efluente completou o tratamento secundário ele pode prosseguir para o corpo d'água de destino ou passar pelo tratamento terciário, que objetiva a remoção complementar de matéria orgânica e compostos não biodegradáveis, poluentes tóxicos, nutrientes, patógenos, sólidos inorgânicos dissolvidos e em suspensão ou desinfecção do efluente oriundo do tratamento secundário (Gazola *et al.*, 2020). O fluxograma destas etapas que compõem uma ETE convencional pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de uma ETE baseado no tratamento aeróbio por lodos ativados



Fonte: Água e efluentes (2020).

O trabalho de Gazola *et al.* (2020) ainda apresenta alternativas de processos que são frequentemente adotados como: coagulação química, floculação e sedimentação seguido de filtração e carvão ativado, troca iônica ou osmose reversa.

Do mesmo modo, o tanque de evapotranspiração (TEvap) surge como uma solução tecnológica não convencional para o tratamento de efluentes, destacando-se pela simplicidade de operação e baixo custo.

3.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO POR TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O tanque de evapotranspiração (TEvap) é uma tecnologia não convencional de tratamento de efluente, bastante difundida e com características promissoras, como o baixo custo, facilidade operacional e de instalação, com a implantação e operação possível tanto em áreas urbanas, quanto rurais (Paulo; Bernardes, 2004; Galbiati, 2009).

Este sistema é composto por tanque impermeabilizado, preenchido com diferentes camadas de materiais, como: resíduos da construção e demolição (RCD) ou resíduos da construção civil (RCC), brita, manta geotêxtil, areia e solo. E, ainda na camada superior que é o solo há o plantio de espécies vegetais de crescimento rápido e elevada demanda por água (Galbiati, 2009).

O TEvap pode ser construído para tratar águas negras ou águas cinzas, que ocorre por meio da ação microbiana anaeróbia, promovendo a decomposição da matéria orgânica e mineralização de nutrientes contidos no esgoto. Por capilaridade a água se move para a superfície e ocorre a absorção e evapotranspiração pelas plantas, devolvendo a água limpa para o meio ambiente (Paulo e Bernardes, 2004; Galbiati, 2009; Oliveira *et al.*, 2018).

Ao entrar no TEvap, o esgoto é direcionado primeiramente para as câmaras onde acontecem os processos biológicos anaeróbios de tratamento.

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico, na qual toda a matéria orgânica é degradada produzindo uma mistura de gases como o metano, o dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e o ácido sulfídrico, entre outros produtos na ausência de oxigênio (Chernicharo, 1997).

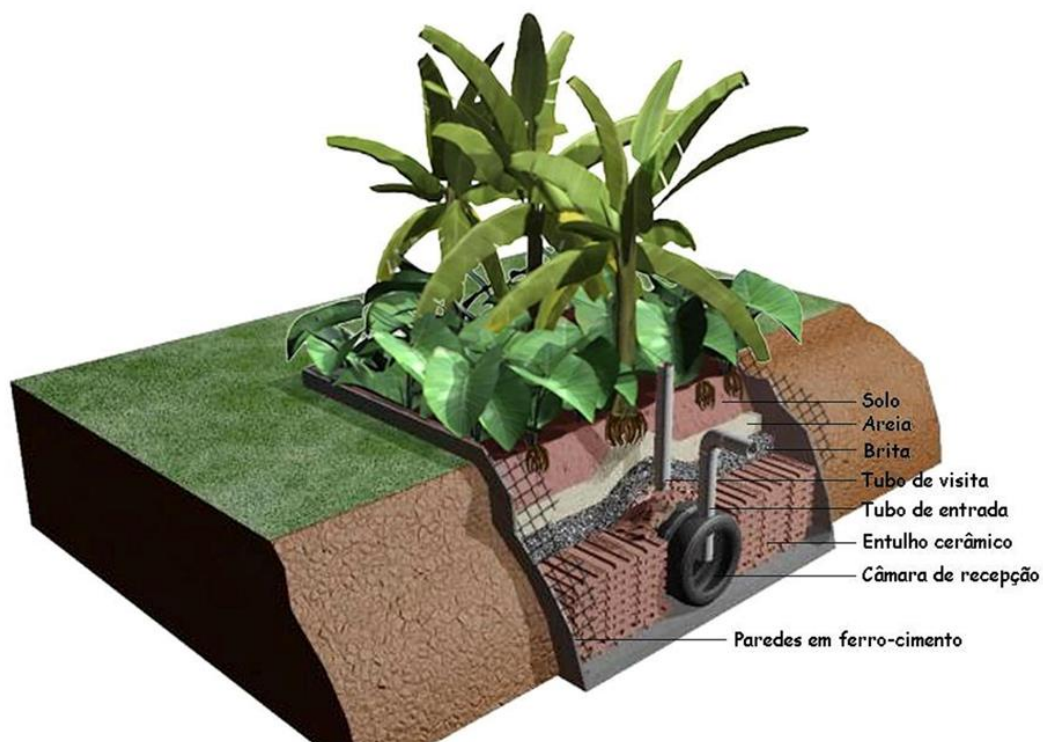
O TEvap utiliza da digestão anaeróbia para o tratamento de efluentes, que ocorre na câmara anaeróbia, uma parte fundamental deste sistema. Chernicharo, (2007) aponta que os sistemas anaeróbios têm a capacidade de degradar determinados compostos tóxicos como os compostos halogenados e azóicos recalcitrantes à degradação aeróbia, por fim permitem a preservação da atividade de

lodo por longos períodos, mesmo com ausência de alimentação, demandando baixo ou nenhum gasto energético (Oliveira, 2007).

A câmara anaeróbia pode ser constituída de diversos materiais, tais como pneus usados, alvenaria ou painel de argamassa armada (Chebli, 2020).

Ressalta-se que a escolha de materiais com baixo custo amplia a vantagem de instalação deste sistema, sendo uma alternativa para reutilização de materiais descartados. Os detalhes das camadas de um TEvap podem ser observados na Figura 2, como representado na pesquisa de Galbiati (2009).

Figura 2 - Tanque de Evapotranspiração e suas camadas



Fonte: Galbiati (2009).

3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TEVAP

Na consulta à literatura sobre o TEvap, observou-se que não existem normas específicas e detalhadas para o dimensionamento do TEvap.

Uma das recomendações mais frequentes de diversos autores é seguir as recomendações da norma NBR 7229 (ABNT, 1993) para tanques sépticos.

E, quando dimensionado corretamente, esse sistema reduz a necessidade de pós-tratamento, dado que em condições normais de operação com vazão adequada,

o efluente é absorvido em sua totalidade pelos vegetais cultivados no TEvap (Costa *et al.*, 2021).

Assim, o dimensionamento deve ser realizado de modo a não ocorrer o extravasamento do tanque, com o principal objetivo de manter o efluente isolado e sendo tratado anaerobiamente evitando contaminações e mau cheiro. O principal fator a ser considerado no dimensionamento do TEvap é a área superficial (Chebli, 2020).

Outro método de dimensionamento mais adotado é estimar uma determinada área superficial por cada pessoa no caso de tratamento residencial. Um valor comumente adotado é de 2 m² por pessoa como indicado por Pamplona e Venturi (2004).

O trabalho de Galbiati (2009) também cita a recomendação de 2 m² de área de tanque para cada usuário fixo da residência, e 1 metro de profundidade. Machado *et al.* (2017) adotaram um tanque com área superficial de 5 m² e Benjamin (2013) definiu 6 m² para 5 moradores, alguns autores como Costa (2018) e Rezende (2019) realizaram um superdimensionamento, construindo 21 tanques com 10 m² para casas com 4 moradores e Silva e Santos (2017) adotaram 7 m² para duas pessoas.

Galbiati (2009) propôs a Equação 1 para dimensionamento de um sistema de TEvap para as condições climáticas de Campo Grande – MS, conforme Equação 1.

$$A = \frac{n \cdot Qd}{Et_0 \cdot K_{tevap} - P \cdot k_i} \quad (1)$$

Onde:

A = área superficial do tanque, em m²;

n = número médio de usuários do sistema;

Qd = vazão diária por pessoa, em L.d⁻¹, de acordo com o tipo de descarga e o número de utilizações por pessoa;

K_{tevap} = coeficiente do tanque, adotado como 2,71, para as condições da realização da pesquisa;

ET₀ = evapotranspiração de referência média do local, em mm.d⁻¹;

P = pluviosidade média do local, em mm.d⁻¹;

k_i = coeficiente de infiltração, variando de 0 a 1.

Além da ampla variabilidade de área superficial, a profundidade também apresenta diversos valores nos dimensionamentos mais citados, variando de 0,70 m no trabalho de Correa (2018) até 1,50 m conforme Silva e Santos (2017) e Guimarães (2019).

3.4 CONSTRUÇÃO E PREENCHIMENTO

Uma das principais vantagens deste sistema de tratamento é o seu baixo custo e facilidade de implantação, deste modo, a seleção de materiais e métodos construtivos deve ser observada, a fim de facilitar e baratear tanto quanto possível a sua construção, que muitas vezes será realizada pelos próprios residentes ou trabalhadores com baixa experiência em obras.

O tanque deve apresentar além das dimensões adequadas, impermeabilização, para tal alguns materiais frequentemente utilizados são ferro-cimento como proposto por Costa (2018) e Machado *et al.* (2017).

O uso da tela de ferro-cimento, segundo Costa (2018) é uma técnica barata e que pode ser executada de forma segura, sendo tanto as paredes quanto o fundo do tanque de ferro cimento. A execução consiste em utilizar grade de ferro e tela de aço galvanizado ou também chamada de tela de “viveiro”, com cobertura de argamassa. Machado *et al.* (2017) descreve como tela-cimento ou argamassa armada.

Paes (2014) sugere a aplicação de duas camadas de reboco de cimento forte com impermeabilizante, permeadas com tela plástica nas superfícies internas do TEvap, fornecendo assim impermeabilização e boa fixação de paredes e piso.

Outro método é a utilização de concreto para o contrapiso, garantindo a impermeabilidade do TEvap, e blocos de concreto estrutural para a construção das paredes, finalizando com a concretagem conforme recomendações de Almeida *et al.* (2019). Este, porém, apresenta custo relativo maior do que o método de tela-cimento, e maior complexidade.

Com a estrutura pronta, o TEvap deve ser preenchido e, dentre os materiais mais utilizados estão pneus usados, tubos de PVC com variação de diâmetro entre 50 e 100 mm, pedra, entulhos, brita, areia e solo conforme os autores Silva e Santos (2017), Correa (2018), Santos *et al.* (2019), Machado *et al.* (2017) e Guimarães (2019).

Netto *et al.* (2015) apresentaram um preenchimento composto por cascalho grosso na camada inferior, acompanhado por materiais de granulometria menor, como

brita, areia e terra para o plantio, utilizando também tubos de PVC para a finalidade de dutos de suspiro.

Ainda há a possibilidade do emprego de materiais porosos servindo como filtro, como indicado por Coelho *et al.* (2018), além de entulho e cascas de coco.

O trabalho de Gomes *et al.* (2023) utilizou um TEvap em escala de laboratório menor em 6,8 vezes da escala real para um habitante em formato retangular e construído em placas de vidro de espessura de 4 mm com dimensões externas de 0,15 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,25 m de altura.

O preenchimento ocorreu com camadas características do TEvap, sendo alocadas em ordem ascendente: resíduos de construção e demolição, brita, geomembrana (para evitar a descaracterização das camadas pelo arraste do fluxo), areia e solo.

A operação do sistema Gomes *et al.* (2023) foi dividida em 3 fases. Na primeira fase, ocorreu um período de acomodação do sistema, onde o mesmo foi operado com uma vazão de $0,21 \text{ L.d}^{-1}$, por 22 dias, já na segunda fase o sistema foi operado com $0,28 \text{ L.d}^{-1}$, por 54 dias, perfazendo 1,4 vezes o tempo de detenção hidráulica (TDH), e por fim na terceira fase o sistema foi operado com a vazão de $0,56 \text{ L.d}^{-1}$, por 47 dias, perfazendo 2,35 vezes o TDH. Como indica o autor, essa forma foi adotada com objetivo de simular as cargas geradas em uma residência.

3.5 ESPÉCIES VEGETAIS CULTIVADAS NO TEVAP

Há diversas opções para a seleção de plantas para o sistema de evapotranspiração sendo o principal requisito é que a espécie tenha alta demanda hídrica, a fim de aumentar a eficiência do tratamento e emissão zero de efluente final. Assim, geralmente são utilizadas plantas com folhas com grande área superficial, visto que têm alta taxa de evapotranspiração (Galbiati, 2009).

Uma espécie muito utilizada é a bananeira (*Musa sp*) (Figura 3), apenas ela ou em conjunto com outras plantas. De acordo com a EMBRAPA (2012), a bananeira tem elevado e constante consumo de água devido a sua morfologia.

Figura 3 - Bananeira (*Musa sp*)



Fonte: Atlas Virtual (2015)

A taioba (*Xanthosoma sagittifolium* (L.)) (Figura 4) também pode ser utilizada, segundo Epamig (2011) é encontrada em abundância no sudeste brasileiro, sobretudo, no interior de Minas Gerais e Rio de Janeiro.

Figura 4 - Taioba (*Xanthosoma sagittifolium* (L.))



Fonte: Revista Natureza (2019).

Para este trabalho, foi utilizada a mini samambaia (*Nephrolepis exaltata*), uma planta pteridófita que não produz flores, frutos ou sementes. A sua dispersão é realizada pelo vento, ao espalhar seus esporos, e suas áreas de maior proliferação são as zonas tropicais e subtropicais (Barros *et al.*, 2006; Zuquim *et al.*, 2008).

Ela habita solos úmidos, necessitando regas regulares e sobrevive com baixa luz solar (Andrade *et al.*, 2021). Devido a sua demanda hídrica e capacidade de

evapotranspirar elevada, torna-se uma opção viável para utilização em sistema de evapotranspiração, sobretudo na região dos Campos Gerais que possui clima predominantemente temperado e com baixa insolação.

Os fatores meteorológicos e climáticos que são de fundamental importância para a evapotranspiração (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2007) são:

- Radiação líquida que consiste na principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração;
- Temperatura do ar no decorrer do dia, podendo ocasionar incremento no déficit de saturação e gerando aumento na demanda evaporativa do ar;
- Umidade relativa do ar em conjunto com a temperatura, assim quanto maior a umidade relativa, menor a demanda evaporativa e desse modo menor a evapotranspiração da planta;
- Advecção, que representa o transporte horizontal de energia de uma região mais seca do sistema para outra mais úmida, como o vento. Esta energia adicional é utilizada no processo de evapotranspiração. Ainda, o vento influencia na remoção do vapor d'água do ar próximo às plantas para outras regiões.

3.6 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração pode ser definida como a soma da quantidade de água perdida por uma superfície coberta com vegetação, por meio da evaporação direta da superfície do solo e da água perdida pelas plantas por transpiração (Filho *et al.*, 2011).

Thornthwaite (1948 citado por Filho *et al.*, 2011) introduziu o termo evapotranspiração potencial (ETp), que a definiu como a água utilizada por uma extensa área vegetada, em crescimento ativo e cobrindo totalmente a superfície do terreno, em condições ótimas de umidade do solo.

Posteriormente, considerou-se que os diferentes tipos de cultura vegetal e suas condições de crescimento influenciam diretamente na evapotranspiração, ocorre a chamada evapotranspiração da cultura (ETc), também denominada de evapotranspiração máxima (ETm), pois ela é definida para condições específicas que não afetam o crescimento e desenvolvimento da cultura (Filho *et al.*, 2011).

Além das condições meteorológicas, a ETc é dependente da área foliar da cultura (AF), ou seja, da sua superfície evapotranspirante, e pode ser relacionada à evapotranspiração de referência por um coeficiente de cultura (Kc) (Filho *et al.*, 2011).

O valor de K_c varia ao longo do ciclo de uma cultura, desde um valor inicial (normalmente entre 0,2 e 0,3), crescendo linearmente até passar por um máximo (K_c da fase intermediária em torno de 1,1 a 1,2) quando da ocorrência do máximo crescimento de área foliar, diminuindo depois com a senescência de folhas e maturação da cultura (K_c final), acompanhando a variação da área foliar por unidade de área de terreno ou índice de área foliar (IAF) e, portanto, da fração de solo coberto e da fração molhada (Filho *et al.*, 2011).

Em vários trabalhos estudados e elencados por Filho *et al.* (2011), são discutidos valores indicativos de K_c para um grande número de culturas e as aproximações que eles contêm. Desse modo, adota-se “ K_c simples”, cujos valores únicos conjugam diretamente a transpiração e a evaporação, e adota-se “ K_c compostos” de um valor basal (K_{cb}) referente à transpiração da cultura e um K_c de evaporação do solo (K_e) (Filho *et al.*, 2011).

Pereira *et al.* (1997 citado por Filho *et al.*, 2011) apontam que há diversos métodos conhecidos para a estimativa da ET_0 .

Galbiati (2009) adotou a taxa de evapotranspiração real do TEvap, sendo medida e calculada apenas nos dias operacionais de monitoramento, os quais foram denominados como dias de referência. Em cada dia de referência a autora monitorou a variação do nível de esgoto no tanque que teve sua alimentação suspensa em 19 intervalos de 1 (uma) hora, em diferentes faixas de horário e períodos contínuos de 2 a 12 horas de duração.

Deste modo, a partir da variação horária do nível do tanque, medida em cm.h^{-1} , multiplicada pela capacidade do tanque, em L.cm^{-1} , foi determinada a evapotranspiração para cada intervalo de 1 (uma) hora, em mm.h^{-1} .

Destaca-se que não há trabalhos presentes na literatura até o momento que estudaram a evapotranspiração de samambaia (*Nephrolepis exaltata*) em TEvap. Deste modo não há um coeficiente de cultura bem definido a ser adotado para esta planta inserida neste tipo de sistema. Foi adotado, para fins de comparação, o coeficiente teórico de cultura de gramados (Quadro 1) segundo Costello, Matheny, Clark. (1991).

Quadro 1 - Coeficientes de cultura Kc teóricos

Espécie	Kc baixo	Kc alto
Videira	0,60	0,80
Oliveira	0,58	0,80
Citrinos (laranja, limão)	0,65	0,65
Gramados (inverno)	0,80	0,80
Gramados (verão)	0,60	0,60
Árvores (folhas caducas)	0,50	0,97
Árvores (folhas caducas com cobertura vegetal)	0,98	1,27

Fonte: Costello, Matheny, Clark (1991).

A comparação da samambaia (*Nephrolepis exaltata*) com a grama, se justifica baseando-se em Penman (1956 citado por Filho *et al.*, 2011) que estabeleceu que o tipo de vegetação a ser tomada como referência para a evapotranspiração deveria ser baixa e de altura uniforme, sendo a grama adotada como padrão, em virtude da sua utilização como cobertura do solo em estações meteorológicas.

Pode-se observar os diferentes métodos de cálculo da evapotranspiração no Quadro 2.

Quadro 2 - Métodos de cálculo da evapotranspiração

Métodos de cálculo de evapotranspiração		
Thornthwaite (1948)	Galbiati (2007)	(Allen <i>et al.</i> , 1998; Sentelhas, 2001)
$ET_c = k_c \times ET_0$ ET_c = evapotranspiração de cultura; ET_0 = evapotranspiração de referência; k_c = coeficiente da cultura.	$ETH = \Delta Nh \times C$ ETH = Evapotranspiração horária estimada do tanque classe A, em $mm \cdot h^{-1}$; ΔNh = Variação de nível do tanque, em cm; C = Capacidade do tanque, na camada considerada, em $L \cdot cm^{-1}$	$ET_c = (k_{cb} \times k_e) \times ET_0$ ET_c = evapotranspiração de cultura; k_{cb} = valor basal composto referente à transpiração da cultura k_e = coeficiente referente a evaporação do solo ET_0 = evapotranspiração de referência

Fonte: O Autor (2024).

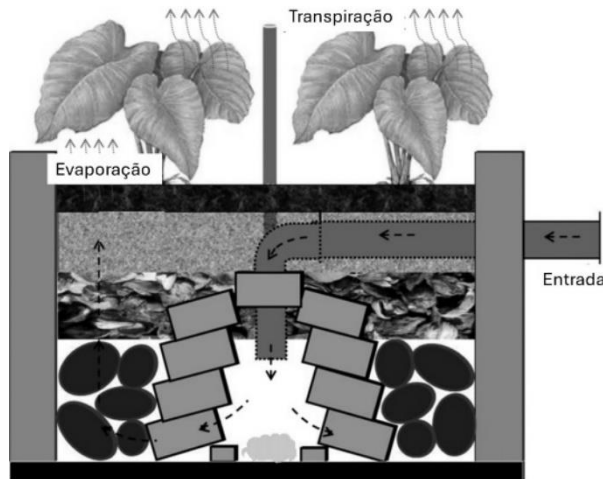
3.7 BALANÇO HÍDRICO

O conceito de balanço hídrico, de acordo com Thornthwaite (1948 citado por Filho *et al.*, 2011) avalia o solo como um reservatório fixo, no qual a água é armazenada até o máximo da capacidade de campo, sendo somente removida pela ação das plantas.

O método de balanço hídrico do solo consiste na contabilização dos fluxos de massa (volumétricos ou expressos em lâmina de água) das entradas e saídas de água em um volume de solo conhecido, em um dado período (Filho *et al.*, 2011).

Com base na literatura, o balanço hídrico neste trabalho foi estimado a partir de uma relação entre o volume de água que entrou no sistema do TEvap, a evaporação de água do ambiente e a diferença entre ambos que resulta na água que evapotranspirou pela ação da samambaia, conforme pode ser observado na Figura 5 desenvolvida para a fossa verde por Coelho *et al.* (2018).

Figura 5 - Desenho esquemático da fossa verde (seção transversal) incluindo setas indicativas do fluxo do esgoto dentro da estrutura séptica considerando entrada e saídas para o balanço hídrico.



Fonte: Adaptado de Coelho *et al.* (2018)

Headlley *et al.* (2012) utilizou o método de cálculo do balanço hídrico do sistema de *wetland* em ambiente aberto, ou seja, com influência da precipitação, levando em consideração a vazão de entrada, de saída, a precipitação e por diferença calcula-se a evapotranspiração (Equação 2).

$$In + P = Out + ET \quad (2)$$

onde:

In: entrada (mm.dia⁻¹);

P: Precipitação (mm.dia⁻¹);

Out: saída (mm.dia⁻¹);

ET: Evapotranspiração (mm.d⁻¹).

4 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, que consistem na verificação da capacidade máxima de vazão do TEvap, sem a ocorrência de extravasamento, ou acumulação de água no solo do sistema, bem como a influência da espécie vegetal samambaia (*Nephrolepis exaltata*) no funcionamento do TEvap, foi realizada a operação de um TEvap em escala de bancada.

A operação do sistema ocorreu com a aplicação de água potável em diferentes vazões e TAS, graduais e crescentes. Desse modo foi verificado também a capacidade de operação do TEvap com a espécie vegetal samambaia (*Nephrolepis exaltata*) que nunca foi relatada na literatura para este sistema, além da confirmação ou não de sua eficiência em evapotranspirar o água potável de acordo com o esperado e vazão para a ocorrência de extravasamento.

4.1 TEVAP DE BANCADA

O TEvap utilizado foi o mesmo dimensionado por Gomes *et al.* (2023), com algumas alterações nas camadas de materiais.

O TEvap era de formato retangular em planta e em seção transversal, construído a partir de placas de vidro com 4 mm de espessura e dimensões de 0,15 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,25 m de altura.

As camadas do TEvap em ordem ascendente de posicionamento: resíduos de construção e demolição (RCD), brita, areia e solo. A câmara anaeróbia foi simulada na parte inferior do tanque, onde foram utilizados dois tubos de PVC com 50 mm de diâmetro, paralelos entre si ao longo do tanque com 0,49 m de comprimento, com volume útil de 1410 cm³ (Figura 6).

Foram acopladas aos tubos de PVC mangueiras de silicone com 5 mm de diâmetro, que realizavam a entrada de água no sistema até a câmara anaeróbia, onde a água passou pela digestão anaeróbia e devido ao efeito da capilaridade, ascendeu às camadas superiores até a última camada que era a de solo.

Figura 6 - Vista superior e lateral do TEvap de bancada montado e em operação.



Fonte: O Autor (2024).

As camadas que compuseram o sistema após as câmaras anaeróbias de baixo para cima possuíam as seguintes características descritas a seguir por Gomes *et al.* (2023) em seu trabalho:

Camada de RCD: agregados com granulometria de 2 mm. Camada posicionada de modo a envolver as câmaras anaeróbias. O RCD usado apresentou coeficiente de uniformidade (Cu) igual a 1,2, o que indica que o material foi bem uniforme, e o coeficiente de curvatura (Cc) igual a 0,689, o que indicou que o material tinha uma graduação aberta, ou seja, o material apresentou uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores. Desse RCD foi utilizado um volume de 4130 cm³, e altura de 7,3 cm desta camada.

Camada de brita: Um volume de 1050 cm³ foi usado de pedra brita que tinha um coeficiente de uniformidade (Cu) igual a 2,8, o que indicou que o material era uniforme, e o coeficiente de curvatura (Cc) igual a 0,803 o que indicou que o material tinha uma graduação aberta também. A altura da camada foi de 2,5 cm.

Camada de areia: Um volume de 3080 cm³ foi utilizado de área de coeficiente de uniformidade (Cu) igual a 1,71, o que indicou que o material era bem uniforme e o coeficiente de curvatura (Cc) igual a 0,964, o que indicou que o material tinha uma graduação aberta. A altura desta camada foi de 4,4 cm.

Camada de solo: essa camada foi trocada em relação a originalmente utilizada por Gomes *et al.* (2023), desse modo foi utilizado solo classe A, com a finalidade de fornecer condições ideais para o cultivo das samambaias na parte superior do sistema. O volume total foi de 3500 cm³, o solo possui valor de vazios de 36,6% e com altura de 8,8 cm.

A camada de solo foi composta de solo classe A Vitaplan (Figura 7), cuja composição indica capacidade de retenção de água de 60%.

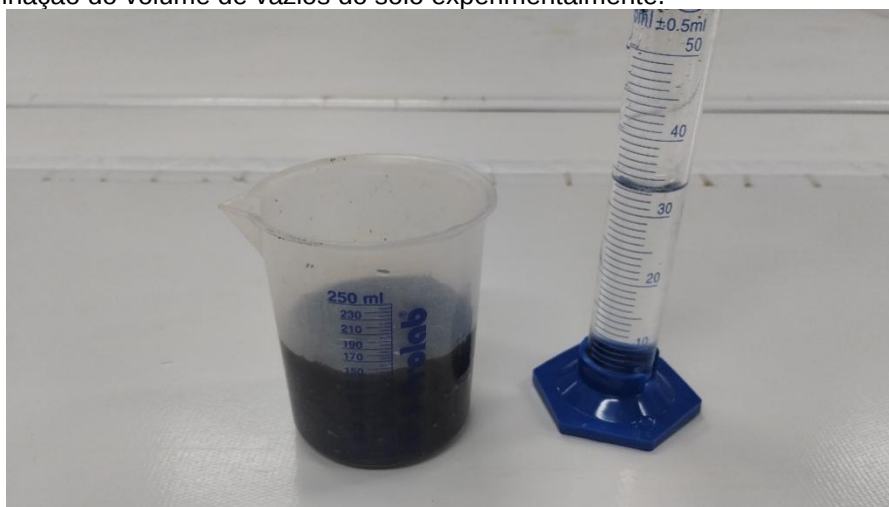
Figura 7 - Solo classe A comercial utilizado como camada do topo do TEVap e suas características



Fonte: O autor (2024).

O volume de vazios da camada de solos foi determinado pelo seu enchimento com água, utilizando um béquer com volume de solo determinado e adicionando um volume de água conhecido (Figura 8).

Figura 8 - Determinação do volume de vazios do solo experimentalmente.



Fonte: O autor (2024).

O valor obtido a partir da média de 3 repetições foi de 36,6%. Já o volume total da camada de solo do TEvap foi de 3500 cm³, e uma altura de 8,4 cm.

Deste modo o volume útil total do TEvap foi de 7420 cm³, considerando o volume útil de todas as camadas juntamente das câmaras anaeróbias.

4.2 ESPÉCIES VEGETAIS UTILIZADAS NO TEVAP

Para promover a evapotranspiração, o TEvap foi cultivado com mini samambaia (*Nephrolepis exaltata*) que tem abundância de folhas miúdas ao invés de folhas largas (Figura 9), que promoveu a evapotranspiração do sistema do TEvap.

Na especificação do rótulo de origem desta espécie de samambaia, constava que a planta prefere locais bem iluminados, sem exposição direta ao sol e ao vento e preferência por locais sombreados. Assim, o TEvap foi alocado dentro do laboratório neste tipo de ambiente a fim de favorecer o pleno desenvolvimento das plantas.

Foram utilizados dois vasos de samambaia com aproximadamente 0,011 m² de área preenchidos com brotações de folhas ao longo de toda a área.

Destaca-se que todas as fases de operação do TEvap ocorreram com a samambaia já na fase adulta de crescimento, e que o TEvap foi posicionado próximo à janela com a finalidade receber maior luminosidade.

Figura 9 - Mini samambaia (*Nephrolepis exaltata*) cultivada no TEvap.



Fonte: O autor (2024).

4.3 OPERAÇÃO DO TEVAP

Para alimentação do sistema, foi utilizada uma bomba adequada à escala do TEvap do tipo peristáltica, modelo SOLAB SL - 64, onde foram aplicadas diversas vazões de entrada até a verificação da acumulação de água do sistema, verificando deste modo o limite da capacidade de evapotranspiração do TEvap.

Inicialmente, um volume de água de abastecimento foi aplicado de uma só vez para preencher a câmara anaeróbia e as camadas de RCD, brita e areia, totalizando 6 litros de água, permanecendo apenas a camada de solo não preenchida por água. Desse modo o sistema não poderia iniciar a operação com vazões equivalentes a evaporação do ambiente e evitando saturar de início a camada de solo e causar eventual prejuízo a planta samambaia inserida nesta camada.

Além disso, a camada de solo foi o foco do experimento, para avaliar a evapotranspiração da samambaia e evaporação da superfície do solo.

As fases de operação foram 4 no total, com início a partir de valores menores de vazão, com incrementos graduais até a ocorrência de acumulação de água no sistema, baseando-se na evaporação do ambiente monitorada pelo tanque controle.

Para determinação da evaporação ambiente, foi alocado ao lado do TEvap no mesmo ambiente um tanque de controle (Figura 10) com as mesmas dimensões preenchido apenas com água de abastecimento e superfície livre para não limitar a evaporação apenas sob as condições de temperatura e umidade relativa do ar às quais o sistema estava submetido. A medida do volume foi realizada a partir da medida com régua da variação da altura da lâmina de água do tanque e sua área.

Figura 10 – Foto da vista superior do tanque de controle de bancada para monitoramento da evaporação local.



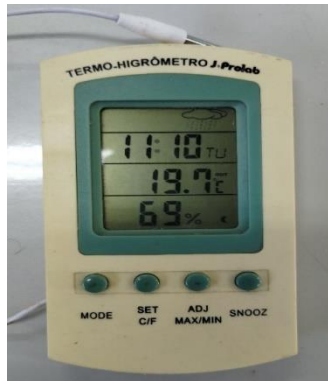
Fonte: O autor (2024).

Assim, conforme a lâmina líquida do tanque controle evaporava, verificava-se a evaporação do ambiente do TEvap e calculava-se a evapotranspiração do TEvap. O efluente utilizado foi a água potável comum, tendo em vista que o objetivo foi verificar a capacidade de vazão de operação.

Desse modo, adotou-se que o volume de água evapotranspirada pelo TEvap correspondeu ao volume total de água de entrada no sistema, subtraído do volume de água evaporada no tanque de controle.

As condições ambientais da temperatura e umidade relativa do ar no laboratório foram medidas por um termo-higrômetro digital (Figura 11).

Figura 11 - Termo-higrômetro digital utilizado para monitorar as condições ambientais no laboratório.



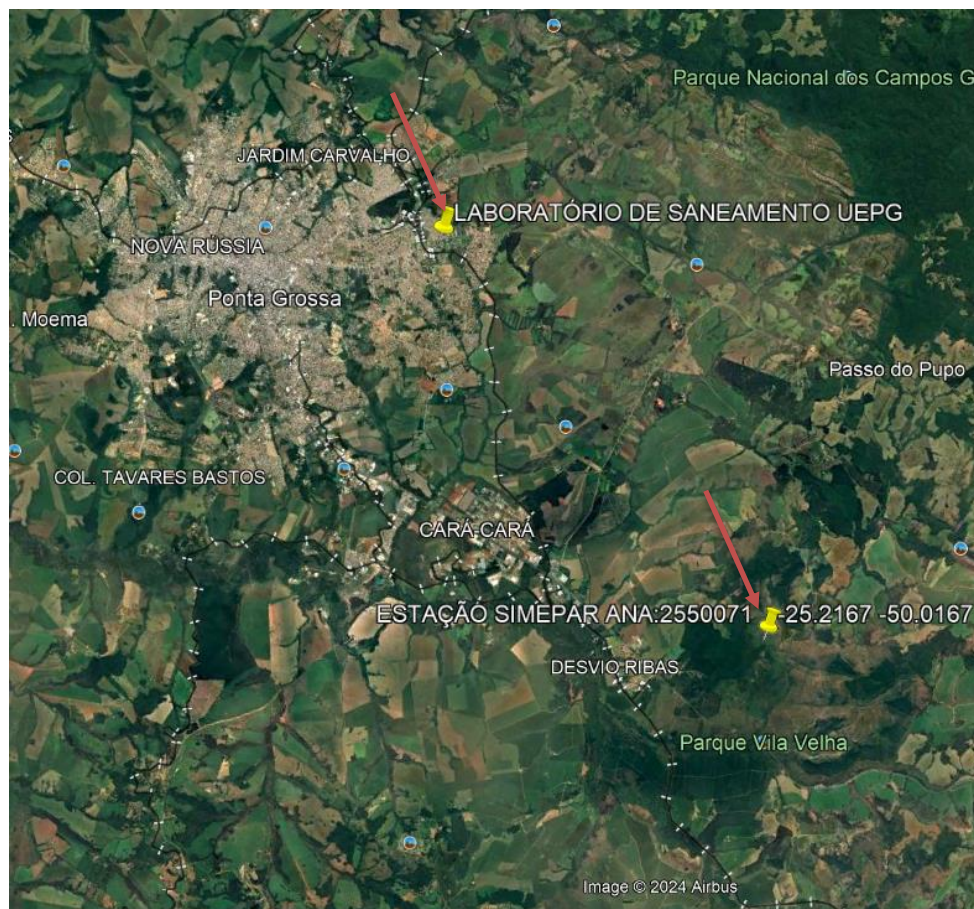
Fonte: O autor (2024).

O sensor permaneceu posicionado na bancada ao lado do sistema durante todo o período de operação. Os dados foram coletados a cada dois dias em um único horário do dia, ou seja, a temperatura e a umidade relativa do ar pontuais daquele dia no momento da leitura.

Para a obtenção de mais dados sobre a temperatura ambiente, umidade relativa do ar e pluviosidade do município de Ponta Grossa, foi solicitado ao Simepar (Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná) os dados destas informações durante o período de operação do TEvap, entre 01/09/2024 e 09/10/2024.

Desta forma, pôde-se comparar as informações obtidas no ambiente do laboratório onde estava o sistema do TEvap, com as informações da estação do município. Na Figura 12 destaca-se a localização do Laboratório de Saneamento da Universidade Estadual de Ponta Grossa e a Estação do Simepar.

Figura 12 - Localização Laboratório de Saneamento da UEPG e da estação do Simepar cód. ANA: 2550071



Fonte: Google Maps (2024).

4.4 FASES EXPERIMENTAIS

O experimento foi dividido em quatro fases de operação do sistema TEvap, cada uma com diferentes vazões de entrada de água (Q) e taxas de aplicação superficial (TAS). O objetivo foi avaliar a capacidade de evapotranspiração do sistema e identificar a capacidade de vazão máxima antes do ponto de acumulação de água na camada do solo.

Os valores de vazões de entrada tiveram como base de partida o trabalho de Gomes *et al.* (2023), que dividiu a operação do TEvap em três fases, sendo a primeira com vazão de 210 mL.d^{-1} , a segunda com 280 mL.d^{-1} e terceira com 560 mL.d^{-1} . Considerou-se ainda, a evaporação ambiente verificada no tanque de referência, desse modo a operação iniciaria com valores abaixo da evaporação de referência, igual e então superior, até a verificação de acumulação de água na camada de solo.

Na Tabela 1 pode-se observar as fases de operação do sistema do TEvap, com as diferentes aplicações de vazões de entrada e TAS equivalente.

Tabela 1 - Fases e condições operacionais do sistema do TEvap durante o experimento

Fase operacional	Vazão aplicada (mL/d)	TAS (mm/d)	Tempo de Operação (dias)
1	75,0	1,00	7
2	150,0	2,00	12
3	250,0	3,33	7
4	312,5	4,16	9

Fonte: O autor (2024).

Assim, a seguir alguns detalhes operacionais de cada uma das fases são descritas a seguir:

- **Fase 1:** Aplicação de 75 mL.d^{-1} , com TAS de 1 mm.d^{-1} , por 7 dias, estabelecida com taxa igual ou menor que a evaporação ambiente, com monitoramento para evitar extravasamento do TEvap. A fase teve duração de 7 dias como mínimo para operação, não foi estendida pois estava com aplicação inferior a evaporação do ambiente.
- **Fase 2:** Aumentou-se a aplicação para 150 mL.d^{-1} , (100% a mais que a Fase 1), com TAS de 2 mm.d^{-1} , operando por 12 dias, com o objetivo de superar a evaporação ambiente e confirmar a ausência de extravasamento ou formação de lâmina de água. Essa fase teve duração superior em relação à inicial para constatar a capacidade de operar em aplicação igual ou superior à evaporação.
- **Fase 3:** Aplicação de 250 mL.d^{-1} , com TAS de $3,33 \text{ mm.d}^{-1}$, por 7 dias. Essa fase visava operar o sistema com margem de segurança acima da evaporação ambiente, testando a eficiência de evapotranspiração das samambaias. Teve duração mínima pois não foi verificado nenhuma acumulação de água na camada do solo.
- **Fase 4:** Aplicação de $312,5 \text{ mL.d}^{-1}$, com TAS de $4,16 \text{ mm.d}^{-1}$, por 9 dias. Nesta fase, o limite de operação foi verificado, monitorando a acumulação de água na camada de solo no 7º dia e a formação de uma lâmina de água ao fim do 9º dia.

4.5 ESTIMATIVA DE BALANÇO HÍDRICO

Para a realização deste trabalho, a evapotranspiração da samambaia (*Nephrolepis exaltata*) foi estimada experimentalmente a partir do controle do volume de água total que o sistema do TEvap recebeu, subtraído da quantidade de água evaporada pelo ambiente do sistema, utilizando um tanque de mesmas dimensões para verificar o volume de água evaporado, a diferença entre o volume total e volume evaporado pelo ambiente foi o volume de água evapotranspirado pela samambaia do TEvap.

Desta forma o balanço hídrico foi calculado a partir de uma relação entre o volume de água que entrou no sistema do TEvap, a evaporação de água do ambiente e a diferença entre ambos que resulta na água que evapotranspirou pela ação da samambaia (Equação 3).

$$VET_c = V - VE_0 \quad (3)$$

Onde:

ET_c =evapotranspiração de cultura (mL);

V =volume total de água inserida no TEvap (mL);

E_0 =evaporação de água do ambiente aferida por tanque de controle (mL).

O coeficiente de evapotranspiração do TEvap (KT_{evap}), pode ser usado como parâmetro para analisar qual a evapotranspiração do TEvap comparada com a evaporação de referência.

Para determinar o KT_{evap} foi utilizada a Equação 4. A partir dos valores de evapotranspiração do Tevap e de evaporação do ambiente.

$$KT_{evap} = VET_{tevap}/VE_0 \quad (4)$$

Onde:

KT_{evap} = coeficiente evapotranspiração do Tevap;

VET_{tevap} = volume evapotranspiração do Tevap (mL);

VE_0 = volume evaporação de água do ambiente aferida por tanque de controle.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As condições operacionais que foram monitoradas, onde houve apenas a aferição das mesmas, e controladas, que foram definidas para cada fase experimental e fixadas, como o tempo de operação e a vazão de entrada do sistema, podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Variáveis experimentais na operação do TEvap

Variável	Vazão de entrada	Tempo de operação	Temperatura ambiente	Umidade Relativa do ar	Evaporação do tanque de controle	Evapotranspiração da samambaia
Monitorada	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Controlada conforme o experimento	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: O autor (2024).

O valor da vazão de entrada no sistema do TEvap foi convertido para taxa de aplicação superficial, a partir do valor da área superficial do TEvap ($ATEvap$) e vazão de entrada (Qin), desse modo, calcula-se a Equação 5.

$$TAS = Qin/ATEvap \quad (5)$$

Onde:

TAS = taxa de aplicação superficial do TEvap ($mm.d^{-1}$);

Qin = vazão de entrada ($L.d^{-1}$);

$ATEvap$ = área superficial do TEvap (m^2).

Foi realizado ainda o acompanhamento visual para verificar a acumulação de água no solo e o registro fotográfico das fases de operação.

Ao final de cada fase experimental, foram coletadas amostras da camada superior do solo para verificar o teor de umidade desta camada (Equação 6), de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 2016).

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100 \quad (6)$$

Onde:

U = Umidade gravimétrica do solo (%);

Mu = Massa de solo úmida (g);

Ms = Massa de solo seca (g).

Na Figura 13, pode-se observar o aparato experimental completo da bancada do TEvap.

Figura 13 - Aparato experimental utilizado no trabalho



Fonte: O autor (2024)

Os resultados obtidos foram comparados com os valores esperados e de outros trabalhos realizados presentes na literatura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 OBSERVAÇÕES DO TEVAP SUBMETIDO A DIFERENTES VAZÕES E TAXAS DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL

Na Fase 1 com aplicação de $75 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$ correspondente a uma TAS de $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, observou-se que a evaporação foi equivalente ou menor que a evaporação ambiente, com valor médio de $124 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$, sem acumulação de água no solo ou extravasamento conforme se esperava (Figura 14).

Figura 14 - Camada de solo não saturada na fase 1



Fonte: O autor (2024).

Na Fase 2 com aplicação de $150 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$ e uma TAS de $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, a evaporação ambiente foi igualada ou superada, com valor médio de $99 \text{ mL} \cdot \text{d}^{-1}$, sem formação de lâmina de água ou extravasamento (Figura 15).

Figura 15 - Camada de solo não saturada na fase 2



Fonte: O autor (2024).

Na Fase 3 com aplicação de 250 mL.d^{-1} , com TAS de $3,33 \text{ mm.d}^{-1}$, o sistema funcionou acima da evaporação ambiente, com média de 160 mL.d^{-1} , confirmando a eficiência de evapotranspiração ainda sem riscos de extravasamento (Figura 16).

Figura 16 - Camada de solo não saturada na fase 3



Fonte: O autor (2024).

Na Fase 4 com aplicação de $312,5 \text{ mL.d}^{-1}$, com TAS de $4,16 \text{ mm.d}^{-1}$, houve acumulação de água na camada de solo no 7º dia e, ao fim do 9º dia, formou-se uma lâmina de água na superfície, indicando o limite de operação do sistema, demonstrando que esta taxa e vazão é inviável, uma vez que para as raízes das plantas se desenvolverem o solo deve estar em capacidade de campo com macro e microporos preenchidos com ar e não somente com água (Figura 17).

Figura 17 - Camada de solo saturada na fase 4



Fonte: O autor (2024).

Durante a operação do sistema, observou-se que a samambaia (*Nephrolepis exaltata*) apresentou crescimento e troca de folhas, indicando a sua adaptação ao ambiente do TEvap.

5.2 MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

As variáveis monitoradas durante o período dos experimentos para cada fase podem ser observadas na Tabela 2, sendo que as coletas de dados foram realizadas a cada dois dias majoritariamente, em um horário pontual do dia.

Tabela 2 – Condições ambientais monitoradas no laboratório no período de 04/09/2024 a 09/10/2024

Operação do TEvap			Variáveis experimentais		
Fase	Data	Horário	Umidade Relativa (%)	Temperatura do ar (°C)	Evaporação média (mL. d ⁻¹)
1	04/09/24	13:51	47	26,3	112,5
	09/09/24	13:12	46	27,8	105,0
2	11/09/24	14:37	31	29,2	150,0
	13/09/24	14:12	23	28,7	225,0
	16/09/24	08:37	29	18,4	97,5
	18/09/24	13:30	27	20,7	75,0
	20/09/24	13:20	25	24,3	37,5
3	23/09/24	14:11	26	23,8	75,0
	25/09/24	14:31	23	30,1	225,0
	27/09/24	13:48	25	25,9	187,5
	30/09/24	08:32	29	21,7	97,5
4	02/10/24	14:13	23	31,4	150,0
	04/10/24	13:47	27	21,6	75,0
	07/10/24	08:40	32	21,2	75,0
	09/10/24	13:31	31	21,8	75,0

Fonte: O autor (2024).

Os dados disponibilizados pela Simepar, da estação com código ANA: 2550071, do município de Ponta Grossa, entre o período de 01/09/2024 a 09/10/2024, podem ser observados na Tabela 3.

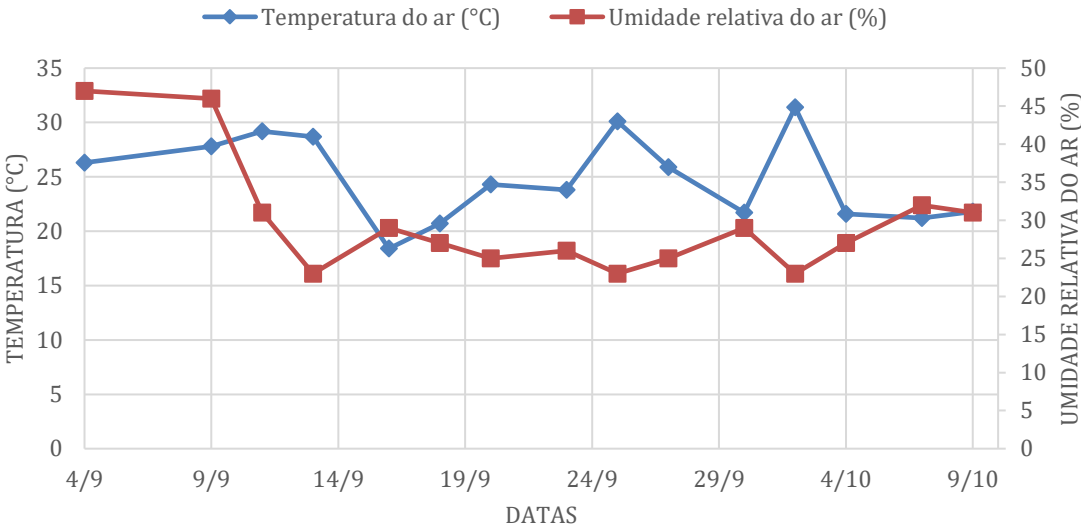
Tabela 3 - Dados meteorológicos da Estação da Simepar cód ANA:2550071 entre o período de 01/09/2024 a 09/10/2024.

Operação do Tevap		Dados disponibilizados pela Simepar		
Fase	Data	Umidade Relativa (%)	Temperatura do ar (°C)	Precipitação (mm. d ⁻¹)
-	01/09/24	63,4	20,0	0
	02/09/24	69,6	17,5	0
	03/09/24	63,0	19,8	0
1	04/09/24	50,2	22,9	0
	05/09/24	79,2	17,9	1,4
	06/09/24	82,5	15,3	0
	07/09/24	68,2	20,7	0
	08/09/24	62,8	22,5	0
	09/09/24	56,8	25,0	0
	10/09/24	58,3	23,1	0
	11/09/24	52,0	22,7	0
	12/09/24	48,1	23,3	0
	13/09/24	47,5	24,4	0
	14/09/24	75,0	20,0	0,2
2	15/09/24	90,3	14,1	39,6
	16/09/24	87,6	13,7	8
	17/09/24	78,9	14,3	0
	18/09/24	79,3	15,7	1,2
	19/09/24	84,2	17,2	0
	20/09/24	79,9	18,6	12,4
	21/09/24	78,4	19,8	0,2
	22/09/24	77,2	21,8	0
	23/09/24	66,0	24,8	0
	24/09/24	59,1	24,7	0
3	25/09/24	58,3	24,6	0
	26/09/24	56,3	25,2	5,8
	27/09/24	69,6	20,5	0,6
	28/09/24	71,8	17,8	0
	29/09/24	67,9	19,6	0
	30/09/24	66,9	22,2	0
	01/10/24	54,3	26,2	0
4	02/10/24	72,4	22,8	4,8
	03/10/24	85,7	16,9	3
	04/10/24	80,8	15,2	0
	05/10/24	67,8	18,1	0
	06/10/24	63,8	20,2	0
	07/10/24	71,3	19,0	0,6
	08/10/24	68,7	21,1	0
	09/10/24	82,5	18,1	8,4

Fonte: Simepar (2024).

Na Figura 18 verifica-se o gráfico da temperatura ambiente e umidade relativa do ar a partir dos dados monitorados em laboratório do local do TEvap.

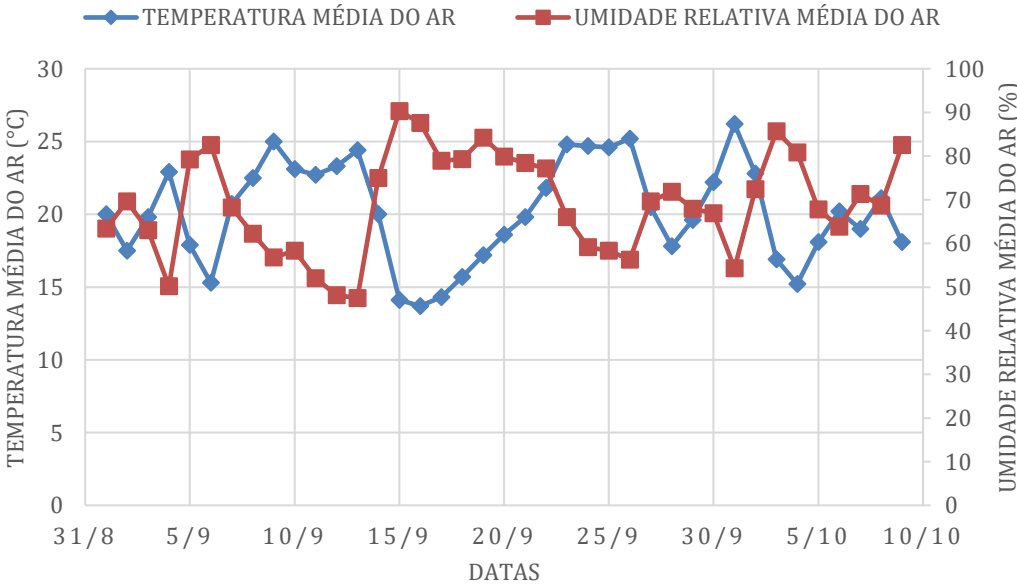
Figura 18 – Gráfico 1: Temperatura ambiente e umidade relativa do ar, medidas em laboratório no período de 04/09/2024 a 09/10/2024



Fonte: O autor (2024).

Os dados meteorológicos de umidade relativa do ar média e temperatura do ar média, fornecidos pela Simepar, podem ser observados no gráfico da Figura 19.

Figura 19 – Gráfico 2: Dados umidade relativa média do ar e temperatura média do ar da Estação da Simepar cód ANA:2550071 entre o período de 01/09/2024 a 09/10/2024.



Fonte: Simepar (2024).

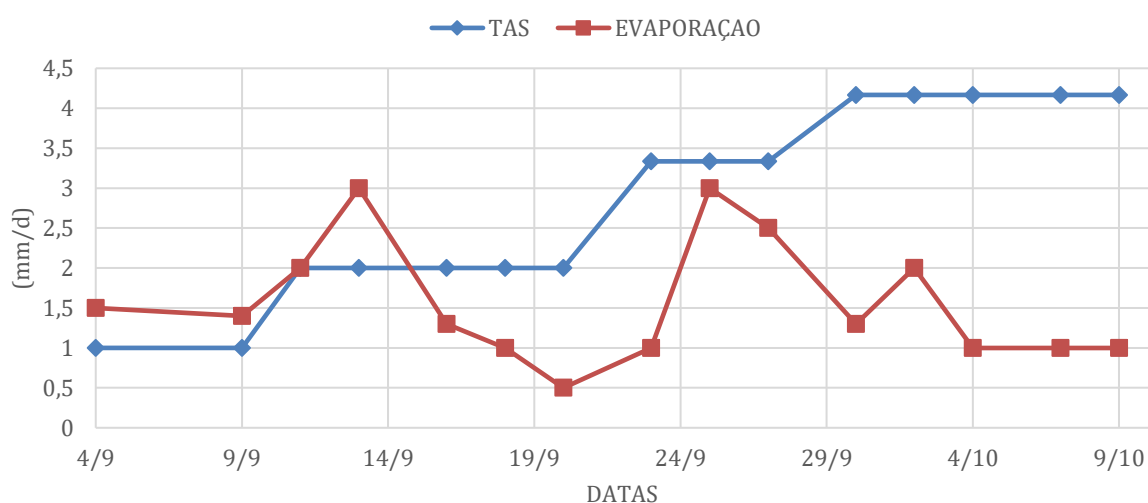
Destaca-se que o clima de Ponta Grossa é pluvial temperado, denominado, conforme a classificação internacional de KOEPPEN, de tipo Cfb (Cruz, 2009). Onde:

- “ C ” significa que se trata de um regime térmico no qual o mês mais frio fica entre 18° C e -3° C, diferenciando-se dos climas tropicais, onde a média mensal permanece acima de 18° C (Tipos A e B) em todos os meses;
- “ f ” indica que todos os meses são chuvosos;
- “ b ” pressupõe uma temperatura média anual inferior a 22° C, mas existem 4 meses durante o ano com uma média acima de 10° C.

Deste modo, a cidade apresenta uma amplitude térmica considerável, e os dados monitorados experimentalmente foram em sua maioria no início da tarde, onde as temperaturas são geralmente mais elevadas, o que justifica a diferença entre os valores de temperatura média do ar disponibilizados pela Simepar.

Na Figura 20 verifica-se a o gráfico da TAS de operação do TEvap e a evaporação do ambiente, verificada a partir do tanque de controle.

Figura 20 - Gráfico 3: TAS de operação do TEvap e evaporação do ambiente do período de 04/09/2024 a 09/10/2024



Fonte: O autor (2024).

Observa-se que a estação do Simepar monitorou valores de umidade relativa consideravelmente maiores do que os valores registrados no ambiente protegido, no qual o sistema do TEvap estava instalado. Além da diferença entre as temperaturas médias de cada fase de operação, onde as temperaturas monitoradas no laboratório foram mais altas do que as da estação, como pode-se observar na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação dos valores médios dos dados de laboratório e dados da estação Simepar

Fases	Temperatura pontual no laboratório (°C)*	Temperatura média na estação Simepar (°C)	Umidade relativa pontual no laboratório (%)*	Umidade relativa média na estação Simepar (%)
1	27,1	21,1	46,5	65,3
2	24,3	18,8	27,0	73,2
3	26,6	22,5	24,7	64,1
4	23,5	20,0	28,4	71,4

*pontual: no momento da leitura que era no início da tarde

Fonte: O autor (2024).

5.3 BALANÇO HÍDRICO DO TEVAP

Utilizando a Equação 3, foi realizado o cálculo do balanço hídrico do sistema do TEvap. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5. Destaca-se que na fase 1 o valor de Etc foi negativo pois a evaporação ambiente foi superior ao volume de água inserida no TEvap, desse modo a samambaia não recebeu água suficiente para a evapotranspiração.

$$VET_c = V - VE_0 \quad (3)$$

Onde:

VET_c = volume evapotranspiração de cultura (mL);

V = volume total de água inserida no TEvap (mL);

VE_0 = volume evaporação de água do ambiente aferida por tanque de controle (mL).

Na fase 4 foi verificado visualmente a acumulação de água e formação de lâmina de água na camada de solo que ficou encharcado. Deste modo, o valor de Etc foi obtido por meio do ensaio do teor de umidade do solo e o volume da camada de solo, que resultou na fase 4 em 30,49% de umidade, para um volume de 3500 cm³, totalizando 1020 cm³ de água retida no solo e 725 cm³ de água evapotranspirada pelo TEvap.

Tabela 5 - Balanço hídrico do TEvap em cada fase de operação do sistema

FASE	Entrada	Saída	
	Volume aplicado (mL)	Evaporação ambiente no tanque controle (mL)	Evapotranspiração de cultura estimada (mL) (Volume aplicado – Evaporação do tanque de controle)
1	525,0	870,0	-345,0
2	1800,0	1192,5	607,5
3	1750,0	1117,5	632,5
4	2812,5	1020,0	725,0*

Fonte: O autor (2024).

O coeficiente de evapotranspiração do TEvap (K_{Tevap}), que considera a evapotranspiração total do sistema (ambiente somado com a cultura de samambaia) foi calculado por meio da Equação 4, os valores obtidos podem ser verificados na Tabela 6.

$$K_{Tevap} = VET_{tevap} / VE_0 \quad (4)$$

Onde:

K_{Tevap} = coeficiente evapotranspiração do Tevap;

VET_{tevap} = volume evapotranspiração do Tevap (mL);

VE_0 = volume evaporação de água do ambiente aferida por tanque de controle.

Tabela 6 - Coeficiente de evapotranspiração do TEvap

Valores do coeficiente de evapotranspiração do TEvap (K_{Tevap})			
FASE	K_{Tevap}^*	E_0 (mL)	ET_{TEvap} (mL)
1	0,603	870	525
2	1,509	1193	1800
3	1,566	1118	1750
4	1,711	1020	1745

Fonte: O autor (2024).

K_{tevap} = relação entre evapotranspiração total do TEvap e evaporação do ambiente.

Também se calculou o coeficiente de cultura da samambaia apenas, que considera apenas a transpiração de água da samambaia em relação a evaporação do ambiente, com os dados obtidos das fases 2, 3 e 4 de operação onde não houve vazão

de entrada abaixo da evaporação ambiente, a partir da equação de Thornthwaite (1948 citado por Filho et al., 2011), os valores obtidos são indicados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de coeficiente de cultura (estimado para a samambaia) obtidos experimentalmente

FASE	Coeficiente de cultura	Volume de água evapotranspiração de cultura (mL)	Volume de água evaporação ambiente (mL)
1	nc*	nc*	870
2	0,51	607	1193
3	0,57	632	1118
4	0,71	725	1020

*nc – não calculado devido impossibilidade de aferição.

Fonte: O autor (2024).

Comparando esse coeficiente de cultura médio (0,60) obtido pela operação do TEvap, com o coeficiente de cultura para gramíneas no verão ($K_c = 0,6$), proposto por Costello, Matheny, Clark, (1991), observa-se que estão igualados.

Usando ainda o coeficiente teórico K_c de 0,6 para gramíneas no verão e a equação de Thornthwaite (1948 citado por Filho et al., 2011), para o cálculo da evapotranspiração de cultura obtém-se para cada fase de operação os seguintes resultados (Tabela 8).

Tabela 8 - Valores de evapotranspiração de cultura com coeficiente teórico de grama.

FASE	K_c	ET_o (mL)	ET_c (mL)
1	0,6	870	522
2	0,6	1193	715,8
3	0,6	1118	670,8
4	0,6	1020	612

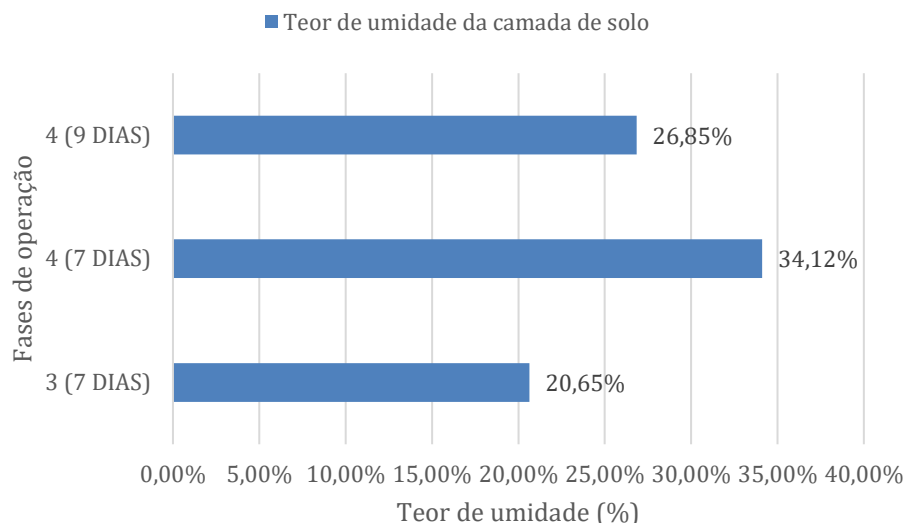
Fonte: O autor (2024).

O coeficiente de cultura obtido experimentalmente para a samambaia (*Nephrolepis exaltata*) ($K_c = 0,60$), é consideravelmente inferior comparado ao coeficiente de cultura das plantas bananeira (*Musa sp.*) ou a taioba (*Xanthosoma sagittifolium* (L.)) (K_c entre 0,8 e 1,0) como indicado por Doorenbos e Kassan (1994).

Os valores da umidade do solo que compõe a camada superior do sistema, onde as samambaias estão inseridas, e onde efetivamente ocorre a etapa final do processo de evapotranspiração a partir da norma NBR 6457 (ABNT, 2016), estão apresentados na Figura 21

Nas fases 1 e 2 não foram retiradas amostras para a umidade relativa do solo, devido a observação visual de não acumulação de água na camada de solo.

Figura 21 - Gráfico 4: Teor de umidade da camada de solo do TEvap



Fonte: O autor (2024).

Desse modo, a média dos valores de umidade para a fase 4 seria de 30,485%, utilizando esse valor de umidade e o índice de vazios determinado para a camada de solo no início do experimento, de 36,6%, obteve-se o volume de água de água máximo teórico e o volume real de água na camada de solo verificado na fase 4 de experimento, sendo o comparativo destes volumes de:

- ✓ Volume de água máximo na camada de solo com índice de vazios de 36,6% equivalente a 1281 cm³ ou 1,281 L.
- ✓ Volume de água retido no solo na fase 4 com umidade de 30,485% equivalente a 1066,975 cm³ ou 1,067 L.

Ou seja, o solo encontrava-se encharcado com água com 63% dos macros e microporos do solo ocupados com água.

A retenção de água é a capacidade do solo em manter a água fornecida por precipitação ou irrigação. Já a disponibilidade de água às plantas é o volume contido entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Klein, 2014).

Estes processos estão relacionados à distribuição dos poros do solo, dos quais os microporos, que são os poros responsáveis pelo armazenamento da água que será aproveitada pelas plantas (Klein e Klein, 2015), sendo que os macroporos devem ser ocupados por ar para a respiração das raízes das plantas e trocas gasosas.

Além disso, é possível que a diferença entre o volume teórico máximo e o volume de água real na camada de solo possa ser justificada pela ocupação das raízes da samambaia que cresceram durante a operação do TEvap, que pôde ter diminuído o volume de vazios, e ainda, devido ao procedimento de coleta das amostras de solo, pois no momento da remoção do volume de amostra com espátula para levar ao cadinho, observou-se uma drenagem da água excedente, que pode ter diminuído o teor de umidade das amostras.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para correlacionar as vazões aplicadas no TEvap com o esgoto doméstico gerado por uma família, considerou-se a norma NBR 7229 (ABNT, 1993), para tanques sépticos, que recomenda um coeficiente de contribuição de esgoto (C) de $160 \text{ L. hab}^{-1}. \text{d} - 1$, para o padrão alto de residência, porém considerando águas negras e cinzas, desse modo, considerando um TEvap de 2 m^2 para um habitante, esse valor equivale a uma taxa de aplicação de 80 mm.d^{-1} .

Considerando apenas a água cinza gerada por um banho de duração de 5 minutos, com chuveiro operando a uma vazão de $0,05 \text{ L.s}^{-1}$, como indica a norma NBR 12088 (ABNT, 1992), para pressão mínima de funcionamento, resulta em uma vazão de 15 L.d^{-1} , que equivale a uma TAS de $7,5 \text{ mm.d}^{-1}$.

Assim, para fins de exemplificação estes dados foram estimados levando em consideração apenas um banho para um habitante e um TEvap com área superficial de 2 m^2 .

Comparando ainda com o volume de esgoto gerado por descargas sanitárias, e considerando o volume de água consumido por cada descarga sanitária de $6,8 \text{ L}$, como fixado pela norma NBR 15.097/04 (ABNT, 2017), uma descarga equivale a uma TAS de $3,4 \text{ mm.d}^{-1}$, para um sistema de TEvap com área superficial de 2 m^2 .

O maior valor de TAS do sistema foi de $4,16 \text{ mm.d}^{-1}$, que causou a acumulação de água na camada de solo. Porém, a segunda vazão mais alta que o sistema operou, de $3,33 \text{ mm.d}^{-1}$ foi observada ser a recomendada para a sua operação sem prejudicar a samambaia e suas raízes.

O trabalho de Costa *et al.* (2021), utilizou uma área de 2,9 m² por habitante, e volume de águas negras produzidos por um habitante de 22,5 L.d⁻¹, resultando em TAS 7,76 mm.d⁻¹, para sistema de TEvap com bananeira (*Musa sp.*).

Observa-se desse modo, que o sistema de TEvap proposto neste trabalho apresenta menor capacidade de evapotranspirar água sem a ocorrência de acumulação de água no solo ou extravasamento do que outros sistemas presentes na literatura, como os que utilizaram bananeira (*Musa sp.*) ou a taioba (*Xanthosoma sagittifolium* (L.)).

Alguns dos fatores, além das diferenças de temperatura ambiente e umidade relativa do ar e do coeficiente de cultura da samambaia (*Nephrolepis exaltata*), que influenciam na evapotranspiração, são o vento a exposição a luz solar, uma vez que o TEvap estava em ambiente interno e não recebia luz solar diretamente durante o dia.

6 CONCLUSÃO

O sistema de evapotranspiração proposto neste trabalho, utilizando camadas de RCD, brita, areia e solo, com cultura de samambaias (*Nephrolepis exaltata*), apresentou capacidade de evapotranspirar, sem que ocorresse a acumulação de água ou extravasamento da camada de solo, com vazão de entrada máxima de 250 mL.d^{-1} e TAS máxima de $3,33 \text{ mm.d}^{-1}$, como comprovado pela fase 3 de operação do sistema.

Confirmou-se que com vazão de entrada de $312,5 \text{ mL.d}^{-1}$ e com TAS de $4,16 \text{ mm.d}^{-1}$, houve a acumulação de água na camada de solo e formação de lâmina de água, o que pode prejudicar a samambaia (*Nephrolepis exaltata*), uma vez que para as raízes das plantas se desenvolverem o solo deve estar em capacidade de campo com macro e microporos preenchidos com ar e não somente com água.

Comparando o valor da TAS de $3,33 \text{ mm.d}^{-1}$ com outros trabalhos presentes na literatura, verifica-se que esse sistema é capaz de realizar a evapotranspiração em ambiente de cultivo protegido, porém é consideravelmente menos eficiente em evapotranspirar a água que é aplicada no mesmo em relação a outros sistemas de TEvap, considerando a necessidade de evapotranspirar completamente o esgoto doméstico nele inserido. Essa capacidade de evapotranspiração pode estar reduzida devido à ausência de insolação do ambiente protegido e de certa forma, pode ser adotado como fator de segurança em um sistema real em ambiente exposto.

Outros sistemas, como os que utilizaram a bananeira (*Musa sp.*) ou a taioba (*Xanthosoma sagittifolium* (L.)), dimensionados com 2 m^2 por habitante, e considerando 160 L.d^{-1} de esgoto, sendo esse valor para águas negras e cinzas, gerado por habitante, segundo a literatura, podem suportar uma TAS de 80 mm.d^{-1} .

Essa diferença entre ambiente externo e interno pode ser constatada entre os dados de temperatura e umidade relativa do ar monitorados no laboratório e os dados da estação meteorológica da Simepar. Os dados do monitoramento no laboratório indicaram temperaturas médias superiores e percentual de umidade relativa média inferiores aos da estação.

Deste modo, um estudo do TEvap em ambiente externo com exposição à luz solar é necessário, para verificar o aumento ou não da evapotranspiração, e avaliar ainda a influência da precipitação incidindo sob o sistema.

Ressalta-se que um estudo utilizando um tanque de controle da evaporação ambiente preenchido com o mesmo tipo de solo do TEvap e água é recomendado, pois a evaporação da água no solo possui diferenças em relação a evaporação apenas de um volume de água, podendo influenciar o balanço hídrico do sistema.

É recomendado ainda um estudo do balanço hídrico do sistema do TEvap com uso de lisímetro de massa, para a obtenção de resultados com maior precisão, permitindo o cálculo mais preciso do coeficiente de evapotranspiração da planta.

Este estudo deve ser repetido com água residuária, pois vai serão desenvolvidos microorganismos no meio biótico, com isso pode ocorrer a alteração da porosidade do solo, e por consequência alteração na evaporação de água do solo.

BRAGA, Denilson; PINHEIRO, Fernando; SANT'ANA, Maira; ALMEIDA, Marcello; KINOSHITA, Angela; FRIOL, Fábio; TAMASHIRO, Jacqueline. (2023). Tratamento de efluentes: Sistemas convencionais e avançados, desafios e perspectivas para sustentabilidade. **Revista Ciências e Tecnologia das Águas: inovações e avanços em pesquisa** - DOI: 10.37885/230312599. ISBN 978-65-5360-318-9. Editora Científica Digital - Vol. 1 - Ano 2023.

CARNEIRO, Mariko de Almeida. **Sistemas individuais alternativos de tratamento de esgoto sanitário**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, PB. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13990>

CHEBLI, Kássia dos Santos. **Proposta de critérios técnicos para análise de desempenho de TeVap- tanque de evapotranspiração**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; reatores anaeróbios**. 1ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, v. 5, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

COELHO, F. C.; REINHARDT, H.; ARAÚJO, C. J. **Fossa verde como componente de saneamento rural para a região semiárida do Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 801-810, ago. 2018. FapUNIFESP.

CORREA, M. **Saneamento Ecológico no Sítio Back - Bacia de Evapotranspiração**. 33f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

COSTA, Pablo Soares de Alvarenga; SILVA, Bianca Almeida da; CARMO, Dirlane de Fátima do; TEIXEIRA, Marcos Alexandre; MARQUES, Débora Candeias. Tanque de evapotranspiração para saneamento rural: estudo de caso no planejamento micro e macro. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá (PR), v. 14, 2021. DOI <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.2.e7883>. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/7883>.

CRUZ, G. C. F. da. **Clima Urbano de Ponta Grossa -PR: uma abordagem dinâmica climática em cidade média subtropical brasileira**. 2009. 366 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. São Paulo, 2009.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33.

EPAMIG. **Hortaliças não convencionais: alternativa de diversificação de alimentos e de renda para agricultores familiares de Minas Gerais**, EPAMIG: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais Centro-Oeste. Prudente de Moraes, 2011.

ETAPAS de Tratamento do Esgoto Sanitário. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.aguaeeffluentes.com.br/post/etapas-de-tratamento-do-esgoto>. Acesso em: 10 set. 2024..

FILHO, Maurício Antonio Coelho; PEREIRA, Francisco Adriano de Carvalho; ANGELOCCI, Luiz Roberto; COELHO, Eugênio Ferreira Coelho; OLIVEIRA, Greice Ximena Santos. **O processo de evapotranspiração. In: Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: [s. n.], 2011. cap. 2.

GALBIATI, A. F. **Tratamento Domiciliar de Águas Negras através de Tanque de Evapotranspiração**- Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, Campo Grande/MS, 2009.

GAZOLA, Letícia et al. **Análise das legislações estaduais brasileiras sob ensaios ecotoxicológicos como ferramenta no controle de lançamento de efluentes industriais**. 2020. (p.36-41). Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216418>.

GOMES, Kaio Gustavo; VUITIK, Guilherme Araújo; DÖLL, Maria Magdalena Ribas. **Projeto, hidrodinâmica e desempenho de um tanque de evapotranspiração para tratamento e disposição final de água cinzas domésticas**. In: CONGRESSO DA ABES, 32., 2023, Belo Horizonte. Anais[...] Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://congressoabes.com.br/anais/>.

GUIMARÃES, R. E. **Avaliação do Tratamento de Efluentes Domésticos por Bacia de Evapotranspiração – Um Estudo de Caso de Aldeia Velha, Silva Jardim, RJ**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

HEADLEY T. R.; DAVISON L.; HUETT D. O.; MULLER R. (2012). Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia. **Water Research**, 46, p. 345-354.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Ed. Universidade de Passo Fundo. 3º edição, 2014.

KLEIN, Cláudia; KLEIN, Vilson Antonio. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - ReGet**, [s. l.], v. 19, ed. 1, p. 21-29, 2015.

MACHADO, F. D.; ANDRADE, O. A.; MAIA, M. H.; REZENDE, P. A. A.II-240 - **Construção participativa de sistemas individuais de esgotamento sanitário em comunidades rurais de Viçosa e região – MG**. Congresso ABES/FENASAN 2017, São Paulo, 2017.

MARTINETTI, T. H. **Análise da sustentabilidade de sistemas locais de tratamento de efluentes sanitários para habitações unifamiliares**. 2015. 310 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

MELLO, E. J. R. DE. **Tratamento de esgoto sanitário**. Avaliação da estação de tratamento de esgoto do Bairro Novo Horizonte na cidade de Araguari - MG. Monografia de pós graduação lato sensu em Engenharia Sanitária. Uberlândia, MG, 2007.

NETTO, O. P. A.; GUERRA, M. R. L.; SILVA, P. R. M.; SILVA, F. R. Biorremediação vegetal do esgoto domiciliar: o caso da fossa verde em comunidades rurais do alto sertão alagoano. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v.1, n.3, p.103-113, set./dez., 2015. Disponível em: <http://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesenvolvimento>.

OLIVEIRA, Gabriela Domício de; PEREIRA, Italo Andrade; SOARES, Alexandra Fátima Saraiva; RAMOS, Geraldo Magela Perdigão Diz. Tratamento domiciliar de águas negras: tanque de evapotranspiração. **Revista PETRA**, [s. l.], v. 4, ed. 2, p. 194/214, 2018.

OLIVEIRA, Keila Roberta Ferreira de. **Processos ecotecnológicos no tratamento de efluentes líquidos de fecularia**. 2007. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, [S. l.], 2007.

PAES, M. W.; CRISPIM, C. M.; FURTADO, D.G. Uso de tecnologias ecológicas de saneamento básico para solução de conflitos socioambientais. **Pernambuco: Gaia Scientia**, 48 v. 8, 2014.

PAMPLONA, S.; VENTURI, M. **Esgoto à flor da terra**. Permacultura Brasil. Soluções Ecológicas, ano VI, v. 16, p. 18-19. 2004.

PAULO, L. P.; BERNARDES, F. S. **Estudo de tanque de evapotranspiração para o tratamento domiciliar de águas negras**. Belo Horizonte: UFMG, 2004. 10 p.

PAULO, P. L. et al. Evapotranspiration tank for the treatment, disposal and resource recovery of blackwater. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 147, n. April, p.61–66, 2019.

PEREIRA, A. R; ANGELOCCI, L. R; SENTELHAS, P. C. LCE 306 – **Meteorologia Agrícola**. ESALQ/USP. Piracicaba, SP, fevereiro de 2007. Cap 12. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/lce306.html>.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

REZENDE, V. C. D. **Tanque de evapotranspiração no tratamento de esgoto sanitário em comunidades rurais**. Dissertação (Mestrado em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado). Instituto Federal Goiano, Urutaí, GO. 2019. 38 f.

SANTOS, T. C. C.; BASTOS, R. K. X.; DE SOUZA, B. V.; CAPOBIANGO, G. V.; DE OLIVEIRA Andrade, A. XII-049 – **Câmara de recepção e digestão anaeróbia de tanque de evapotranspiração (TEVAP) composta por painéis de argamassa armada**. 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Viçosa, Minas Gerais. 2019.

SILVA, R. W.; SANTOS, O. G. **Dimensionamento e construção de tanque de evapotranspiração para o tratamento de esgoto sanitário**. 14 f. (Trabalho de conclusão de Curso) - Curso de Engenharia Ambiental, Faculdade de Engenharia Ambiental, Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2017.

SILVA, Priscila Romana da. **Avaliação ecotoxicológica de esgoto sanitário antes e após tratamento anaeróbio**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/27650>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS); **Esgotamento Sanitário 2021**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>. Acesso em: 20 out. 2023.

VENTURI M (2004) Experiência de Extensão: **Tratamento de esgotos que produz alimentos**. Disponível em <<http://www.agroecologia.ufsc.br/material> >

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias)**. v. 1., 4ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472p.

VYMAZAL, J.; KRÖPFELOVÁ, L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 13, p.3911–3922, 2009.

ZUQUIM, G.; COSTA, F.R.C.; PRADO, J.; TUOMISTO, H. **Guia de samambaias e licófitas da Rebio Uatumã - Amazônia Central**. Manaus: Áttema, 2008.