

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE WOSCH FÁVARO

ALTERNATIVA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS EM  
COMUNIDADES RURAIS: PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E  
MONITORAMENTO DE BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO INSTALADA NA  
REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

CURITIBA

2021

ALEXANDRE WOSCH FÁVARO

ALTERNATIVA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS EM  
COMUNIDADES RURAIS: PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E  
MONITORAMENTO DE BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO INSTALADA NA  
REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Flavia Locateli Godoi

Coorientadora: MSc Luiza Natalino

CURITIBA

2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

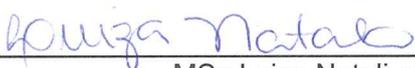
## TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

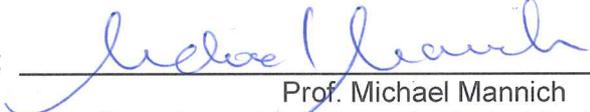
ALEXANDRE WOSCH FAVARO

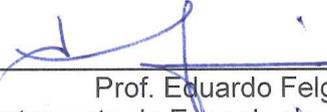
### ALTERNATIVA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS EM COMUNIDADES RURAIS: PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E MONITORAMENTO DE BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO INSTALADA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

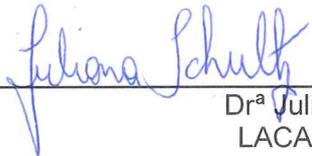
Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 95, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):   
Prof.<sup>a</sup> Ana Flávia Locateli Godoi  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Co-orientador(a):   
MSc Luiza Natalino  
Mestre em Engenharia Ambiental pela UFPR

Membro(a) 1:   
Prof. Michael Mannich  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2:   
Prof. Eduardo Felga Gobbi  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 3:   
Dr.<sup>a</sup> Juliana Schultz  
LACAUT / UFPR

Curitiba, 11 de maio de 2022.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a divindade superior, criadora e regente de tudo que existe. Pelo dom da vida, saúde, disposição e oportunidade de realizar esse trabalho, assim como finalizar essa etapa da minha vida.

Agradeço a minha mãe, Silmara. Pela educação e princípios transmitidos, fundamentais em minha formação como pessoa. Por todos os anos de dedicação, paciência e confiança. Sem seu alicerce nada disso seria possível.

Igualmente agradeço ao Francisco, meu pai e grande companheiro. Por todos os ensinamentos transmitidos, pelo apoio e confiança em todos os momentos dessa etapa.

À minha irmã e grande amiga, Valéria. Pela parceria, pelo apoio de anos, por toda caminhada e pelas boas lembranças partilhadas.

À toda família Wosch pelos ensinamentos de vida, educação compartilhada e pela oportunidade de poder desfrutar da companhia de vocês cotidianamente, tenho orgulho da nossa união e sou muito feliz convivendo em nosso condomínio familiar. Agradeço em especial minha vó Cecília, por nos proporcionar tais condições e por ser a pedra fundamental da nossa unidade. Também agradeço ao meu tio Abrão e minha madrinha Andréa, pelo suporte fundamental em diversos momentos dessa jornada, pelas palavras de incentivo, conselhos e a mão sempre estendida. Assim como, agradeço a todos os meus primos-irmãos, por fazerem parte de todas as fases da minha vida de forma tão efetiva. Crescer, amadurecer e dividir a vida com vocês é um privilégio. Essa conquista tem um pouquinho de cada um, carrego vocês comigo e espero que seja sempre assim.

Agradeço os tantos amigos que a Engenharia Ambiental e a UFPR me proporcionaram nessa jornada. A convivência com vocês fez meus dias mais fáceis e felizes. Bianca, Camila Hoffman, Camila Roth, Carolina, Eduardo, João Gustavo, Kaian, Rafael e Tiago agradeço de forma especial a companhia de todos vocês, as risadas, viagens, festas, madrugadas de estudo e as tantas outras memórias.

Faço também um agradecimento especial a Jéssica, pelos últimos anos de companheirismo e apoio.

Ao CAEA e todos os amigos que fizeram parte das gestões que participei, por todo desenvolvimento pessoal e pelos bons momentos colecionados.

Além de agradecer aqueles que sempre estiveram comigo, além do âmbito acadêmico. Daniel, Jhonnatan e Rodrigo: “família não é sangue, família é sintonia”.

Agradeço a companhia da Baguera nesse último ano durante as madrugadas de TCC.

Minha gratidão a professora Ana Flávia Locateli Godoi, pela orientação nesse projeto. Assim como, pela disponibilidade e empenho nas tantas vezes em que nós (alunos) recorremos a você e fomos acolhidos em todos esses anos, meu muito obrigado e cumprimentos pela ótima profissional que é.

Também agradeço a Luiza Natalino por toda disponibilidade, atenção e empenho na coorientação desse trabalho. Sua ajuda foi fundamental. Sucesso.

Agradeço o professor Antonio Carlos Vargas Motta e a laboratorista Carla Albuquerque por todo apoio, disponibilidade e atenção durante as atividades realizadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFPR.

Por fim agradeço ao casal Laísa e Bruno, moradores do Refúgio Mar de Nuvens, pela confiança em me receber na casa de vocês, por confiarem em nosso trabalho e pelas sempre boas recepções. A proposta de vida de vocês está presente em cada espaço do Refúgio, e ela é inspiradora. Foi um prazer conhecê-los.

Dedico esse trabalho a todos vocês, muito obrigado. Vocês são parte dessa conquista.

## RESUMO

Questões de saneamento básico estão diretamente relacionadas a qualidade de vida e bem-estar dos seres humanos. No Brasil uma parcela da população é desassistida nesse quesito. As dificuldades da universalização do esgotamento sanitário são muitas, principalmente no meio rural, onde sistemas centralizados de coleta e tratamento de esgoto muitas vezes não são viáveis. Para regiões de difícil acesso, áreas de baixa densidade demográfica e até mesmo para o meio rural, despontam como opção viável as tecnologias de tratamento de esgoto descentralizadas. Uma delas é a bacia de evapotranspiração (BET), objeto de estudo dessa pesquisa. O objetivo do presente trabalho foi monitorar e analisar tecnicamente uma BET em operação instalada na Região Metropolitana de Curitiba. Foram realizadas medidas do nível de efluente dentro do tanque. A partir de dados meteorológicos do Simepar, foi estimado o valor da Evapotranspiração Potencial para a região de estudo, seguindo o método de Penman-Monteith-FAO. A partir dos dados de precipitação e de evapotranspiração, foi possível realizar um balanço, para então discutir sobre a contribuição desses dois fatores na variação do nível de efluente na BET. Duas campanhas de amostragem de solos foram feitas na BET, no intervalo de 5 meses, com objetivo de realizar análises laboratoriais e caracterizar o solo superficial da BET quanto ao nível de alguns nutrientes e parâmetros químicos. Foi constatado que o valor de pH do solo decaiu no intervalo estudado e existe a ocorrência de acúmulo de alumínio na BET, o que pode levar à saturação do solo no futuro. Também foi constatado que o solo da BET apresenta atualmente baixos níveis de potássio, nutriente fundamental para as bananeiras e as outras plantas presentes no tanque, responsáveis pelo consumo de água e evapotranspiração no sistema. Sendo assim, sugere-se estudar e propor formas de remediar o solo no tanque à fim de oferecer uma melhor condição para as plantas e também proporcionar uma condição melhor para o sistema como um todo. Finalmente, foi realizada uma entrevista com os próprios usuários do mecanismo, na qual eles comentam um pouco sobre o funcionamento e as fases de construção, operação e manutenção da BET, além de afirmarem que a tecnologia descentralizada de tratamento de esgoto sanitário opera conforme esperado, proporcionando alto grau de satisfação.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto sanitário; Bacia de Evapotranspiração; Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: População atendida com redes públicas de esgotos por região brasileira (% total e urbana, em 2019).....	11
FIGURA 2: Más condições de saneamento no Brasil. Lado esquerdo - Foto de área urbana de Olinda/PE, onde o saneamento básico é precário. Lado direito - Lançamento de esgoto bruto diretamente no solo em área rural.....	13
FIGURA 3: Destinação do esgoto doméstico nas residências rurais brasileiras.....	14
FIGURA 4: Exemplos de sistemas descentralizados individuais e em cluster para tratamento de esgoto sanitário.....	16
FIGURA 5: Bacia de evapotranspiração - disposição das camadas e sentidos de funcionamento (setas).....	20
FIGURA 6: Volume de controle com uma entrada e uma saída.....	22
FIGURA 7: Mapa da Região Metropolitana de Curitiba.....	29
FIGURA 8: Campina Grande do Sul em destaque.....	30
FIGURA 9: Fases da construção da BET e características locais. A. Recorte do solo onde foi construída a BET; B. Morador e outro colaborador participam do processo de construção; C. Localização da BET em relação à residência; D. As diferentes espécies plantadas na bacia de evapotranspiração.....	31
FIGURA 10: Balanço hídrico feito para o cálculo da área superficial necessária na construção da bacia de evapotranspiração no Refúgio Mar de Nuvens.....	32
FIGURA 11: Superfície central elevada em relação à borda do tanque, com intuito de evitar o acúmulo de água proveniente de chuvas. ....	34
FIGURA 12: Monitoramento do nível do efluente dentro da BET. Lado esquerdo – o autor insere a ripa de madeira na tubulação interna à BET. Lado direito – com o auxílio da trena é feita a leitura do nível de efluente na BET. ....	36
FIGURA 13: Coletas em campo. A. O autor se utiliza de uma régua transparente e uma cavadeira articulada para realizar a tarefa de abrir as covas na BET; B. Luiza Natalino realizando a mistura dos solos no balde; C. O autor ao fundo próximo a BET enquanto Luiza auxilia no ensacamento	

e identificação das amostras; D. As amostras homogêneas devidamente identificadas para serem levadas ao laboratório.....	39
FIGURA 14: Distribuição das regiões onde foram feitas as coletas. ....	40
FIGURA 15: Disposição das amostras compostas. Cada “X” representa uma cova aberta no solo da BET e na sua vizinhança.....	41
FIGURA 16: Fase pré análise. ....	44
FIGURA 17: Etapas no laboratório.....	45
FIGURA 18: Registros do primeiro cacho de bananas da BET. Lado esquerdo: Registro do mês de janeiro de 2022. Lado direito: Registro do mês de março de 2022.....	61
FIGURA 19: Registros das diferentes plantas e flores da BET, responsáveis pela melhora nos aspectos paisagístico e de serviços ecossistêmicos locais.....	67

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (mm/dia) ESTIMADA PARA O PERÍODO.....	50
GRÁFICO 2: PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (mm/dia) PARA O PERÍODO.....	51
GRÁFICO 3: PRECIPITAÇÃO, EVAPOTRANSPIAÇÃO POTENCIAL E NÍVEL DA BET (mm/dia) PARA O PERÍODO.....	52
GRÁFICO 4: NÍVEL DA BET E BALANÇO (PRECIPITAÇÃO – ETo) (mm/dia) PARA O PERÍODO.....	53
GRÁFICO 5: CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO (Cmol/dm <sup>3</sup> ) PARA AS DUAS AMOSTRAGENS REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUVENS ..	62
GRÁFICO 6: CONCENTRAÇÃO DE CARBONO (g/dm <sup>3</sup> ) PARA AS DUAS AMOSTRAGENS REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUVENS.....	63
GRÁFICO 7: CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO (mg/dm <sup>3</sup> ) PARA AS DUAS AMOSTRAGENS REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUVENS....	64

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VANTAGENS AO ESCOLHER UMA FORMA DE TRATAMENTO DESCENTRALIZADO PARA O TRATAMENTO DE ESGOTOS. ....	17
TABELA 2: COMPARAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS RELEVANTES QUANTO A EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DE BETs, BASEADO EM DIFERENTES AUTORES.....	25
TABELA 3: NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS DE SOLO, CONFORME REGIÃO E PROFUNDIDADE DE ESTUDO. ....	41
TABELA 4: PARÂMETROS ANALISADOS NO LABORATÓRIO DE QUÍMICA E FERTILIDADE SO SOLO (UFPR) E SEUS RESPECTIVOS MÉTODOS.....	42
TABELA 5: NÍVEIS DE EFLUENTE NO INTERIOR DA BET DO REFÚGIO MAR DE NUUVENS, MEDIDOS EM cm. ....	48
TABELA 6: RESULTADOS PARA O pH ACIDEZ ATIVA ( $\text{CaCl}_2$ ) E pH ACIDEZ POTENCIAL (SOLUÇÃO SMP) NAS AMOSTRAGENS DE SOLO DE NOVEMBRO/2021 E MARÇO/2022, REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUUVENS. ....	55
TABELA 7: INTERPRETAÇÃO DO PARÂMETRO pH NO SOLO PARA O ESTADO DO PARANÁ.....	55
TABELA 8: CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E POTÁSSIO ( $\text{Cmol/dm}^3$ ) PARA AS AMOSTRAS DE SOLO DA BET E DO CONTROLE EM NOVEMBRO/2021 E MARÇO/2022 REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUUVENS.....	56
TABELA 9: INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS ALUMÍNIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E POTÁSSIO NO SOLO PARA O ESTADO DO PARANÁ. ....	57
TABELA 10: SATURAÇÃO DO SOLO DA BET E DO CONTROLE POR ACÚMULO DE ALUMÍNIO (m%). ....	59
TABELA 11: INTERPRETAÇÃO DA SATURAÇÃO POR ALUMÍNIO (m%).....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
BET	- Bacia de Evapotranspiração
BETs	- Bacias de Evapotranspiração
CIC	- Cidade Industrial de Curitiba
COMEC	- Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVID-19	- <i>Corona Vírus Disease 2019</i>
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DHS	- Departamento de Hidráulica e Saneamento
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
DSEA	- Departamento de Solos e Engenharia Agrícola
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FNEM	- Fórum Nacional de Entidades Metropolitanas
FUNASA	- Fundação Nacional de Saúde
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
LQFS	- Laboratório de Química e Fertilidade do Solo
NBR	- Norma Brasileira
OMS	- Organização Mundial da Saúde
ONU	- Organização das Nações Unidas
PNAD	- Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
RMC	- Região Metropolitana de Curitiba
SIMEPAR	- Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná
SNIS	- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TEvap	- Tanque de Evapotranspiração
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UNICEF	- Fundo das Nações Unidas Para Infância
VC	- Volume de Controle
WHO	- <i>World Health Organization</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
1.1 OBJETIVOS .....	8
Objetivo geral .....	8
Objetivos específicos .....	8
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>10</b>
2.1 SANEAMENTO E A REALIDADE BRASILEIRA .....	10
2.2 SANEAMENTO RURAL E EM LOCAIS DE DIFÍCIL ACESSO .....	12
2.3 TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE EFLUENTES SANITÁRIOS .....	14
2.4 TECNOLOGIA DE ESTUDO: BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	18
2.4.1 Processos biológicos anaeróbios e aeróbios numa BET .....	23
2.4.2 O processo de evapotranspiração.....	24
2.4.3 A eficiência de BETs .....	25
2.5 QUALIDADE E IMPORTÂNCIA DO SOLO NA BET .....	26
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>28</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO - REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA .....	28
3.2 OBJETO DE ESTUDO - CARACTERÍSTICAS E DESCRIÇÃO DA BET .....	30
3.3 DIMENSIONAMENTO DA BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	32
3.3.1 Monitoramento do nível do efluente dentro da BET .....	35
3.3.2 Monitoramento das condições ambientais da localidade .....	36
3.3.3 Cálculo da Evapotranspiração.....	37
3.4 ACOMPANHAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	38
3.4.1 Amostras do solo – coletas em campo.....	38
3.4.2 Análise laboratorial do solo na BET - níveis de nutrientes e outras propriedades químicas.....	42
3.5 ENTREVISTA – A OPINIÃO DOS USUÁRIOS DA BET ESTUDADA.....	45
<b>4.RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>48</b>
4.1 MONITORAMENTO DA BET .....	48
4.1.1 Monitoramento do nível de efluente na BET .....	48
4.1.2 Monitoramento das condições ambientais da localidade .....	49
4.1.3 Cálculo da Evapotranspiração Potencial local.....	49
4.1.4 Balanço entre precipitação e evapotranspiração na BET.....	51
4.2 ACOMPANHAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NA BET .....	54

4.2.1 pH – Potencial Hidrogeniônico .....	54
4.2.2 Alumínio, Cálcio, Magnésio e Potássio .....	56
4.2.3 Saturação por alumínio – o parâmetro “m%” .....	59
4.2.4 Sódio, Carbono e Fósforo .....	62
4.3 ENTREVISTA ABERTA COM OS MORADORES.....	64
<b>5 PROPOSTA DE ESTUDO A LONGO PRAZO .....</b>	<b>68</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Soluções na área de saneamento são fundamentais para melhoria das condições da saúde humana, para qualidade das águas e do solo. O acesso ao saneamento básico é direito constitucional, a ser garantido pelo Estado através de políticas públicas (FUNASA, 2019). Dados da Agência Nacional de Águas (ANA) de 2017, caracterizaram a realidade brasileira quanto a situação do saneamento com a seguinte distribuição: 43% da população possui acesso a sistemas coletivos de esgotamento, 18% têm os esgotos coletados, mas não tratados, 12% dos brasileiros são atendidos por solução individual e 27% da população é completamente desprovida de coleta e/ou tratamento de esgoto.

Geralmente, as políticas de acesso ao saneamento não se aplicam ao meio rural, uma vez que é muito difícil viabilizar a instalação de sistemas centralizados de tratamento de esgoto e distribuição de água devido à dificuldade de construção e a baixa ocupação demográfica nessas áreas (RESENDE et al., 2018).

A adoção de sistemas de baixa exigência energética e de operação simples como os sistemas descentralizados têm se destacado em função da facilidade operacional e economia em países como o Brasil (MESQUITA, 2021). Tonetti et al. (2018) consideram diversas alternativas de sistemas descentralizados como sendo tecnologias simples que buscam ser sustentáveis, economicamente viáveis, ambientalmente corretas e acessíveis no aspecto social. Portanto, é fundamental o desenvolvimento e a propagação de soluções descentralizadas (ROCHA, 2021) e tecnológicas baratas que consigam suprir as diferentes necessidades e especificidades das comunidades isoladas (RESENDE et al., 2018).

Uma das tecnologias de tratamento de esgoto descentralizadas promissoras está a Bacia de Evapotranspiração (BET), que combina um sistema parecido com um reator anaeróbio com camadas estruturadas, complementado por um filtro biológico e zona de raízes (GALBIATI, 2009; FIGUEIREDO et al., 2019; ROCHA, 2021).

Tal tecnologia prevê a degradação da matéria orgânica e a incorporação dos nutrientes, sem saída de efluentes do sistema. Seu bom funcionamento é observado quando o esgoto pós-tratado acaba sendo eliminado do tanque através do fenômeno de evapotranspiração (NATALINO, 2021). Na camada superficial de BETs há o

cultivo de plantas, preferencialmente de alta demanda hídrica, que são responsáveis por essa transferência das águas do solo para atmosfera (ROCHA, 2021).

O dimensionamento de BETs ainda é feito de forma mais experimental, ou seja, baseado em experiências registradas de outros projetos sobre o tema. Não existindo leis e normativas de referência. Sendo assim, muitos são os pontos de estudo que poderiam melhorar as referências e diretrizes quanto a concepção de uma BET: materiais de construção, relação ideal de eficiência do sistema sob distintas condições climáticas, profundidade, relação área necessária por usuário do sistema, dentre outros.

Com o intuito de contribuir com a disseminação dessa alternativa descentralizada de tratamento de esgotos domésticos, bem como estudar as características e lacunas que permeiam a mesma, esse trabalho fez o monitoramento, por um período de 8 meses, de uma Bacia de Evapotranspiração instalada e operando na Região Metropolitana de Curitiba (PR).

## 1.1 OBJETIVOS

### Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é caracterizar e monitorar uma bacia de evapotranspiração (BET).

### Objetivos específicos

- Monitorar o nível do efluente dentro do tanque, através de medidas *in loco*;
- Monitorar a precipitação na região de estudo;
- Estimar através dos dados meteorológicos da região o valor da Evapotranspiração Potencial (ET<sub>p</sub>) utilizando o método de Penman-Monteith;
- Realizar amostragens do solo no interior e exterior da BET;
- Determinar o pH e a concentração de alumínio, fósforo, carbono, sódio, potássio, cálcio e magnésio com intuito de aferir a fertilidade do solo em duas campanhas;

- Coletar informações e opiniões do casal residente no local a respeito da instalação, funcionamento, manutenção e satisfação quanto a alternativa adotada.
- Propor um estudo a longo prazo para acompanhar as variações no nível da BET e verificar as mudanças na fertilidade do solo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SANEAMENTO E A REALIDADE BRASILEIRA

Dentre os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável propostos pela Organização das Nações Unidas, o sexto prevê garantir a disponibilidade e a gestão sustentável de água potável e do saneamento para todos (ONU, 2015). Portanto, saneamento está diretamente ligado a questões como qualidade de vida, saúde pública, meio ambiente, proliferação de doenças, disponibilidade de água potável, dentre outros. Embora o tema esteja elencado dentre essas metas, o que demonstra sua importância no dia a dia dos seres humanos, estima-se que no mundo 2,3 bilhões de pessoas ainda vivam sem acesso a práticas adequadas de esgotamento sanitário, o que representa 30% da população global (WHO/UNICEF, 2017).

O saneamento básico é definido no Brasil pela lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007 como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais em quatro áreas: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais (TONETTI et al., 2018). Sendo um país com território de proporções continentais, logo, se torna um grande desafio assegurar que a totalidade de sua população tenha acesso a serviços básicos de saneamento.

Segundo Landau e Moura (2016), dentre os serviços nacionais de saneamento básico, o que apresenta piores índices de abrangência municipal é o esgotamento sanitário.

A situação brasileira de saneamento é composta de diversas realidades, várias delas muito distintas entre si. Até mesmo capitais dos estados, grandes cidades e aglomerados demográficos enfrentam desafios e são falhos quanto à universalização do saneamento básico. Maior ainda é adversidade em regiões distantes dessas grandes cidades, áreas rurais, comunidades tradicionais e outras regiões de difícil acesso. Apesar do problema existir também em grandes centros, há uma enorme disparidade entre a situação das áreas urbanas e das rurais já que a cada dez pessoas sem acesso a práticas adequadas de saneamento, sete vivem em áreas rurais (WHO/UNICEF, 2015).

Em seu último relatório, referente ao ano de 2019, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) expôs os números que retratam a realidade

brasileira: as redes de esgotos atendem 54,1% da população total do país (110,3 milhões de habitantes) e 61,9% da população urbana (108,1 milhões habitantes) (SNIS, 2020). Sobre as diferentes realidades espalhadas no território do país, o relatório também confirma a desigualdade já citada. Por exemplo, a macrorregião Sudeste apresenta índices de 79,5% da sua população total com acesso as redes de esgotos e 83,7% da sua população urbana com acesso ao serviço, enquanto a macrorregião Norte possui apenas 12,3% e 15,8%, respectivamente (SNIS, 2020). O panorama da situação brasileira pode ser constatado no mapa extraído do mesmo documento, apresentado na FIGURA 1.

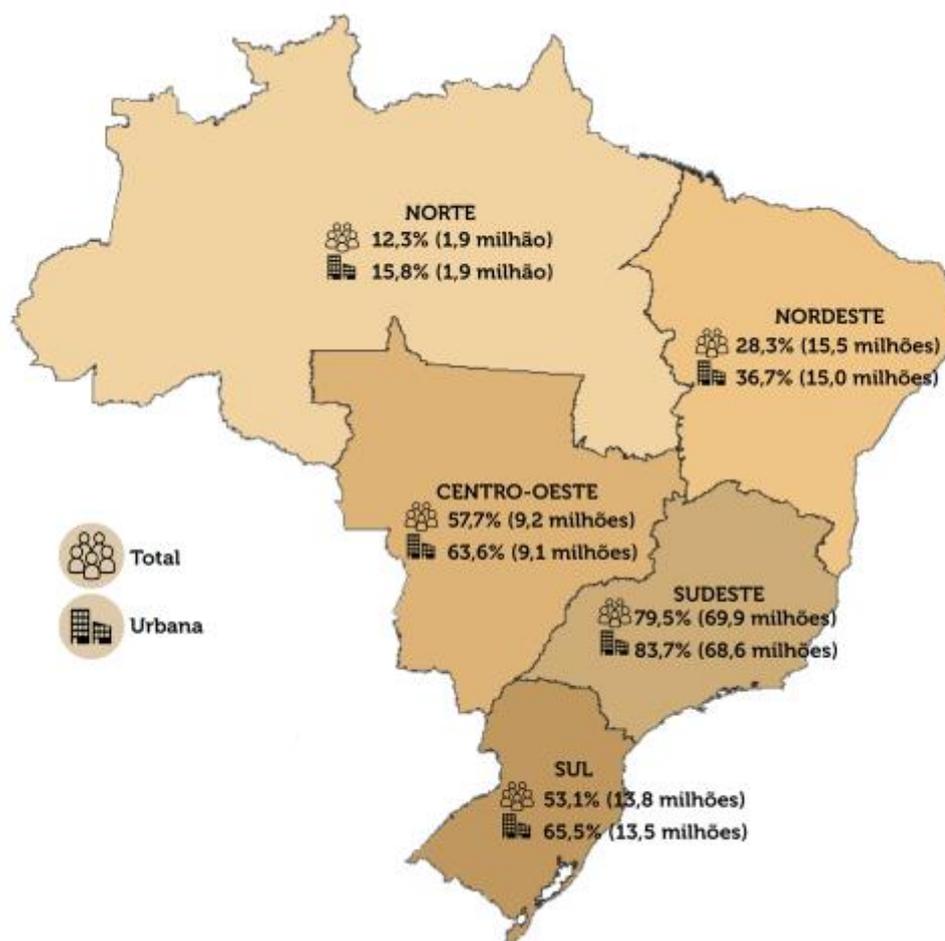


FIGURA 1: População atendida com redes públicas de esgotos por região brasileira (% total e urbana, em 2019). Fonte: SNIS, 2020.

Com dificuldade de acesso a esse serviço público fundamental são diversas as formas que a população brasileira costuma destinar seu esgoto domiciliar e sanitário. Na maioria dos municípios brasileiros, as fossas rudimentares continuam

sendo a destinação mais comum dos esgotos domésticos (53,17%), outra opção são as fossas sépticas (8,03%) e valas a céu aberto, disposição direta em corpos d'água e outras formas de destinação incorretas (3,35%) (TONETTI et al., 2018). Em municípios e distritos de pequeno porte (abaixo dos 50.000 habitantes), localidades predominantemente rurais e com população mais dispersa, esse cenário é ainda mais recorrente (IBGE, 2010).

## 2.2 SANEAMENTO RURAL E EM LOCAIS DE DIFÍCIL ACESSO

Pode-se facilmente elencar o saneamento como um dos instrumentos capazes de promover a qualidade de vida dos seres humanos. No entanto, inerente à universalização desse serviço estão a superação de entraves tecnológicos, políticos e gerenciais que dificultam o atendimento às populações de zonas rurais, aos municípios de pequeno porte e às comunidades isoladas (TONETTI et al., 2018).

Algumas comunidades rurais e de pequenos municípios subsistiram, e ainda subsistem, à margem do Estado brasileiro, com carências nas mais diversas áreas essenciais ao desenvolvimento humano: saúde, alimentação, educação, energia, transporte público, segurança, assistência técnica e extensão rural, assim como, indiscutivelmente, o saneamento básico (FUNASA, 2019).

Nessas regiões, as redes de distribuição de água, coleta de esgoto, serviços de drenagem e até mesmo a coleta de resíduos são diversas vezes inexistentes ou precárias. Tal situação faz com que as comunidades rurais ou isoladas adotem soluções locais, as vezes precárias e improvisadas (FIGURA 2), para suprir a necessidade dos serviços básicos de saneamento (FIGUEIREDO, 2019).



FIGURA 2: Más condições de saneamento no Brasil. Lado esquerdo - Foto de área urbana de Olinda/PE, onde o saneamento básico é precário. Lado direito - Lançamento de esgoto bruto diretamente no solo em área rural. Fonte: adaptado de Tonetti, 2018

As políticas públicas geralmente priorizaram áreas urbanizadas e de retorno econômico, não abrangendo a população como um todo e deixando à margem grande parcela dos cidadãos brasileiros (NATALINO, 2021).

Os efeitos de tal condição são diversos, mas um dos mais relevantes são os problemas de saúde associados a falta de saneamento básico. Segundo Follador et al. (2015) o tratamento de água e esgoto, assim como outras condições do meio em que se vive, auxiliam na melhoria da saúde, diminuindo a ocorrência de doenças como cólera, dengue, esquistossomose e leptospirose.

Nas localidades rurais, o cenário também é bem precário. De acordo com a OMS e o Fundo das Nações Unidas Para a Infância (UNICEF), nessas regiões cerca de 49% da população vive em condições inadequadas, por exemplo utilizando banheiros compartilhados, defecando ao ar livre ou também lançando seus dejetos sem nenhum tratamento diretamente no solo ou em corpos da água (WHO/UNICEF, 2015).

Segundo o PNAD (2013 apud TONETTI et al., 2018), estudo realizado pelo IBGE, somente 8% das residências consideradas rurais do país estão conectadas à rede coletora de esgoto. Dados mais atuais do IBGE (2015) mostram também que 12,6% desses domicílios não possuem nenhuma forma de tratamento para tal. E

mesmo dentre as residências que possuem tratamento, um total de 57,7% apresentam destinações inadequadas para o esgotamento sanitário (FIGUEIREDO, 2019). A distribuição completa da situação pode ser observada na FIGURA 3:

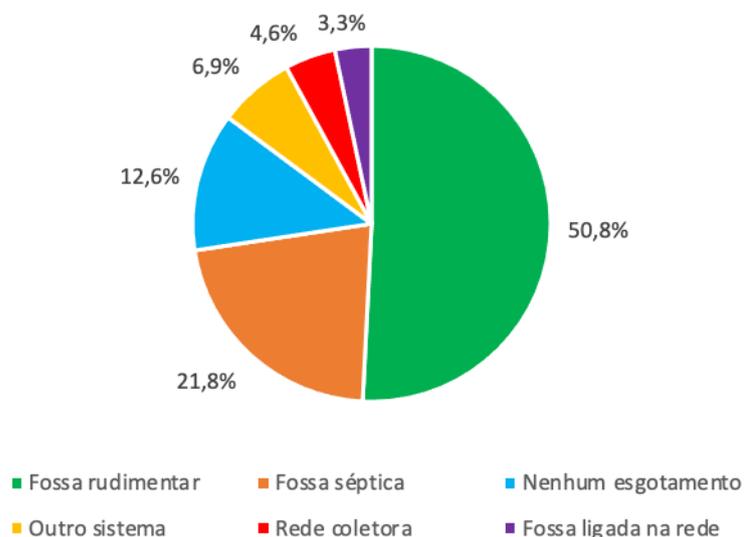


FIGURA 3: Destinação do esgoto doméstico nas residências rurais brasileiras. Fonte: o Autor, 2022 (com base em Figueiredo, 2019 e nos dados do IBGE 2015).

Ainda que sejam observados leves avanços na melhoria da situação do esgotamento sanitário em zonas rurais brasileiras (LANDAU; MOURA, 2016), o cenário ainda preocupa na maioria dessas localidades e a meta da universalização ainda se mostra longínqua (TONETTI et al., 2018).

O debate em torno da precariedade e da falta de acesso ao esgotamento sanitário mostra que é fundamental dispor mais esforços na ampliação do atendimento dos serviços, principalmente em áreas rurais, periurbanas e demais locais de acesso negado aos sistemas centralizados. Nesta conjuntura, a associação de diferentes sistemas centralizados e descentralizados desponta como solução pertinente para superação da deficiência em esgotamento sanitário no Brasil (MESQUITA, 2021).

### 2.3 TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE EFLUENTES SANITÁRIOS

Os sistemas de tratamento de esgoto mais comuns nas grandes cidades são os do tipo centralizado. Tais sistemas, geralmente gerenciados pelo poder público, atuam coletando grandes volumes de efluentes residuários para posteriormente

serem tratados e descartados a grandes distâncias de suas fontes de geração (LIBRALATO, 2012).

Sistemas centralizados de tratamento de esgoto com redes coletoras, ETEs, galerias e até mesmo distribuição de água são impraticáveis em regiões periurbanas e rurais. Duas características fundamentais para tal fato são as longas distâncias de áreas centrais e as baixas densidades demográficas que essas regiões geralmente apresentam (MESQUITA, 2021; ROCHA, 2021).

Expostos a essa realidade, sistemas locais de tratamento de esgoto (ou descentralizados), uma vez bem projetados, construídos e manipulados, são alternativas viáveis para tratar o esgoto domiciliar sanitário. Assegurando assim a saúde de comunidades isoladas ou rurais, e também mantendo a qualidade ambiental desses locais (TONETTI et al., 2018).

Esses sistemas descentralizados são muitas vezes considerados ineficientes quando comparados às soluções centralizadas adotadas nas grandes cidades, além de sinônimos de opções precárias e subdesenvolvidas. Porém, tal interpretação não leva em conta que para determinadas realidades as soluções descentralizadas podem ser as mais adequadas (MESQUITA, 2021).

Os sistemas de tratamento descentralizados são definidos como os que possuem coleta, tratamento e disposição e/ou reutilização do esgoto próximos as fontes de geração. A FIGURA 4 ilustra alguns exemplos de diferentes formas e associações de sistemas considerados descentralizados.



FIGURA 4: Exemplos de sistemas descentralizados individuais e em cluster para tratamento de esgoto sanitário. Fonte: Mesquita, 2021.

No Brasil, a falta de legislação, normas e definições de responsabilidade na gestão desse tipo de sistemas contribui para que maiores porções da população continuem desassistidas, além de limitar a disseminação e implementação de mais experiências bem-sucedidas no assunto (MESQUITA, 2021).

Já num contexto mundial, esses sistemas vêm ganhando cada vez mais espaço nas últimas décadas. Isso se deve à diversas vantagens compartilhadas e discutidas em distintas literaturas publicadas sobre o tema. Alguns benefícios são a demanda por recursos financeiros baixos para construir e operar os mesmos, devolução de água tratada a aquíferos e cursos de água, cooperação com a sustentabilidade local, melhora da água subterrânea e superficial, além do reuso de água e nutrientes na região onde foram instalados (FIGUEIREDO, 2019).

Outra grande vantagem dos sistemas descentralizados é poder tratar de forma separada os distintos efluentes que compõem o esgoto sanitário domiciliar: as águas marrons e as águas cinzas (TONETTI et al., 2018). Sendo as águas marrons oriundas dos vasos sanitários, resumidamente, fezes, urina e papel higiênico. Enquanto as ditas águas cinzas são as originárias dos outros pontos de consumo da água da residência, por exemplo chuveiros, pias de cozinha, lavatórios, tanque e máquina de lavar roupa (ROCHA, 2021).

Na TABELA 1 são apresentadas vantagens em diferentes esferas referentes ao uso de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto.

TABELA 1: VANTAGENS AO ESCOLHER UMA FORMA DE TRATAMENTO DESCENTRALIZADO PARA O TRATAMENTO DE ESGOTOS.

ÁREA	VANTAGENS
<b>SOCIAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribuem para a melhoria da saúde da população local</li> <li>• Podem gerara trabalho e renda</li> <li>• Podem ajudar a produzir alimentos, contribuindo com a segurança alimentar</li> <li>• São adaptáveis aos costumes e à cultura</li> <li>• Normalmente são bem aceitos pela população e entidades fiscalizadoras</li> <li>• Podem ajudar a compor o paisagismo local</li> </ul>
<b>ECONÔMICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os sistemas mais simples têm baixo custo de instalação</li> <li>• Consomem pouca energia e insumos externos</li> <li>• Alguns subprodutos do sistema têm valor comercial e podem gerar renda (alimentos, biogás, plantas ornamentais)</li> <li>• Há economia em adubos quando se utiliza o esgoto tratado na agricultura</li> </ul>
<b>AMBIENTAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas unifamiliares podem ser compactos</li> <li>• Usam poucos insumos e energia na construção e operação</li> <li>• Reduzem a poluição do solo e corpos hídricos locais</li> <li>• Podem melhorar as condições ecológicas locais</li> <li>• Promovem o reuso de água e de nutrientes localmente</li> </ul>
<b>OPERACIONAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispensam a construção de rede coletora local e estações elevatórias</li> <li>• Têm boa flexibilidade operacional</li> <li>• Podem ser ampliados ao longo do tempo</li> <li>• Têm baixo consumo de materiais e energia</li> <li>• Em boa parte dos casos, não se cobra pelo tratamento</li> <li>• Não requerem mão-de-obra especializada</li> <li>• Podem tratar águas cinzas e de vaso sanitário separadamente</li> <li>• São pouco influenciados por desastres naturais</li> </ul>

FONTE: TONETTI ET AL., 2018.

No livro publicado pela Universidade de Campinas, intitulado “Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções”, Tonetti et al. (2018) apresentam uma série de opções de sistemas

descentralizados para o tratamento de efluentes domiciliares. Especificamente, são 15 soluções para o tratamento de esgoto que compõem o documento. Dentre elas estão a fossa seca, o banheiro seco compostável, os sistemas alagados, a fossa verde, opções que envolvem filtros e até mesmo biossistemas integrados. Tal obra comprova o quão vasto é o leque de opções para que se decida por uma opção ideal, dependendo das características locais e condições para construção de um desses sistemas. Vale salientar que esse volume é uma ótima leitura aos atraídos pelo assunto, seja qual for seu motivo e interesse na temática.

## 2.4 TECNOLOGIA DE ESTUDO: BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Nas áreas rurais de diversos países em desenvolvimento é cada vez mais comum que sistemas de zonas úmidas e zonas de raízes sejam utilizados como alternativa na implantação de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto (ROCHA, 2021). Por sua vez, destacam-se como características desses sistemas o baixo custo de construção e operação, simplicidade operacional, baixo (ou nenhum) consumo energético e, principalmente, satisfatória eficiência de tratamento quanto a remoção de matéria orgânica, nutrientes e dos sólidos (VON SPERLING, 2013).

Sistemas envolvendo zonas de raízes, além de reproduzir processos naturais, são tidos como uma das principais alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes sanitários, quando ponderadas questões econômico-sociais (ROCHA, 2021).

Além disso, tecnologias alternativas como essa compõem o que hoje é chamado de permacultura, que, resumidamente, se trata de um movimento que procura suprir as necessidades humanas a partir do gerenciamento, planejamento e implantação de sistemas simples, sustentáveis, que procuram se aproximar dos sistemas naturais e integrados, principalmente com os ambientes humanos (GALBIATI, 2009).

Lembrando que tratamentos centralizados de esgoto, mais tradicionais, não contemplam e nem são projetados para cumprir esses propósitos da permacultura e dos seus sistemas integrados. Um fator que comprova isso é o não aproveitamento dos nutrientes contidos nos resíduos humanos (GALBIATI, 2009; ROCHA, 2021). As fezes e urinas dos seres humanos são fontes de nitrogênio, fósforo e potássio que, após sofrerem transformações físico-químicas e em correta disposição, são ótimos

para serem consumidos por plantas (ROCHA, 2021). Em outras palavras, águas marrons são ideais para sistemas constituídos por plantas e zonas de raízes. De forma complementar, essa reciclagem de nutrientes evita o descarte indevido de esgoto em corpos hídricos, solos e demais disposições equivocadas. Além de, localmente, agregar nutrientes ao solo e as plantas (GALBIATI, 2009).

Dentre as possíveis alternativas descentralizadas para o tratamento de efluentes sanitários, a tecnologia estudada nesse trabalho é a bacia de evapotranspiração (BET). Outras denominações são comuns para esse mesmo sistema: Fossa verde, Ecofossa, Fossa Evapotranspiradora, Fossa Bioséptica, Canteiro Bio-séptico, Fossa de Bananeira, Tanque de Evapotranspiração (TEvap) (TONETTI et al., 2018; FIGUEIREDO 2019; ROCHA, 2021).

Atualmente, no Brasil ainda não existe legislação e nem mesmo normas técnicas que tratem do planejamento, dimensionamento e implantação de BETs. No momento, são tomadas como referências as normatizações referentes aos tanques sépticos: NBR 13.969/97 e NBR 7.229/93 – Projeto, construção e operação (FIGUEIREDO, 2019; SILVA, 2019).

Pode-se decompor uma bacia de evapotranspiração em três partes distintas. A primeira (inferior) é uma câmara central que deve receber e fazer a digestão preliminar dos efluentes sanitários, seguida de uma série de camadas filtrantes e por fim uma área superior reservada para o plantio de bananeiras e outras plantas (TONETTI et al., 2018).

Dentro de uma BET ocorrem a precipitação e sedimentação de sólidos, a deterioração anaeróbia (degradação microbiana realizada na ausência de oxigênio), decomposição aeróbia (com presença de oxigênio), a transferência de água via capilaridade e absorção de nutrientes e água pelas plantas (GALBIATI,2009).

As BETs são constituídas por uma caixa de alvenaria impermeabilizada (FUNASA, 2015), impossibilitando o vazamento dos efluentes internos e garantindo que águas subterrâneas não adentrem o sistema (TONETTI et al., 2018). Essa característica primordial da construção do sistema pode ser cumprida de várias formas, uma delas é adicionando agentes impermeabilizantes na massa de concreto (FIGUEIREDO, 2019). Outra alternativa recomendada é a utilização de lonas e mantas impermeáveis que garantam o isolamento da BET (FUNASA, 2018; FIGUEIREDO, 2019; NATALINO, 2021).

O esgoto sanitário adentra o sistema através de tubos que o direcionam para a câmara instalada na parte mais baixa do tanque (NATALINO, 2021). Na sequência o efluente deve apresentar fluxo ascendente e entrar em contato com as camadas superiores de materiais filtrantes, dando início a deterioração anaeróbica realizada por micro-organismos que se estabelecem e se multiplicam no local (TONETTI et al., 2018; FIGUEIREDO, 2019). Pode-se identificar as partes que compõe uma BET na FIGURA 5:



FIGURA 5: Bacia de evapotranspiração - disposição das camadas e sentidos de funcionamento (setas). Fonte: Rocha, 2021 (adaptado de Galbiati, 2009).

É habitual que os materiais internos do tanque sejam dispostos nas seguintes camadas: a inferior de entulho cerâmico (com cerca de 50 cm), seguida de uma camada de pedra brita (10 a 15 cm), uma camada de areia acima (10 a 15 cm) e, finalmente, a camada de terra que deverá receber as plantas (GALBIATI, 2009; TONETTI et al., 2018; FIGUEIREDO, 2019; NATALINO, 2021). Como as BETs possuem fluxo de efluente ascendente, é primordial que as camadas, citadas acima,

sejam dispostas respeitando a ordem decrescente de granulometria dos materiais filtrantes (FIGUEIREDO, 2019).

Conforme o volume de efluentes cresce no interior da BET, o esgoto passa a estar, de fato, em processo de tratamento, pois entra em contato com as camadas filtrantes de entulho, brita e areia (TONETTI et al., 2018). Quando atinge a camada de solo o efluente é conduzido por ascensão capilar até a superfície onde, finalmente, alcança as espécies vegetais que fazem parte do sistema (FIGUEIREDO, 2019). De tal forma, os nutrientes ficam disponíveis para serem absorvidos pelas plantas, enquanto a água filtrada pelo sistema será eliminada (liberada) através do processo de evapotranspiração (GALBIATI, 2009).

Para obter um bom funcionamento da BET é desejado que as plantas possuam algumas características fundamentais. Por exemplo: alta demanda hídrica (GALBIATI, 2009), preferencialmente apresentem folhas largas e raízes que desenvolvam no máximo 1 metro de comprimento (NATALINO, 2021).

Podem ser consideradas espécies ideais para BETs as bananeiras (*Musa sp*), o mamão (*Carica papaya*) e a taioba (*Xanthosoma*) (PAMPLONA; VENTURI, 2004; NATALINO, 2021; ROCHA, 2021). Além de algumas espécies ornamentais, como o copo-de-leite (*Zantedeschia aethiopica*), lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*), caeté banana (*Heliconia farinosa*) e beri (*Canna sp*) (EMATER 2016; NATALINO, 2021; ROCHA, 2021). Segundo Tonetti et al. (2018) os alimentos e folhas gerados numa BET são seguros para consumo humano, pois através de pesquisas sabe-se que eles não ficam contaminados por bactérias ou micro-organismos.

Ainda sobre o dimensionamento de bacias de evapotranspiração, aqui no Brasil, é comum ser adotada como referência a quantidade de 2m<sup>2</sup> de área superficial para cada indivíduo que utilizará o sistema de forma assídua (TONETTI et al., 2018; NATALINO, 2021). Salientando que tal medida é indicada para localidades que possuam evapotranspiração alta, ao mesmo tempo que para regiões frias e úmidas é indicada uma investigação particular (PAMPLONA; VENTURI, 2004). Sobre a profundidade, essa deve apresentar medidas entre 1,0 e 1,2 m (PAMPLONA; VENTURI, 2004; GALBIATI, 2009; TONETTI et al., 2018; NATALINO, 2021).

É recomendado também que, ainda no processo de planejamento e construção, seja instalado um tubo ladrão na camada de solo com intuito de drenar

chuvas excessivas e eventuais sobrecargas de esgoto sanitário descarregadas na BET (FIGUEIREDO, 2019). Se forem observados constantes vazamentos de água no tubo ladrão é possível que o sistema tenha sido subdimensionado (GALBIATI, 2009). Quanto a BETs e seu funcionamento, espera-se que não haja nenhuma saída de esgoto tratado do sistema (NATALINO, 2021). A operação e dimensionamento corretos prevê que os efluentes devem adentrar a bacia de evapotranspiração, passar determinado tempo de detenção no tanque e finalmente ser totalmente consumido pelas plantas (TONETTI et al., 2018).

Para melhor compreensão do funcionamento do sistema e do fluxo que o efluente deverá apresentar são necessárias algumas ponderações relacionadas a mecânica dos fluidos clássica.

Pode-se calcular a variação da massa de água (ou esgoto) interna a BET através do balanço de massa, estabelecendo um intervalo de tempo definido e um determinado volume de controle (FREITAS; MICHELS; PASSOS, 2014).

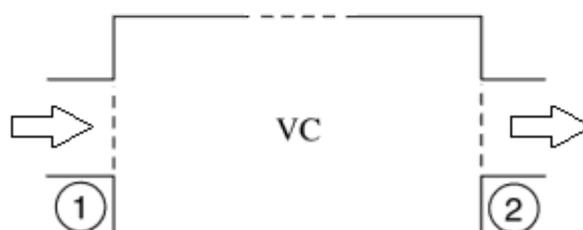


FIGURA 6: Volume de controle com uma entrada e uma saída. Fonte: Adaptado de White (2016).

Na FIGURA 6, é apresentado o exemplo de um volume de controle. O retângulo representa a área total, enquanto a parte pontilhada delimita a região de interesse do estudo (essa leva o nome de volume de controle). Estão identificadas também a entrada (1) e a saída (2) desse volume de controle e um fluxo direcionado descrito pelas setas. Ressaltando que para o caso de uma BET as saídas de água do sistema deverão ocorrer somente pelo processo de evapotranspiração ou por extravasamento via tubo ladrão.

Admitindo um  $N$  arbitrário para qualquer lei da física e um termo  $\eta$  dependente (relacionado à propriedade do sistema e correspondente a uma

pequena variação da massa interna ao tanque), temos a **equação 1** (FREITAS; MICHELS; PASSOS, 2014):

$$N_{sist} = \int n \partial M \quad [1]$$

No caso, a lei física da conservação de massa rege o sistema e a propriedade de interesse é a massa de água que passa pela BET.

Conforme a definição de diferencial, pelo limite pode-se então visualizar o deslocamento da massa de água no sistema conforme o fluxo (FREITAS; MICHELS; PASSOS, 2014). Definindo o estado inicial ( $t_0$ ) como o de coincidência entre o volume de controle e o sistema, e  $t_0+1$  como o estado seguinte, descobre-se a variação da propriedade em questão nos diferentes instantes, da entrada e saída da massa com a locomoção do sistema em relação ao volume de controle definido (FOX; MCDONALD, 1998).

Outra questão importante para o planejamento e dimensionamento de BETs é o balanço hídrico, que pode ser definido como a somatória das entradas e saídas de água de uma determinada região em um dado intervalo de tempo, considerando como resultado desse balanço a quantidade final de água que permanecer no local (TOMASELLA; ROSSATO, 2005).

A principal finalidade de se fazer um balanço hídrico é identificar localidades ideais para o desenvolvimento de uma determinada cultura. Esses balanços vêm sendo cada vez mais utilizados para estimar parâmetros climáticos com intuito de comparar essas condições relevantes entre regiões de diferentes climas (TOMASELLA; ROSSATO, 2005).

#### 2.4.1 Processos biológicos anaeróbios e aeróbios numa BET

Ao adentrar a câmara da BET, o efluente sanitário começa seu processo de tratamento, inicialmente pelo processo anaeróbio do sistema. A maior parte da matéria orgânica sólida fica contida nessa parte da BET (ROCHA, 2021), assim como os sólidos suspensos no esgoto devem sedimentar no fundo do tanque (GALBIATI, 2009; NATALINO, 2021). Ressaltando que o processo de digestão anaeróbia se inicia na câmara, mas deve continuar na camada de entulho cerâmico

e pedras britas, onde vão existir mais bactérias consumidoras da matéria orgânica (ROCHA, 2021).

Especificamente, o processo anaeróbico é responsável por converter a matéria orgânica bruta em compostos mais simples, dentre eles o metano (CH<sub>4</sub>), gás carbônico (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O), gás sulfídrico e amônia (VON SPERLING, 2005; GALBIATI, 2009; NATALINO, 2021). Nessa fase do sistema, além das transformações já citadas, ocorre também a proliferação em massa das bactérias anaeróbicas (GALBIATI, 2009).

A transição dos processos, de anaeróbico para aeróbico, ocorre conforme o efluente vai sendo elevado internamente no tanque. A presença de oxigênio passa a ser maior e o processo de degradação da matéria orgânica segue sendo realizado nessa nova configuração (GALBIATI, 2009). Além da profundidade onde se encontra o efluente na BET, outra condição que pode contribuir para a oferta de maiores níveis de oxigênio é o solo não se encontrar saturado, assim apresentando espaços vazios (BRIX, 1994; GALBIATI, 2009; NATALINO, 2021).

As reações que ocorrem com a presença de oxigênio são realizadas basicamente por bactérias e protozoários, tendo as bactérias o papel mais relevante nessa parte do processo de tratamento do esgoto (GALBIATI, 2009). É na parte aeróbia da BET que os compostos orgânicos nitrogenados serão nitrificados, a amônia é transformada em nitrito e, posteriormente, em nitrato (VON SPERLING, 1996). Finalmente o nitrogênio, em formato de nitrato, é consumido pelas plantas da bacia de evapotranspiração (GALBIATI, 2009).

#### 2.4.2 O processo de evapotranspiração

As BETs apresentam funcionamento particionado em dois processos naturais, a decomposição e a evapotranspiração (ROCHA, 2021). Uma parcela da água que adentra a bacia de evapotranspiração deverá evaporar a partir do solo e das plantas (TONETTI et al., 2018).

A evapotranspiração é um processo que ocorre cotidianamente e tem sua performance diretamente afetada pela temperatura local. Quanto maiores as temperaturas, maiores taxas de evapotranspiração da BET (NATALINO, 2021).

Na parte superior da BET, a água deve seguir ascendendo até chegar na superfície, pela capilaridade (relação entre a coesão de moléculas de água e a aderência dessas nos espaços disponíveis no solo) (FERRI, 1985). Existe também um fenômeno de transporte elétrico de água interno ao tanque (GALBIATI, 2009). A água tem seu caminho preferencial rumo a menores estados de energia, e é exatamente essa a condição existente no interior da BET. Quando as raízes absorvem a água, é gerada uma diferença de potencial entre zonas próximas das raízes e as mais distantes (FERRI, 1985). Sendo que em condições normais, espera-se que o potencial elétrico da água na superfície esteja menor do que na parte submersa do tanque, onde estão as raízes (FERRI, 1985). Caracteriza-se então o processo de evapotranspiração com o transporte da água pelo interior da planta, passando por suas folhas, até que da superfície das mesmas a água chegue à atmosfera (FERRI, 1985; GALBIATI, 2009).

#### 2.4.3 A eficiência de BETs

Quanto aos resultados apresentados pelas BETs, esses podem ser considerados satisfatórios e promissores em relação à eficiência no tratamento de águas marrons (ROCHA, 2021).

A TABELA 2 expõe, de forma resumida, resultados experimentados de três trabalhos sobre BETs no Brasil:

TABELA 2: COMPARAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS RELEVANTES QUANTO A EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DE BETs, BASEADO EM DIFERENTES AUTORES.

Fonte	Localidade da BET	DBO (%)	DQO (%)	SST (%)	Ptotal (%)	NTK (%)
<b>Galbiati (2009)</b>	Campo Grande (MS)	80	40	90	*	32
<b>Figueiredo (2019)</b>	Campinas (SP)	94	91	99	58	-34
<b>Rocha (2021)</b>	Ponta Grossa (PR)	*	57	58	57	68

**DBO – Demanda Biológica de Oxigênio; DQO – Demanda química de Oxigênio; SST- Sólidos Suspensos Totais; Ptotal – Fósforo Total; NTK - Nitrogênio Total (Kjeldahl); \* – não analisado.**

FONTE: GALBIATI, 2009; FIGUEIREDO, 2019; ROCHA, 2021. Elaborada pelo Autor, 2022.

O estudo de Galbiati (2009) evidenciou boa remoção de sólidos suspensos totais e da turbidez. Creditando tais resultados ao funcionamento das camadas de areia e solo como agentes filtrantes e fluxo ascendente dos efluentes dentro de BETs.

A presença dos nutrientes nitrogênio e fósforo mesmo após o tratamento mostra que esse efluente pode ainda ser reutilizado como fertilizante para plantas (GALBIATI, 2009).

Galbiati (2009) e Figueiredo (2019) também confirmaram boa redução nos valores da DBO e DQO. Comparando esses dois parâmetros com o que define a Resolução CONAMA No 430 (rege o padrão de lançamento de efluentes tratados em corpos hídricos), se a BET estudada por Figueiredo (2019) produzisse um efluente final com a necessidade de descarte, esse efluente teria condições de ser descartado em um corpo d'água.

O nível do esgoto interno a BET foi se elevando conforme o acompanhamento da BET, uma por conta do início do uso constante dela e outra por coincidir com o período de alta pluviosidade local (FIGUEIREDO, 2019).

Rocha (2021) concluiu que mesmo quando a BET estudada recebeu grandes quantidades de efluente em pequenos períodos o sistema ainda assim foi capaz de absorver o volume de esgoto. Porém, como consequência, as taxas de concentrações acabavam ficando mais elevadas para todos os parâmetros de análise.

Quanto ao dimensionamento, Figueiredo (2019) considerou que mesmo tendo usado o valor empírico de 1,5 m<sup>2</sup> por usuário, este se mostrou adequado para as características e condições locais, pois não existiram registros de extravasamento de esgoto do interior da BET.

## 2.5 QUALIDADE E IMPORTÂNCIA DO SOLO NA BET

São diversas as atividades humanas capazes de degradar os solos, tornando os mesmos pobres em nutrientes e compactados, dessa maneira transformando-os em inférteis (TONETTI et al., 2018). Sendo o solo a última camada (ou primeira dependendo do sentido) que compõe e suporta as plantas nas BETs, se faz necessário tratar especificamente de tal aspecto.

Nas BETs, as plantas presentes absorvem os compostos orgânicos resultantes da decomposição anaeróbia dos dejetos e filtram os gases poluidores emitidos nas reações. Sendo assim, inibem a contaminação do solo (ROCHA, 2021).

A principal cultura indicada para a composição do tratamento de efluentes nas BETs é a da banana. Destaca-se que essa é uma planta que requer quantidades adequadas de nutrientes disponíveis no solo, e que na maioria das vezes é necessário aplicar calcário e outros fertilizantes para obtenção de bons resultados da cultura (BENJAMIN, 2013). Além disso, recomenda-se um solo rico em matéria orgânica, bem drenado e com alta capacidade de reter água para o desenvolvimento das bananeiras (EMBRAPA, 2012). Dentre os macronutrientes mais absorvidos pelas bananeiras estão o potássio (K) e o nitrogênio (N), além do cálcio (Ca), do Magnésio (Mg), do fósforo (P) e o enxofre (S) (EMBRAPA, 2012).

Além dos nutrientes disponíveis no solo, um outro parâmetro relevante de qualidade dos solos é o pH (potencial hidrogeniônico). O pH pode ser considerado um índice que exprime o grau de acidez ou alcalinidade de um extrato aquoso do solo, e auxilia como indicativo das condições de fertilidade do solo (BAIÃO et al., 2020). Parâmetros que envolvem alcalinidade e acidez são de grande importância no processo da caracterização dos solos. Pois as propriedades físicas, químicas e biológicas tem relação direta ou indiretamente associadas ao pH (PAULETTI E MOTTA, 2019).

Paralelamente, deve ser ressaltada a importante interação entre o efluente interno da BET e o solo, já que parte do efluente disponível é absorvido e posteriormente transpirado pela vegetação, e a outra parcela exerce evaporação através do solo. O restante do líquido disponível deve seguir retido no solo ou mesmo compor a solução interna do tanque (BENJAMIN, 2013).

De acordo com os estudos de Benjamin (2013), Baião et al. (2020) e Natalino (2021), o efluente oriundo do esgoto sanitário contido na BET eleva a concentração de macronutrientes, aumentando a fertilidade do solo presente na bacia (NATALINO, 2021). Ainda, quanto à produção de alimentos na BET, especificamente bananas, os nutrientes que fazem parte dessa troca efluente-solo podem ser considerados importante artifício para fertilização do solo (NATALINO, 2021).

### 3 METODOLOGIA

Neste trabalho, foi realizado o monitoramento do nível interno de efluente e a caracterização do solo superficial de uma bacia de evapotranspiração instalada para fins de tratamento de águas de vaso sanitário em uma residência situada na região metropolitana de Curitiba.

Especificamente, a BET fica situada no município de Campina Grande do Sul, sob as coordenadas 25°19'19" S, 49°06'23" W, na residência do casal Laísa e Bruno, que carinhosamente deram o nome do local de "Refúgio Mar de Nuvens". A BET teve seu período de construção entre os meses de julho e agosto de 2020 e começou a operar em setembro do mesmo ano. Já o período de interesse para realização dos estudos e acompanhamento se deu entre os meses de setembro de 2021 e abril do ano de 2022.

Por meio do monitoramento dessa BET diversos tópicos foram discutidos e avaliados. Tais atividades foram realizadas através de medições do nível do efluente no interior do tanque, da análise laboratorial de nutrientes e parâmetros de interesse do solo superficial da BET, além do monitoramento das condições ambientais do local. Foi também examinada e discutida a viabilidade de tal tecnologia como opção para o tratamento descentralizado de esgotos sanitários para a região estudada, inclusive levando em consideração a opinião e experiência das pessoas que residem no local e utilizam a BET.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO - REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

Curitiba é a capital do estado Paraná, sua população é de 1.933.105 habitantes, segundo estimativa de 2019 do IBGE (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2021).

No Brasil, a maioria das cidades cresceu de forma desordenada, contribuindo com a degradação do ambiente urbano (ROSSI, 2009). Porém Curitiba, como exceção dessa condição, sempre apresentou desenvolvimento permanente e institucionalizado de planejamento urbano. Entretanto, no fim do século passado fatores como a mecanização do campo, a criação da CIC (Cidade Industrial de Curitiba) e a chegada das grandes montadoras de automóveis fomentaram a migração de diversas pessoas em busca de oportunidades de trabalho, contribuindo

para o crescimento acelerado da cidade e dos municípios do seu entorno (ROSSI, 2009).

O crescimento de Curitiba se deu tanto vertical como horizontalmente, extrapolando os limites municipais e envolvendo cidades vizinhas pelo processo de conurbação. A formação dessa mancha de ocupação de alta densidade demográfica e sua intensa relação funcional constitui o aglomerado urbano (ROSSI, 2009). A maioria das localidades brasileiras que possuem essas características e relações são denominadas regiões metropolitanas. A FIGURA 7 mostra a RMC (Região Metropolitana de Curitiba):

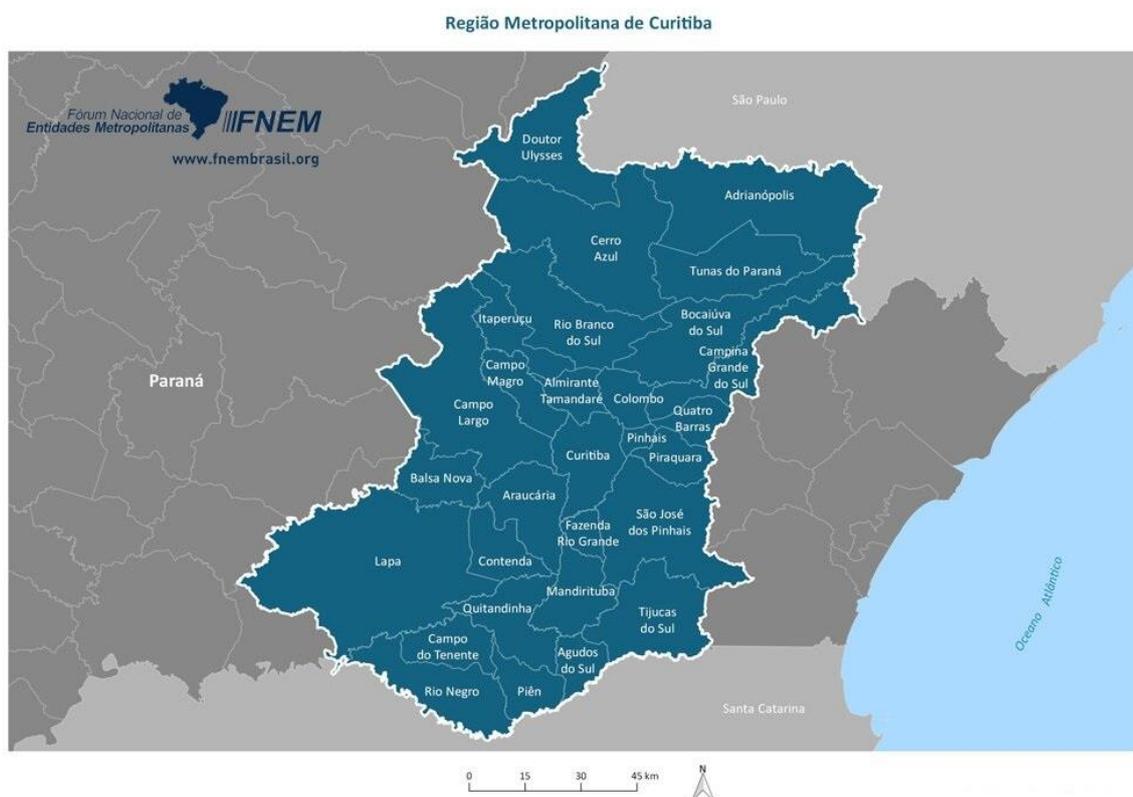


FIGURA 7: Mapa da Região Metropolitana de Curitiba. Fonte: Fórum Nacional de Entidades Metropolitanas - FNEM (2018).

Em todas essas regiões metropolitanas é habitual uma grande disparidade de condições socioeconômicas entre a capital (ou a maior cidade) e o seu entorno. Essas diferenças podem ser observadas em diversos segmentos do cotidiano dessas populações menos favorecidas, e naturalmente com a questão do saneamento básico não é diferente. Fatores como a desassistência do poder público, falta de cobertura das empresas de água e saneamento, distanciamento de

centros urbanos, baixa condição financeira, entre outros motivos favorecem tal realidade. Em meio a esse cenário as diferentes opções de tratamento descentralizado para os efluentes sanitários, tidas como tecnologias eficientes e de baixo custo global, despontam como opções incontestavelmente viáveis (MESQUITA, 2021).

A RMC é constituída de 29 municípios, e sua população total é de 3.223.836 habitantes, segundo estimativa do IBGE de 2018 (COMEC, 2021). Dentre as cidades da RMC está Campina Grande do Sul, em destaque na FIGURA 8, onde está situada a BET estudada neste trabalho.

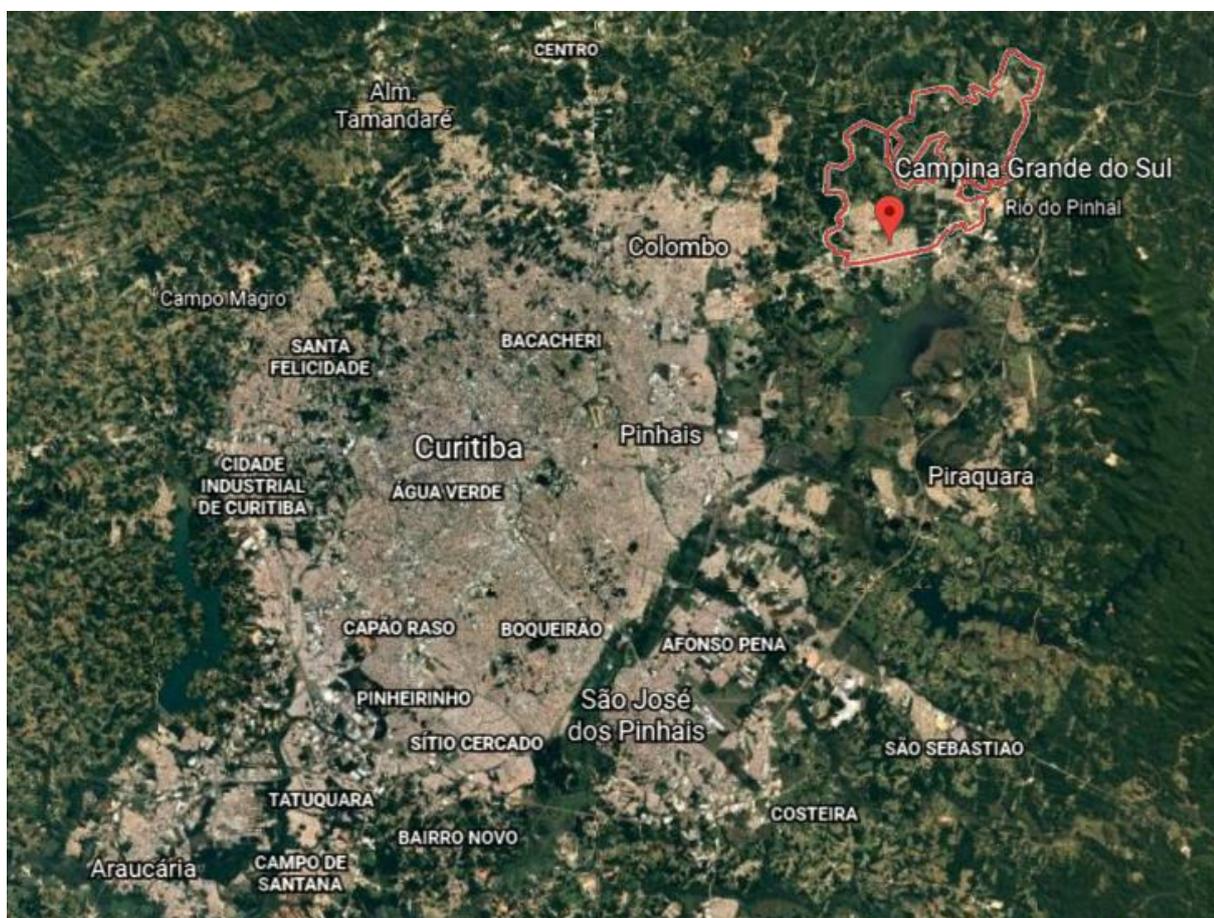


FIGURA 8: Campina Grande do Sul em destaque. Fonte: Google Earth (2021).

### 3.2 OBJETO DE ESTUDO - CARACTERÍSTICAS E DESCRIÇÃO DA BET

O estudo avaliou uma BET já construída e em operação. A bacia possui 6,22 m de comprimento, 1,72 m de largura e 1,20 m de profundidade (FIGURA 9 A). Ela foi escavada pelos próprios residentes (FIGURA 9 B). Possui revestimento interno

de alvenaria, com parede revestida de argamassa misturada com resina sintética e fundo de concreto com aditivo impermeabilizante, além de três camadas de revestimento impermeabilizante à base de cimento, aditivos minerais e polímeros tanto nas paredes quanto no fundo. Está localizada à aproximadamente 2 metros da residência onde vive o casal (FIGURA 9 C) e encontra-se em operação desde setembro de 2020. Na parte superior, camada de solo, foram plantadas diversas espécies que, por sua vez, executam o papel fundamental da evapotranspiração no sistema. Dentre elas estão bananeiras (*musa*), lírios do brejo (*hedychium coronarium*), rosas (*rosa*) e caetés (*heliconia velloziana*) (FIGURA 9 D).



FIGURA 9: Fases da construção da BET e características locais. A. Recorte do solo onde foi construída a BET; B. Morador e outro colaborador participam do processo de construção; C. Localização da BET em relação à residência; D. As diferentes espécies plantadas na bacia de evapotranspiração. Fonte: Refúgio Mar de Nuvens/ Projeto Baná (2020, não publicado).

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DA BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O projeto técnico e o acompanhamento dessa obra foram feitos pela Engenheira Ambiental Luiza Natalino, idealizadora do Projeto Baná, projeto social que teve início com a implantação de uma BET na Terra Indígena Ilha da Cotinga (NATALINO, 2021).

Desta forma, o dimensionamento do sistema projetado em Campina Grande do Sul seguiu os mesmos parâmetros utilizados por Natalino (2021).

O balanço hídrico de uma casual zona radicular pode ser representado por um diagrama esquemático, onde devem ser consideradas as entradas e saídas à fim de entender o movimento vertical da água dentro do sistema (TOMASELLA; ROSSATO, 2005). Portanto, para o projeto da BET do Refúgio Mar de Nuvens foi realizado um balanço hídrico, que está representado na FIGURA 10:

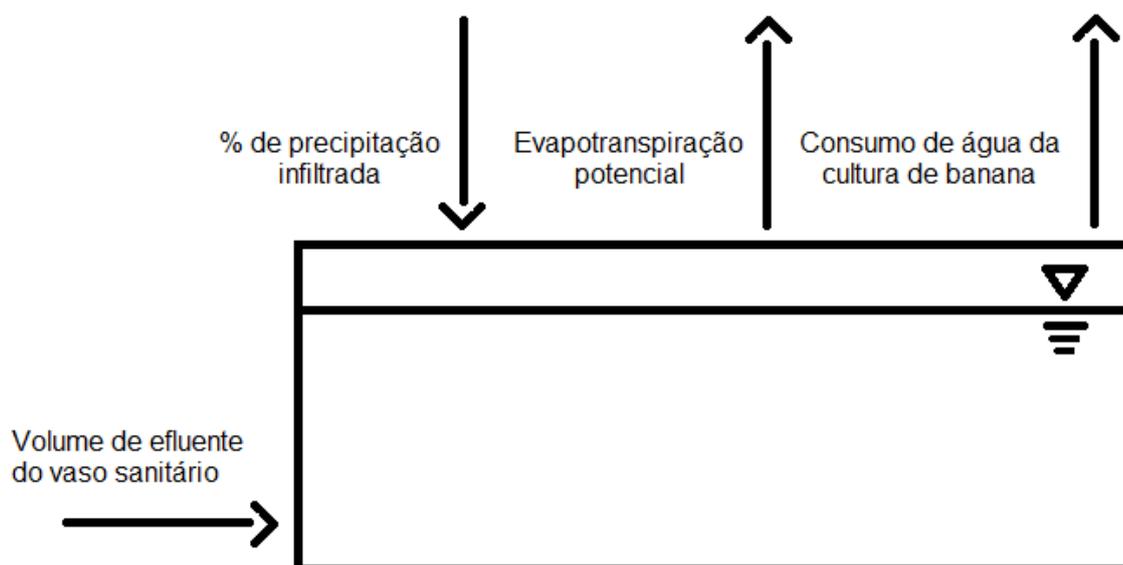


FIGURA 10: Balanço hídrico feito para o cálculo da área superficial necessária na construção da bacia de evapotranspiração no Refúgio Mar de Nuvens. Fonte: adaptado de Natalino,2021.

Para realização de tal cálculo tomou-se como orientação as metodologias propostas por Galbiati (2019) e Coelho, Reinhardt e Araújo (2018), mas com adaptações feitas por conta de questões como diferença de climas nas localidades e pela ausência de dados.

Foram utilizados os valores referentes as condições meteorológicas de Campina Grande do Sul e, assim, foi possível determinar a área superficial da BET através da **equação 2**:

$$A = \frac{v \cdot n \cdot d}{(ET_o + C) - (P \cdot i)} \quad [2]$$

em que: A = área superficial da BET (m<sup>2</sup>); v = volume de água da descarga do vaso sanitário (L); n = número de usuários do sistema; d = número de descargas diárias (dia<sup>-1</sup>); ET<sub>o</sub> = evapotranspiração potencial (mm.dia<sup>-1</sup>); C = consumo diário de água da cultura da bananeira (mm.dia<sup>-1</sup>); P = precipitação diária (mm.dia<sup>-1</sup>); e i = parcela da precipitação que infiltra no sistema (valor entre 0 e 1).

A multiplicação dos termos que se encontram no numerador (v, n e d) resulta na vazão de entrada de efluente, isto é, representa o volume diário que ingressa na BET. O tipo de vaso sanitário escolhido e o número de vezes que a descarga é utilizada por dia influencia diretamente nessa vazão de entrada (NATALINO, 2021).

A residência possui vaso sanitário com duas válvulas, o que permite as opções de descargas com 3 ou 6 litros. Logo, para o parâmetro “v” foi adotado o valor médio de 4,5 L. Reforçando que o projeto considerou a utilização do sistema (rotineiramente) apenas pelo casal Laísa e Bruno, portanto “n” é igual a 2.

Quanto ao termo “d”, diversos são os valores citados na literatura. Pires (2012) assume 1,27 descarga/usuário.dia para indivíduos residentes em áreas rurais e não indígenas. Já Figueiredo (2019) sugere que o valor médio seja de 2,0 descargas/usuário.dia. Enquanto Galbiati (2009) considerou uma média de 4,0 descargas/usuário.dia para residentes de áreas urbanas (NATALINO, 2021). No projeto do Refúgio Mar de Nuvens foi adotado o valor de 2,0 descargas/usuário.dia como referencial de “d”, informação repassada pelos moradores.

Para a precipitação diária “P” foi utilizado o valor de 4,48 mm/dia. Número adotado com base na série histórica de 2003 a 2018, dados do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (PROJETO BANÁ, 2020, não publicado). Destacando que Campina Grande do Sul não possui estação meteorológica, portanto foram adotados os dados da estação mais próxima que fica em Curitiba (identificação – OMM: 83842).

Dentre os principais fatores que influenciam o quanto da precipitação irá infiltrar no solo, pode-se destacar a manutenção do sistema para que o solo não fique exposto e a atenção no momento de recolocar a terra ao fim da construção da BET para que seja formado um declive, no sentido centro – borda (FIGURA 11), que auxilie o escoamento da chuva para fora da bacia (NATALINO, 2021).

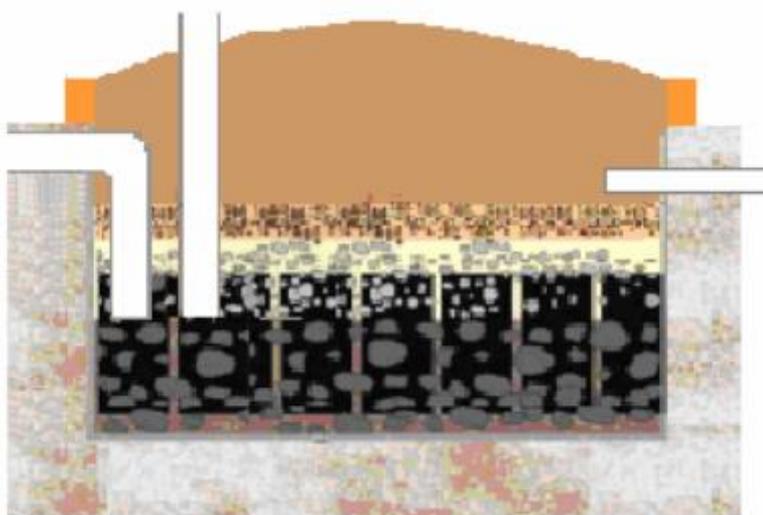


FIGURA 11: Superfície central elevada em relação à borda do tanque, com intuito de evitar o acúmulo de água proveniente de chuvas. Fonte: Galbiati, 2009.

Para um valor exato da infiltração “i” seriam necessários estudos e ensaios técnicos sobre o assunto, o que não foi possível para realização do projeto da BET em questão. Considerando que parcela da chuva escoe para fora da bacia e que outra parte fique retida nas folhas das plantas, supôs-se que 50% (metade) da precipitação infiltre na BET e componha parte das entradas no sistema (NATALINO, 2021; PROJETO BANÁ, 2020, não publicado).

Para a variável evapotranspiração potencial também foi adotado valor segundo a base de dados do INMET. No caso, as informações apontam uma “ET<sub>o</sub>” de 2,26 mm/dia segundo a média entre os anos de 2003 e 2018 (PROJETO BANÁ, 2020, não publicado).

Quanto ao consumo de água de bananeiras, parâmetro “C”, EMBRAPA (2012) afirma que: “o consumo varia conforme as condições de evapotranspiração locais, o que depende das condições meteorológicas e do estágio de

desenvolvimento da planta. No estágio vegetativo, até os 6 meses do plantio, em condições de céu nublado e ar úmido, a cultura consome, em princípio, de 1 mm/dia a 2 mm/dia, e em dias ensolarados e secos, de 2 mm/dia a 4 mm/dia. Dos 7 aos 12 meses do plantio, em condições de céu nublado e ar úmido, o consumo varia de 2 mm/dia a 3 mm/dia, e em dias ensolarados e secos, de 4 mm/dia a 6 mm/dia”. Ressaltando que, de forma idealizada, o volume dentro da BET é considerado constante, ou seja, um regime permanente. Para que esse regime seja atingido são necessários alguns meses, sendo assim as plantas que compõem a superfície da BET não se encontram mais em estado vegetativo. Foi admitido o valor médio, para plantas após os 6 meses de plantio, de 4 mm/dia para o consumo de água das bananeiras (NATALINO, 2021; PROJETO BANÁ, 2020, não publicado).

### 3.3.1 Monitoramento do nível do efluente dentro da BET

O nível de água no interior do tanque foi medido com o intuito de monitorar o efluente no interior da BET para entender um pouco mais sobre o balanço hídrico no tanque, assim como para traçar um comparativo da variação desse nível com os dados de pluviosidade medidos e da evapotranspiração potencial estimada para o mesmo período.

Tal procedimento se deu com o auxílio de uma ripa de madeira e uma trena. A FIGURA 12 registra o método utilizado nas medições.



FIGURA 12: Monitoramento do nível do efluente dentro da BET. Lado esquerdo – o autor insere a ripa de madeira na tubulação interna à BET. Lado direito – com o auxílio da trena é feita a leitura do nível de efluente na BET. Fonte: o Autor, 2022.

A ripa era devidamente introduzida na tubulação ladrão da bacia até que chegasse ao fundo, depois era feita a medida de quanto da madeira ficou submersa com a ajuda da trena. As medidas foram tomadas em diferentes oportunidades: à cada visita ao Refúgio Mar de Nuvens, mas também contando com a colaboração dos moradores para que periodicamente fossem levantados tais dados.

Em todo período de acompanhamento da BET foram levantadas 15 medidas de nível para compor o estudo.

### 3.3.2 Monitoramento das condições ambientais da localidade

O clima da região é classificado por Cfb, temperado úmido, sem estação seca. A temperatura média anual dos últimos 10 anos é de 17,3 °C, enquanto nas décadas anteriores, a média anual era de 16,5 °C; pluviosidade de 1.500 mm/ano, sendo janeiro o mês mais chuvoso (média de 165 mm) e o período menos chuvoso (abril/agosto), com 90 mm/ano (EMBRAPA, 2006).

Com o propósito de compreender melhor a contribuição da pluviosidade no nível do efluente, foram levantados dados pluviométricos para a região onde está instalada a BET. Isso se tornou possível solicitando dados do Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR).

De posse das diferentes alturas de nível na bacia e dos dados de pluviosidade para região em períodos relevantes, as informações puderam ser cruzadas à fim de investigar e tentar compreender melhor o comportamento dos efluentes contidos na bacia de evapotranspiração.

### 3.3.3 Cálculo da Evapotranspiração

A partir do relato dos moradores se sabe que nunca ocorreram extravasamentos na BET. Porém, é necessário avaliar se ela foi dimensionada da forma correta para suprir as necessidades dos usuários.

O cenário real de operação e adequação de dimensionamento da BET foi constituído após o levantamento dos dados e a realização das análises.

Uma das análises realizadas é a estimativa de um valor mais próximo do real da evapotranspiração potencial de referência (ET<sub>o</sub>) para o local onde está instalado o sistema estudado, parâmetro que compõe as equações referentes ao dimensionamento da BET.

A ET<sub>o</sub> foi calculada através do método de Penman-Monteith. Tal método é considerado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) como padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos (MEDEIROS, 2002). A seguir é apresentada a **equação 3**, o método de Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad [3]$$

onde ET<sub>o</sub> = evapotranspiração potencial (mm.dia<sup>-1</sup>); Δ = declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura (kPa/°C); R<sub>n</sub> = saldo diário de radiação (MJ/m<sup>2</sup>.dia); G = fluxo total diário de calor no solo (MJ/m<sup>2</sup>.dia); γ = coeficiente

psicrométrico (kPa/°C);  $U_2$  = velocidade do vento a 2m de altura (m/s);  $e_s$  = pressão de saturação de vapor (kPa);  $e_a$  = pressão atual de vapor (kPa); e T = temperatura média do ar (°C).

Após a aplicação do método algumas inferências puderam ser feitas em seguida.

### 3.4 ACOMPANHAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

#### 3.4.1 Amostras do solo – coletas em campo

Objetivando analisar as características, composição e nutrientes do solo, de forma quali e quantitativa, amostras foram coletadas na BET. Foram realizadas duas campanhas de amostragem, a primeira no dia 20 de novembro de 2021 e a segunda no dia 24 de março de 2022. Algumas etapas da ida à campo foram registradas e podem ser visualizadas na FIGURA 13.



FIGURA 13: Coletas em campo. A. O autor se utiliza de uma régua transparente e uma cavadeira articulada para realizar a tarefa de abrir as covas na BET; B. Luiza Natalino realizando a mistura dos solos no balde; C. O autor ao fundo próximo a BET enquanto Luiza auxilia no ensacamento e identificação das amostras; D. As amostras homogêneas devidamente identificadas para serem levadas ao laboratório. Fonte: o Autor, 2022.

Em cada campanha realizada foram coletadas porções de solo em três diferentes regiões do interior da BET (longitudinalmente uma na entrada, uma no meio e outra no final da BET) e uma porção de solo externo retirado da vizinhança da estrutura construída (amostra controle, contendo o solo natural do local). Pode-se visualizar tal distribuição na FIGURA 14 a seguir:

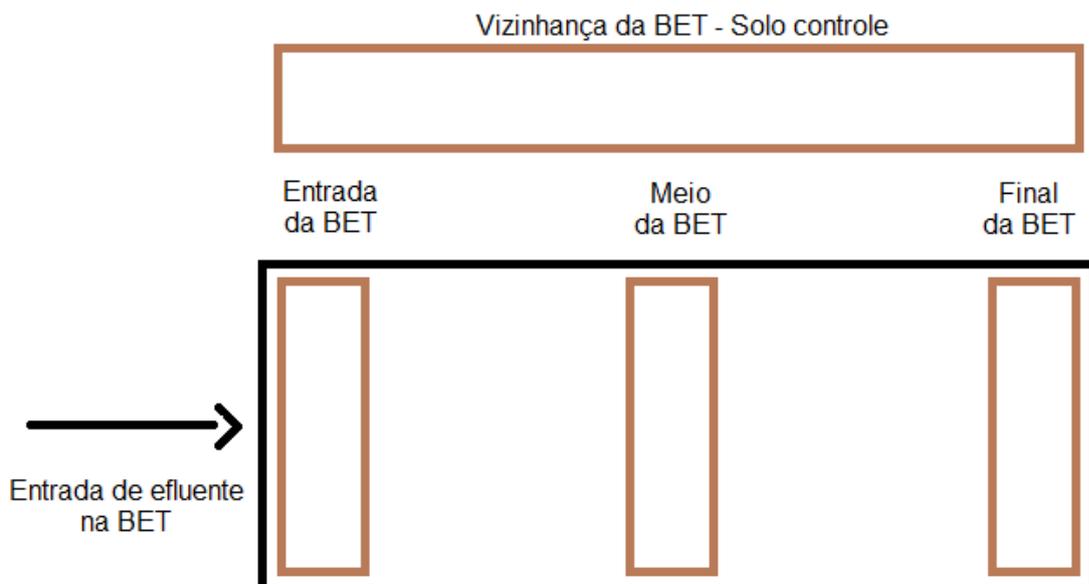


FIGURA 14: Distribuição das regiões onde foram feitas as coletas. Fonte: o Autor, 2022.

Com o intuito de capturar matrizes homogêneas do solo foram realizadas amostras compostas em todas as regiões de interesse. A composição dessas amostras compostas foi dada pela associação de três coletas de mesma medida longitudinal, porém paralelas entre elas (uma próxima da parede esquerda da BET, uma central e outra próxima da parede direita). Também foi realizada amostragem composta de três diferentes pontos para a amostra controle (fora da BET). A FIGURA 15 a seguir ilustra tal arranjo:

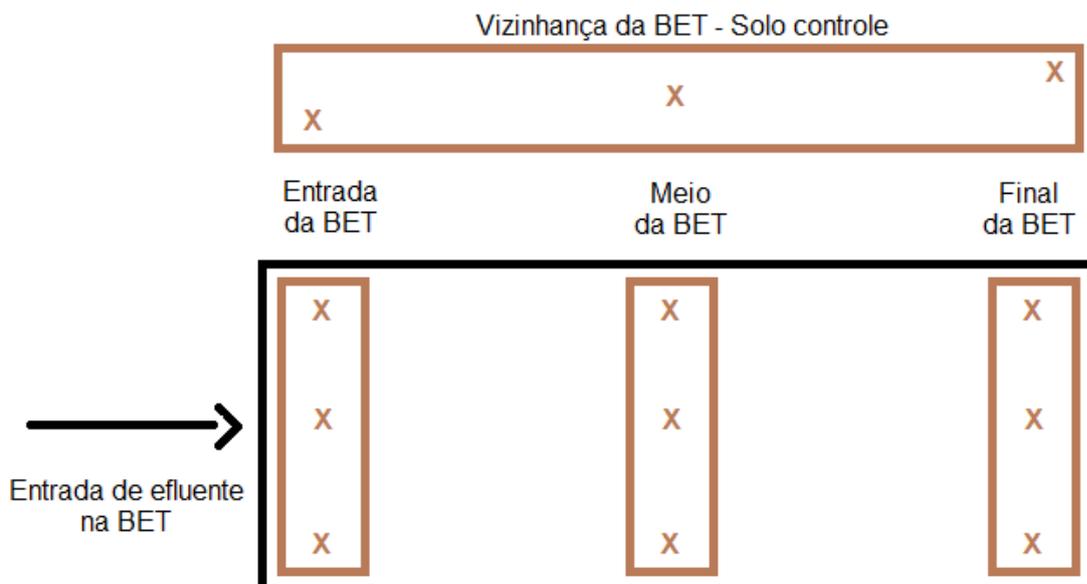


FIGURA 15: Disposição das amostras compostas. Cada “X” representa uma cova aberta no solo da BET e na sua vizinhança. Fonte: o Autor, 2022.

A relevância de se fazer a amostragem composta está associada ao sucesso de capturar possíveis variações horizontais na composição do solo de uma região de mesma medida longitudinal. Para alcançar tal objetivo eram misturados os solos das três covas de mesma região num balde, concebendo uma amostra final homogeneizada.

Tem-se como premissa que a média aritmética das amostras simples é similar ao valor da amostra composta, considerando então que uma amostragem de solos composta possui indivíduos com distribuição igual (OLIVEIRA JÚNIOR, 2010).

Por fim, é necessário registrar que foram realizadas amostras em duas profundidades diferentes (15 e 30 cm). Com isso, foi possível identificar as variações verticais da composição do solo da BET.

Descritas as características principais de como foram realizadas as amostragens nessa pesquisa, a partir das diferentes regiões e profundidades, foram então atribuídos nomes para as diferentes amostras conforme indica a TABELA 3:

TABELA 3: NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS DE SOLO, CONFORME REGIÃO E PROFUNDIDADE DE ESTUDO.

	Entrada da BET	Meio da BET	Final da BET	Controle – externo à BET
<b>15 cm</b>	E-15	M-15	F-15	C-15

<b>30 cm</b>	E-30	M-30	F-30	C-30
--------------	------	------	------	------

FONTE: O AUTOR, 2022.

Posterior a fase de campo, as amostras foram então destinadas ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo (LQFS), do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA) da Universidade Federal do Paraná, lotado no Campus de Ciências Agrárias.

### 3.4.2 Análise laboratorial do solo na BET - níveis de nutrientes e outras propriedades químicas

Com o intuito de monitorar e caracterizar a fertilidade do solo da BET, foi realizada a análise química dos solos coletados nas duas campanhas dessa pesquisa.

A TABELA 4 lista os parâmetros analisados e seus correspondentes métodos de análise em laboratório.

TABELA 4: PARÂMETROS ANALISADOS NO LABORATÓRIO DE QUÍMICA E FERTILIDADE SO SOLO (UFPR) E SEUS RESPECTIVOS MÉTODOS.

<b>Nutriente ou Propriedade Química</b>	<b>Método de análise laboratorial</b>
<b>pH – Acidez ativa</b>	Determinação da acidez ativa via solução de cloreto de cálcio 0,01 mol/L
<b>pH – Acidez potencial</b>	Determinação da acidez potencial via solução SMP
<b>Alumínio</b>	Determinação dos cátions trocáveis (AL <sup>3+</sup> )
<b>Cálcio</b>	Determinação dos cátions trocáveis (CA <sup>2+</sup> )
<b>Magnésio</b>	Determinação dos cátions trocáveis (MG <sup>2+</sup> )
<b>Potássio</b>	Determinação de K disponível - Extração de K com Solução Extratora de Mehlich I
<b>Fósforo</b>	Determinação de P disponível - Extração de P com Solução Extratora de Mehlich I
<b>Carbono</b>	Determinação do Carbono – Método colorimétrico
<b>Sódio</b>	Determinação de Na disponível - Extração de Na com Solução Extratora de Mehlich I

FONTE: O AUTOR, 2022.

Os detalhes dos processos realizados em cada um dos métodos de análises laboratoriais estão apresentados no ANEXO I.

Na fase pré experimental, já no laboratório, foi necessário secar o solo em estufa por um período de 24 horas. Sendo essa atividade necessária somente para as amostras da segunda ida à campo, uma vez que a primeira coleta ocorreu no verão e as amostras de solo puderam ser secas naturalmente com exposição ao Sol. Em seguida, foi realizada a peneiragem dos solos (tal procedimento se deu com uma peneira de 2mm). Logo depois, com o auxílio de medidores denominados cachimbos, foi possível destinar as amostras em suas determinadas quantidades para seus respectivos recipientes. A FIGURA 16 ilustra essas fases.



FIGURA 16: Fase pré análise. A. Amostra de solo devidamente preparada antes de ir para a estufa; B. Em alguns casos se fez necessário realizar a moagem dos torrões maiores de solo antes da peneiragem; C. Comparação entre uma porção de solo natural e outro já peneirado de mesma amostra; D. Distribuição das amostras de solo nos recipientes com auxílio do cachimbo.

Essas atividades demandaram a ida em dois dias seguidos ao laboratório nas duas campanhas. Isso era necessário porque todas as análises (com exceção da medida do pH – acidez ativa) demandam um período de 24 horas entre o preparo da amostra e a sua determinada análise. A FIGURA 17 exemplifica mais algumas fases dos processos realizados no LQFS - UFPR.



FIGURA 17: Etapas no laboratório. A. Adição de solução Mehlich I nos recipientes contendo amostras, procedimento para a determinação de P, K e Na; B. Amostras sendo colocadas no agitador mecânico. C. Determinação do Al sendo realizada com solução de NaOH na bureta automática; D. pHmetro de bancada utilizado para leitura de pH.

### 3.5 ENTREVISTA – A OPINIÃO DOS USUÁRIOS DA BET ESTUDADA

De forma complementar, esse estudo foi finalizado com a realização de uma entrevista direcionada aos moradores da residência onde a BET opera. A proposta dessa etapa é obter informações sobre a aceitação da tecnologia instalada, a respeito da fase de construção e seus desafios, sobre a operação da BET e possíveis problemas enfrentados, além de comparar o novo sistema com o antigo.

As entrevistas semiestruturadas são ferramentas que auxiliam na criação de um ambiente aberto de diálogo que permite aos entrevistados se expressar livremente, sem as limitações criadas por um questionário (VERDEJO, 2006).

Logo, a entrevista é composta por perguntas abertas para que seja possível obter respostas livres dos moradores.

A seguir, temos a entrevista aplicada:



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



## ENTREVISTA COM OS RESIDENTES DO REFÚGIO MAR DE NUVENS

Esse documento foi criado com o intuito de investigar junto aos moradores informações de interesse sobre a Bacia de Evapotranspiração instalada e operando no local.

A entrevista vai compor o Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental de Alexandre Wosch Fávaro, aluno da Universidade Federal do Paraná.

1. Funcionamento – Por favor, faça uma descrição resumida de como opera a BET instalada na residência de vocês.
2. Construção – Qual o nível de dificuldade para construção da BET? Contem um pouco sobre a experiência. Quais as dicas para alguém que pretende construir um sistema parecido com esse em sua casa?
3. Operação – Como vocês avaliam o desempenho da BET até agora? Já ocorreu algum tipo problema? (Extravasamento, odores indesejados, ocorrência de insetos, entre outros)
4. Manutenção – Como acontece a manutenção do sistema? Com que periodicidade? Vocês julgam fácil ou difícil de fazer?
5. Vocês indicariam a construção de outras BETs para vizinhos, amigos e parentes? Por quê?
6. Qual era o sistema anterior de tratamento de esgoto que o local possuía? Como vocês observam a(s) mudança(s) agora com a BET operando? Qual o grau de satisfação com a tecnologia empregada?

Uma cópia desse documento com as perguntas foi enviada eletronicamente aos residentes do Refúgio Mar de Nuvens, que, posteriormente, retornaram o documento com suas respostas.

## 4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MONITORAMENTO DA BET

Para melhor direcionar essa primeira parte dos resultados, foi feita uma divisão em quatro parcelas que compõem a discussão sobre o monitoramento e dimensionamento da BET, descritas nos subitens subsequentes.

#### 4.1.1 Monitoramento do nível de efluente na BET

De setembro de 2021 até abril de 2022 foram realizadas medições do nível de efluente no interior do tanque, tais dados estão dispostos na TABELA 5.

TABELA 5: NÍVEIS DE EFLUENTE NO INTERIOR DA BET DO REFÚGIO MAR DE NEUVENS, MEDIDOS EM cm.

Tomada	Data	Nível (cm)
1	25/09/2021	7,0
2	03/10/2021	7,0
3	09/10/2021	8,0
4	16/10/2021	7,2
5	04/11/2021	8,0
6	15/11/2021	7,5
7	20/11/2021	7,5
8	08/12/2021	7,0
9	26/01/2022	10,0
10	08/02/2022	10,5
11	15/03/2022	11,0
12	24/03/2022	11,0
13	04/04/2022	10,5
14	13/04/2022	13,5
15	20/04/2022	13,5

FONTE: O AUTOR, 2022.

Interessante destacar que algumas variações negativas de nível ocorreram no intervalo de estudo, por exemplo entre as tomadas 3 e 4, provavelmente fruto de períodos de pouca ou nenhuma pluviosidade na região. Mas de forma geral, observa-se a elevação gradativa do nível de efluente no interior da BET,

comportamento teoricamente esperado. A expectativa é de que com o tempo o nível de efluente aumente e atinja as camadas superiores da BET, finalmente alcançando um estado contínuo de funcionamento.

Entre as tomadas 1 e 9, passaram-se 4 meses e a BET teve 3,0 cm de elevação do seu nível de efluente. Enquanto no próximo período, menor (de pouco menos de 3 meses), considerando as medidas de 9 a 15 a BET aumentou em mais 3,5 cm seu nível interno de efluentes.

#### 4.1.2 Monitoramento das condições ambientais da localidade

A partir de dados cedidos pelo SIMEPAR foram caracterizadas as condições ambientais para a região de estudo. Foram obtidos dados de 199 dias seguidos, com o período se iniciando no dia 01/09/2021 e terminando em 18/03/2022.

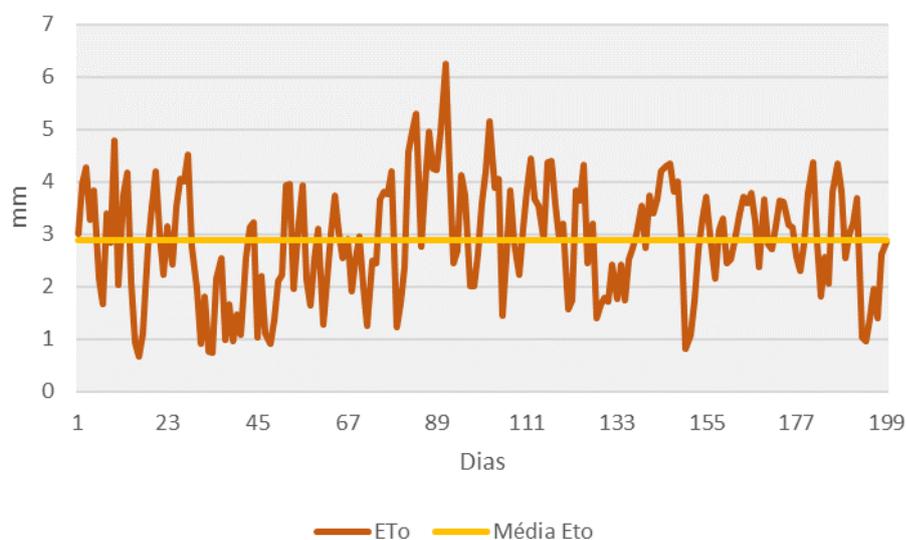
Foram requisitados e recebidos dados das seguintes variáveis meteorológicas:

- Temperatura (média, mínima e máxima);
- Umidade relativa;
- Radiação solar;
- Precipitação;
- Pressão; e
- Velocidade e direção do vento.

#### 4.1.3 Cálculo da Evapotranspiração Potencial local

Tendo os dados meteorológicos citados no subitem anterior como “entrada” e adequando o método de Penman-Monteith foi possível estimar o valor da evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) diária para o mesmo período de estudo (01/09/2021 à 18/03/2022). Os resultados estão no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1: EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (mm/dia) ESTIMADA PARA O PERÍODO.

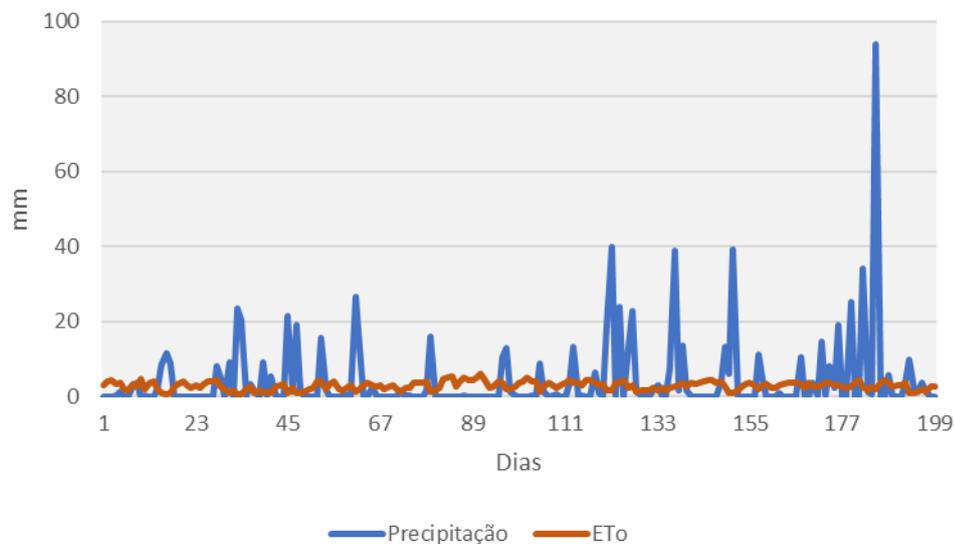


FONTE: SIMEPAR (2021/2022). Elaborado pelo Autor, 2022.

No GRÁFICO 1 tem-se a variação da ETo, foram observados como menor e maior valor para o período 0,68 mm e 6,24 mm, respectivamente. A média constatada foi de 2,89 mm/dia durante os dias de estudo. Sendo o menor valor de ETo observado em 16/09/2021 (um dia de chuva e frio na região metropolitana de Curitiba), nesse dia foi registrada uma precipitação local de 11,6 mm, além de temperaturas mínima de 11,2°C e máxima de 13,8°C (média de 12°C). Por sua vez, o maior valor para ETo foi verificado como sendo em 30/11/2021, em tal data não houve registro de chuvas e foram observadas altas temperaturas, precisamente 23°C de média e máxima de 30,3°C.

Após o cálculo de ETo, foi possível comparar duas grandezas que influenciam diretamente no nível da BET: a precipitação (parcela de entrada) e a evapotranspiração potencial (parcela de saída). O GRÁFICO 2 apresenta essa comparação.

GRÁFICO 2: PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (mm/dia) PARA O PERÍODO.



FONTE: SIMEPAR (2021/2022). Elaborado pelo Autor, 2022.

O GRÁFICO 2 evidencia outra característica relevante, apesar de possuir muitos registros em que a precipitação é igual a zero (dias sem chuva), quando existe a ocorrência de chuvas a grandeza dessa contribuição é de valores muito maiores que os observados de ETo. Podem-se citar como exemplos o dia de maior pluviosidade registrado para o período de estudo 04/03/2022, quando foram registrados 94,0 mm de precipitação em Curitiba, e o intervalo de um mês entre 30/12/2021 e 30/01/2022 (dias 121 a 152 no gráfico) que registrou um acúmulo de 253,2 mm em chuvas na região. Lembrando que a estação do SIMEPAR fica a cerca de 20 km de distância do Refúgio Mar de Nuvens, o que pode gerar algumas variações da medida de precipitação entre o valor da estação e a chuva ocorrida no local onde está instalada a BET.

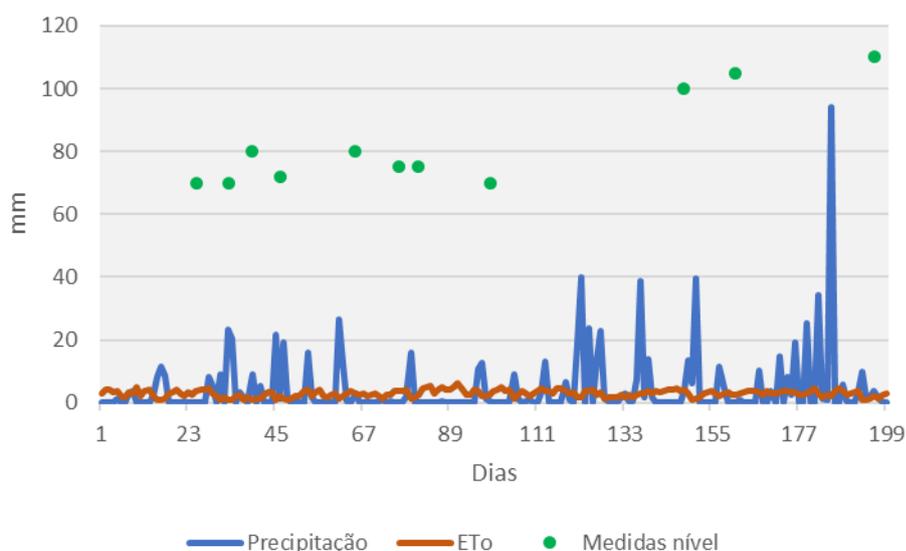
Ainda sobre a pluviosidade, é pertinente comparar a caracterização feita pela EMBRAPA (2006) sobre a cidade de Curitiba sobre seu mês mais chuvoso, no caso janeiro, com os dados de 2022 cedidos pelo SIMEPAR. Enquanto a EMBRAPA afirma que a média para o mês na cidade é de 165 mm de precipitação (vide o item 3.3.2), a medida registrada pelo SIMEPAR em 2022 foi de 194,2 mm. Portanto, Curitiba teve esse ano um mês de janeiro mais chuvoso que o observado historicamente.

#### 4.1.4 Balanço entre precipitação e evapotranspiração na BET

Finalmente, associando as informações dos subitens anteriores (4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3) foi possível compreender a participação dos parâmetros relevantes no balanço hídrico da BET. Vale recordar que fazem parte das entradas de efluente no tanque a pluviosidade e as descargas, assim como das saídas de efluente a evapotranspiração e o consumo de água das plantas do tanque.

Foram estudadas apenas as contribuições da pluviosidade e da evapotranspiração nesse trabalho. Combinando essas duas informações com o acompanhamento do nível de efluente interno da BET, tem-se maior entendimento da contribuição de ambos para a variação desse nível. O GRÁFICO 3 ilustra tal condição.

GRÁFICO 3: PRECIPITAÇÃO, EVAPOTRANSPIAÇÃO POTENCIAL E NÍVEL DA BET (mm/dia) PARA O PERÍODO.



FONTE: SIMEPAR (2021/2022). Elaborado pelo Autor, 2022.

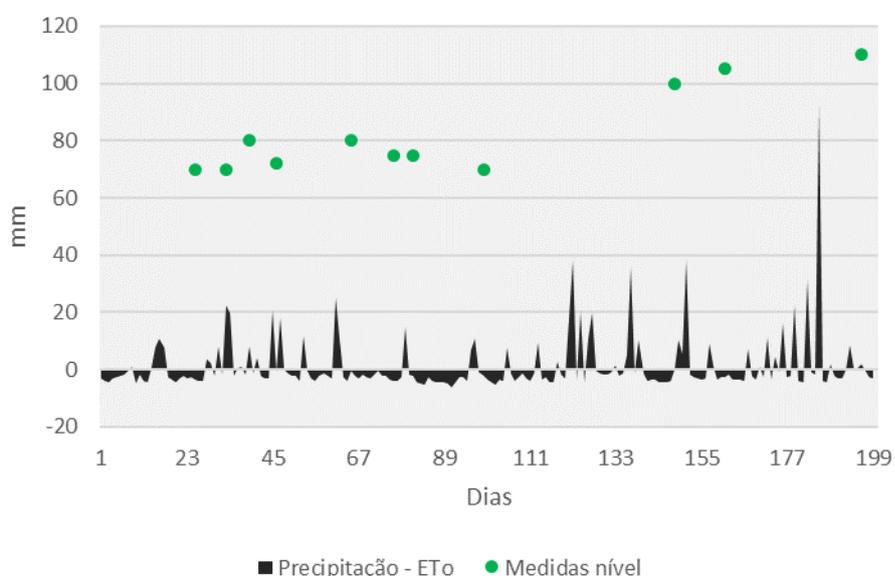
Constata-se a partir do GRÁFICO 3 que no período dos primeiros 100 dias de acompanhamento da BET (01/09 a 09/12 de 2021) existe pouca variação do nível de efluente nela, enquanto que na segunda metade do período (10/12/2021 até 18/03/2022) ela registra aumento contínuo de seu nível. Percebe-se que tal comportamento se relaciona diretamente com os níveis de precipitação observados no período, enquanto na primeira parcela foram registradas poucas chuvas e com medidas de no máximo 26,6 mm o nível da BET se manteve próximo dos 80 mm ou pouco menos. Já no período seguinte quando são esperados, e ocorreram, grandes

volumes de chuva o nível da BET deixa de oscilar e registra somente medidas crescentes, alcançando os 110 mm de nível no dia 15/03/2020 (dia 196 no gráfico).

Ainda sobre essa análise, vale ressaltar que as medidas 12 à 15 (TABELA 5) não fazem parte dos gráficos, pois os dados cedidos pelo SIMEPAR cobrem um período finalizado no dia 18/03/2022 e essas medidas ocorreram após tal data. De qualquer forma, o que se registrou é a continuidade do aumento do nível interno ao tanque, provavelmente ainda em decorrência do período de chuvas.

Com objetivo de demonstrar de forma mais clara a constatação sobre o balanço entre a precipitação e a ETo é apresentado o GRÁFICO 4:

GRÁFICO 4: NÍVEL DA BET E BALANÇO (PRECIPITAÇÃO – ETo) (mm/dia) PARA O PERÍODO.



FONTE: SIMEPAR (2021/2022). Elaborado pelo Autor, 2022.

Para tornar mais nítido tal raciocínio foi feita a subtração direta entre o somatório dos valores de precipitação e os valores da evapotranspiração potencial para o período. O resultado é expresso no GRÁFICO 4, onde as áreas em preto ilustram tais acúmulos. Somados todos os registros de precipitação no período obtém-se um total de 823,8 mm de água de chuva, enquanto a soma de ETo registrada é de 575,6 mm. A diferença entre as duas medidas é de 248,2 mm, sendo esse saldo em favor da precipitação. Reafirmando que a participação dessa parcela de precipitação influencia diretamente o aumento do nível na BET.

Para afirmar que o dimensionamento da BET foi feito de forma correta é necessário que sigam sendo aferidas as medidas de nível nela. Porém, no

momento, pode-se afirmar que não houve extravasamento de efluente, cumprindo com o objetivo da construção. Apesar do acúmulo de chuvas para o período, a elevação do seu nível interno de efluente é lenta, supondo então que parcela da chuva pode estar sendo interceptada pelas folhas e caules das plantas presentes na BET e até mesmo que uma parte da água já é consumida pelas plantas antes mesmo de ocorrer a infiltração da chuva no solo. Outra hipótese para justificar tal fato é a de que as raízes das plantas presentes na BET estejam bem difundidas já no interior do tanque, alcançando até mesmo as camadas mais baixas para se utilizarem do efluente disponível. Conforme afirma a EMBRAPA (2012), a maioria das raízes das bananeiras se encontra na faixa entre 20 e 40 cm de profundidade, porém é importante que essa profundidade seja de pelo menos 75 cm, sem impedimento de crescimento das raízes.

Outro fator relevante nessa análise sobre o dimensionamento é que para estimar a área do tanque no projeto da BET do Refúgio Mar de Nuvens o valor adotado para a ETo foi de 2,26 mm/dia, já a média para o período estudado apresentou um valor de 2,89 mm/dia, ou seja, uma superestimativa de 27,9% em relação ao valor teórico adotado. Quanto ao parâmetro da precipitação "P", no cálculo para área da BET foi utilizado o valor de 4,48 mm/dia, sendo a média encontrada do valor experimental nos 199 dias de estudo igual a 4,14 mm/dia, isto significa uma subestimativa de 7,6% quando comparado com o número adotado no cálculo do projeto.

## 4.2 ACOMPANHAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NA BET

A realização das duas campanhas de amostragem foi de extrema relevância, enriquecendo o resultado dessa pesquisa. Os resultados e comparações entre os dois cenários contribuíram para uma maior tangibilidade e clareza do que se propôs estudar no projeto.

A seguir serão apresentados, interpretados e discutidos os resultados oriundos das análises laboratoriais realizadas em novembro de 2021 e março de 2022.

### 4.2.1 pH – Potencial Hidrogeniônico

Foram combinadas duas diferentes formas de determinar o pH das amostras de solo da BET. A TABELA 6 traz os valores encontrados para os dois métodos nas diferentes campanhas:

TABELA 6: RESULTADOS PARA O pH ACIDEZ ATIVA ( $\text{CaCl}_2$ ) E pH ACIDEZ POTENCIAL (SOLUÇÃO SMP) NAS AMOSTRAGENS DE SOLO DE NOVEMBRO/2021 E MARÇO/2022, REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUUVENS.

<b>pH <math>\text{CaCl}_2</math></b> <b>(Acidez ativa)</b>	<b>Novembro 2021</b>	<b>Março 2022</b>	<b>pH (Acidez Potencial - SMP)</b>	<b>Novembro 2021</b>	<b>Março 2022</b>
<b>E - 15</b>	3,81	3,84	E - 15	4,94	4,76
<b>M - 15</b>	3,72	3,79	M - 15	4,85	4,53
<b>F - 15</b>	3,69	3,70	F - 15	4,94	4,37
<b>C - 15</b>	3,90	3,63	C - 15	4,81	4,52
<b>E - 30</b>	3,73	3,76	E - 30	4,77	4,73
<b>M - 30</b>	3,70	3,76	M - 30	4,89	4,80
<b>F - 30</b>	3,66	3,70	F - 30	4,96	4,68
<b>C - 30</b>	3,80	3,65	C - 30	4,89	4,58

FONTE: O AUTOR, 2022.

O método de acidez ativa é assim denominado por medir, através de uma solução aquosa ou salina, a parte da acidez que se encontra dissociada na fase líquida do solo, assim representando a atividade dos íons  $\text{H}^+$  na solução do solo (PAULETTI E MOTTA, 2019).

Enquanto o método de acidez potencial se dá pela medida das duas partes que constituem a acidez dos solos, a acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) e a acidez não trocável ( $\text{H}^+$ ). A partir da solução SMP é então extraída a acidez potencial nos solos (PAULETTI E MOTTA, 2019).

Com o objetivo de nortear as interpretações do pH e de alguns outros parâmetros químicos e nutrientes do solo é apresentada a TABELA 7 (elaborada com base no Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná):

TABELA 7: INTERPRETAÇÃO DO PARÂMETRO pH NO SOLO PARA O ESTADO DO PARANÁ.

<b>Classe de interpretação</b>	<b>pH (<math>\text{CaCl}_2</math>)</b>	<b>pH (<math>\text{H}_2\text{O}</math>)</b>
--------------------------------	--	---

<b>Classe de interpretação</b>	<b>pH (CaCl<sub>2</sub>)</b>	<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>
<b>Muito baixo</b>	< 4,0	< 4,7
<b>Baixo</b>	4,0 – 4,4	4,7 – 5,1
<b>Médio</b>	4,5 – 4,9	5,2 – 5,6
<b>Alto</b>	5,0 – 5,5	5,7 – 6,2
<b>Muito Alto</b>	> 5,5	> 6,2
<b>Condição a evitar</b>	> 6,0	> 6,7

FONTE: ADAPTADO DE PAULETTI E MOTTA, 2019. Elaborada pelo autor, 2022.

Portanto, conforme o que apresenta a TABELA 7 o solo da BET (bem como o solo controle, exterior) é classificado como de potencial hidrogeniônico muito baixo, pois apresenta valores menores do que 4,0.

Tal condição era esperada, uma vez que o solo no estado do Paraná (bem como no Brasil) em geral tem perfil naturalmente ácido. Além da condição natural do solo, é esperada também uma continuidade no processo de acidificação do solo interior à BET. Afinal a atividade fundamental de servir como tecnologia de tratamento de esgoto doméstico a partir do trabalho exercido pela evapotranspiração das plantas em seu interior tende a consumir cada vez mais os nutrientes presentes no solo, culminando no processo de saturação natural do solo e apresentando condições cada vez mais ácidas (valores cada vez menores para o pH).

É importante ressaltar que conforme o pH for decrescendo as plantas internas a BET deverão ter seu desenvolvimento prejudicado.

#### 4.2.2 Alumínio, Cálcio, Magnésio e Potássio

Em concordância com a acidificação do solo (decréscimo do pH) é esperado que ocorra o aumento dos índices de alumínio no solo. A TABELA 8 traz os valores do alumínio, cálcio, magnésio e potássio, obtidos nas análises das amostras de solo.

TABELA 8: CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E POTÁSSIO (Cmol/dm<sup>3</sup>) PARA AS AMOSTRAS DE SOLO DA BET E DO CONTROLE EM NOVEMBRO/2021 E MARÇO/2022 REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUUVENS.

<b>Alumínio (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Novembro 2021</b>	<b>Março 2022</b>	<b>Cálcio (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Novembro 2021</b>	<b>Março 2022</b>
---------------------------------------	----------------------	-------------------	-------------------------------------	----------------------	-------------------

<b>E - 15</b>	0,82	1,98	<b>E - 15</b>	1,20	2,89
<b>M - 15</b>	0,98	2,05	<b>M - 15</b>	0,90	1,78
<b>F - 15</b>	0,95	1,95	<b>F - 15</b>	1,00	1,98
<b>C - 15</b>	0,73	3,31	<b>C - 15</b>	0,90	2,78
<b>E - 30</b>	1,01	2,01	<b>E - 30</b>	0,90	3,89
<b>M - 30</b>	1,00	2,46	<b>M - 30</b>	1,00	2,71
<b>F - 30</b>	0,99	2,51	<b>F - 30</b>	0,80	1,64
<b>C - 30</b>	0,89	2,77	<b>C - 30</b>	0,60	2,80
<b>Magnésio (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Novembro 2021</b>	<b>Março 2022</b>	<b>Potássio (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Novembro 2021</b>	<b>Março 2022</b>
<b>E - 15</b>	0,20	0,88	<b>E - 15</b>	0,12	0,12
<b>M - 15</b>	0,20	0,52	<b>M - 15</b>	0,11	0,08
<b>F - 15</b>	0,20	0,88	<b>F - 15</b>	0,12	0,07
<b>C - 15</b>	0,70	0,96	<b>C - 15</b>	0,65	0,85
<b>E - 30</b>	0,30	1,22	<b>E - 30</b>	0,09	0,10
<b>M - 30</b>	0,20	0,80	<b>M - 30</b>	0,07	0,10
<b>F - 30</b>	0,00	0,68	<b>F - 30</b>	0,07	0,08
<b>C - 30</b>	0,30	0,70	<b>C - 30</b>	0,45	0,09

FONTE: O AUTOR, 2022.

Os valores de referência estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 9: INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS ALUMÍNIO, CÁLCIO, MAGNÉSIO E POTÁSSIO NO SOLO PARA O ESTADO DO PARANÁ.

<b>Classe de interpretação</b>	<b>Alumínio (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Cálcio (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Magnésio (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Potássio trocável (Cmol/dm<sup>3</sup>)</b>
<b>Muito baixo</b>	< 0,3	< 0,5	< 0,2	< 0,06
<b>Baixo</b>	0,3 – 0,7	0,5 – 1,0	0,2 – 0,4	0,06 – 0,12
<b>Médio</b>	0,8 – 1,5	1,1 – 2,0	0,5 – 1,0	0,13 – 0,21
<b>Alto</b>	1,6 – 2,5	2,1 – 6,0	1,1 – 2,0	0,22 – 0,45
<b>Muito Alto</b>	> 2,5	> 6,0	> 2,0	> 0,45
<b>Condição a evitar</b>	-	-	-	-

FONTE: ADAPTADO DE PAULETTI E MOTTA, 2019. Elaborada pelo autor, 2022.

De acordo com a Tabela 8, percebe-se o acúmulo de alumínio no solo da BET. Mesmo que possa ser considerado pouco tempo entre uma amostragem e

outra, o elemento apresentou em março de 2022 valores médios maiores que o dobro quando comparados com o ano anterior. Além disso, conforme classifica a TABELA 9 os teores de alumínio estão altos ou muito altos. Porém vale ressaltar que no solo controle também foi observado o mesmo comportamento, os índices em março de 2022 são bem superiores em relação a novembro de 2021.

Já o cálcio e o magnésio também apresentaram acúmulo em relação as suas disposições no solo. Sendo esses elementos pouco atrativos para as plantas no geral, ou seja, pouco consumidos por elas. Segundo a classificação da TABELA 9 o cálcio apresenta concentração alta, enquanto o magnésio apresenta valor considerado médio para os solos paranaenses. Assim como para o caso do alumínio, o cálcio e magnésio também acumularam tanto nas medidas internas da BET, quanto nas medidas controle.

Em contrapartida, o potássio, por sua vez, apresenta decréscimo na faixa de 15 cm e leve aumento quando avaliada a região dos 30 cm de profundidade. No geral, conforme a classificação da TABELA 9, as quantidades observadas em laboratório indicam um solo com pouca disponibilidade de potássio. O que sugere que as plantas da BET têm consumido com frequência o potássio disposto no solo. Lembrando que a cultura de bananas (planta presente no objeto de estudo) é rica em potássio e necessita de sua presença para desenvolvimento total e correto, tanto da planta como do fruto. Pode ser considerado o elemento mais importante para as bananeiras, pois além de ser encontrado em grande quantidade na planta, também representa uma transferência de cerca de 37% do total absorvido para os frutos (EMBRAPA, 2012).

Observando os resultados para os nutrientes até aqui avaliados, duas ocorrências chamam atenção. A primeira é que, analisando individualmente cada campanha, não são observadas grandes variações entre os pontos internos a BET (E, M e F) e o ponto controle (C), que teoricamente reserva as condições naturais do solo local. Então pode-se considerar que o pouco tempo de atividade da BET ainda não foi suficiente para alterar muito o solo.

O segundo ponto relevante a ser especulado é que, quando comparadas diretamente as campanhas de novembro/2021 e a de março/2022, então são observadas diferenças nos valores medidos no laboratório. Apresentando ligeiro aumento nos índices de alumínio, cálcio e magnésio no solo, enquanto somente os valores de potássio apresentaram valores próximos em ambas as campanhas.

#### 4.2.3 Saturação por alumínio – o parâmetro “m%”

Uma importante análise pode ser feita envolvendo os elementos Al, Ca, Mg e K. Trata-se do cálculo de saturação por acúmulo de alumínio (m%), retirado do Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná (PAULETTI E MOTTA, 2019). Sendo possível estimar tal indicador através da **equação 4**:

$$m\% = \frac{Al}{Al + Ca + Mg + K} \cdot 100 \quad [4]$$

em que m% = saturação por alumínio (adimensional); Al = concentração de alumínio no solo (Cmol/dm<sup>3</sup>); Ca = concentração de cálcio no solo (Cmol/dm<sup>3</sup>); Mg = concentração de magnésio no solo (Cmol/dm<sup>3</sup>); e K = concentração de potássio no solo (Cmol/dm<sup>3</sup>).

Para cada ponto de coleta, foram então calculados os níveis de saturação por alumínio. Os resultados se encontram na TABELA 10:

TABELA 10: SATURAÇÃO DO SOLO DA BET E DO CONTROLE POR ACÚMULO DE ALUMÍNIO (m%).

Saturação por Alumínio (m%)	Novembro 2021	Março 2022
<b>E - 15</b>	35,04	33,73
<b>M - 15</b>	44,75	46,28
<b>F - 15</b>	41,85	39,96
<b>C - 15</b>	24,50	41,90
<b>E - 30</b>	43,91	27,84
<b>M - 30</b>	44,05	40,53
<b>F - 30</b>	53,23	51,12
<b>C - 30</b>	39,73	43,55

FONTE: O AUTOR, 2022.

A interpretação do parâmetro “m%” então pode ser feita conforme a TABELA 11 apresentada a seguir.

TABELA 11: INTERPRETAÇÃO DA SATURAÇÃO POR ALUMÍNIO (m%).

<b>Interpretação da saturação por Alumínio (m%)</b>	
<b>Teor m%</b>	<b>Interpretação</b>
< 15	Baixo – não é prejudicial
16 a 35	Médio – levemente prejudicial
36 a 50	Alto – prejudicial
> 51	Muito alto – muito prejudicial

FONTE: ADAPTADA DE MALAVOLTA, 1989. Elaborada pelo Autor, 2022.

Calculada a média somente das 12 medidas de m% internas a BET obtém-se o valor de 41.9, o que segundo MALAVOLTA (1989) configura um índice alto. Da mesma maneira é classificado o solo natural do Refúgio Mar de Nuvens, observando apenas os valores de m% para o controle, a classificação segue sendo como alta. Significando que a saturação atual por alumínio é prejudicial para o desenvolvimento das plantas inseridas nesse ambiente, uma vez que a saturação por esse elemento tem como consequência a diminuição da raiz. Cálcio, magnésio e potássio por outro lado são bases e auxiliam no crescimento das raízes, por isso fazem o balanço no denominador da equação 4.

Tal constatação pode auxiliar no entendimento de um fato ocorrido entre os meses de janeiro e março de 2022, quando registrou-se o surgimento do primeiro cacho de bananas de uma das bananeiras plantadas na BET do Refúgio Mar de Nuvens. A FIGURA 18, apresenta registros fotográficos desse cacho nos dois diferentes meses:



FIGURA 18: Registros do primeiro cacho de bananas da BET. Lado esquerdo: Registro do mês de janeiro de 2022. Lado direito: Registro do mês de março de 2022. Fonte: Refúgio Mar de Nuvens (2022). Elaborado pelo Autor (2022).

Ainda que essa tenha sido apenas a primeira aparição de um cacho de bananas na BET, ele já dá indícios de que a condição nutricional atual do solo não é a ideal. Visualmente é perceptível que as bananas do topo do cacho pouco cresceram, além do não desenvolvimento de outras bananas nas camadas mais abaixo do cacho. Uma das possíveis explicações para o ocorrido são os resultados já expostos do parâmetro m% e dos nutrientes alumínio, cálcio, magnésio e principalmente do potássio. Em outras palavras, a ocorrência de um cacho que não conseguiu se desenvolver por completo pode ser considerado um indicador da má

condição nutricional do solo na BET, pois o não desenvolvimento do cacho por completo é, provavelmente, resultado da ausência do potássio disponível para as plantas e do alto teor de saturação do solo.

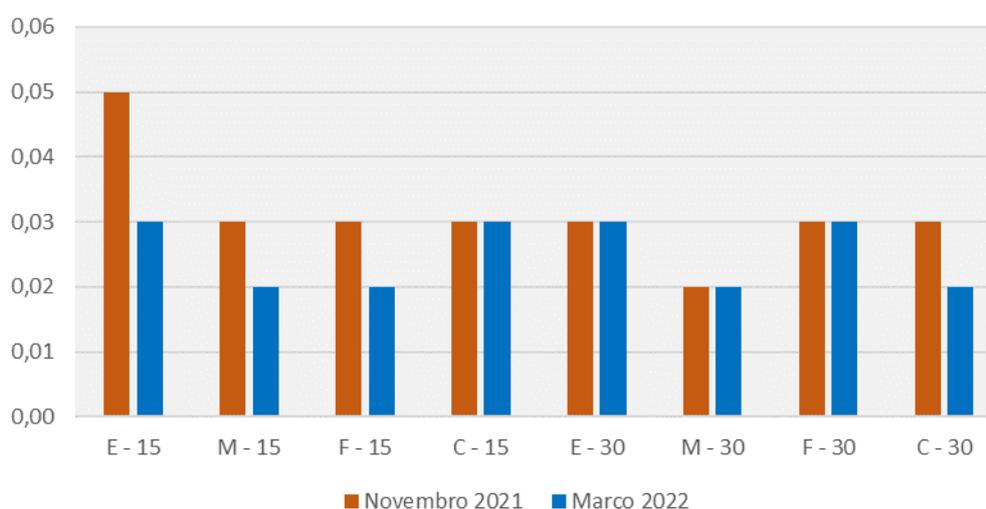
#### 4.2.4 Sódio, Carbono e Fósforo

Quanto a esses elementos é possível avaliar de forma mais qualitativa os resultados obtidos.

Por exemplo, o sódio é um elemento comum na dieta dos seres humanos e da mesma forma como é ingerido, deve cumprir seu ciclo e ser excretado. Nos seres humanos é comum que a grande maioria do sódio seja eliminado pelos rins via urina, o restante perdido pelas fezes e pela pele (suor). Logo, existe a expectativa de que esse elemento se acumule na BET, pois ela recebe majoritariamente fluidos compostos de urina e fezes humanas e água (das descargas e de chuvas).

Porém o que se observa no GRÁFICO 5 é que não existem variações significativas entre novembro e março.

GRÁFICO 5: CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO ( $\text{Cmol/dm}^3$ ) PARA AS DUAS AMOSTRAGENS REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUUVENS.



FONTE: O AUTOR, 2022.

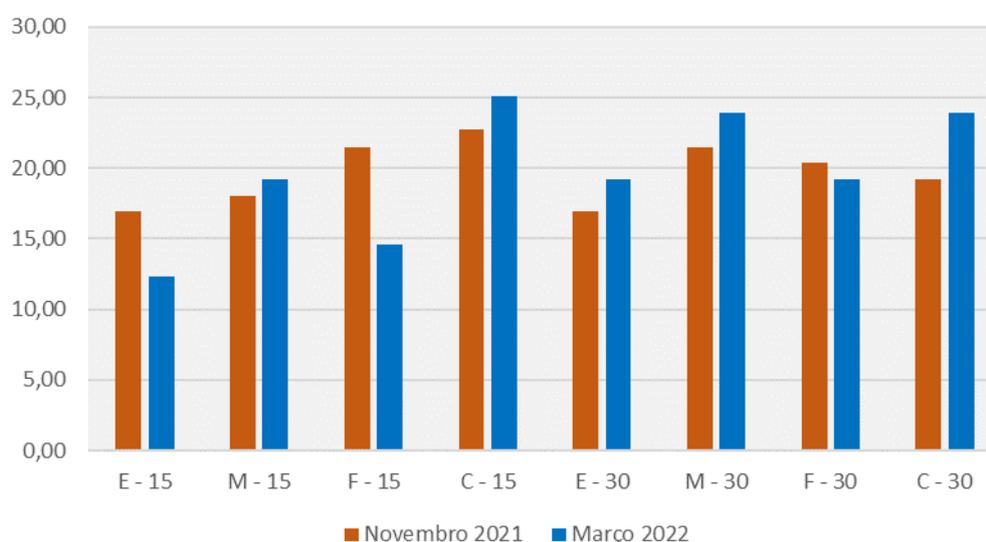
Uma das possibilidades é que esse elemento esteja disponível nas camadas inferiores da BET, mais precisamente onde hoje se encontra o nível do efluente da BET e, não acumulado na camada superior de solo do tanque. Vale destacar que

não foram observadas variações significativas entre as amostras da BET e do controle.

Quanto ao carbono, é um elemento que percentualmente também responde por compor grande parte das fezes humanas, também gerando a expectativa de acúmulo na BET com o passar do tempo.

Porém, o exposto no GRÁFICO 6 são pequenas variações nas concentrações. Além de um comportamento muito variado, aumentos e decréscimos variam tanto com o tempo como com a profundidade.

GRÁFICO 6: CONCENTRAÇÃO DE CARBONO ( $\text{g}/\text{dm}^3$ ) PARA AS DUAS AMOSTRAGENS REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUUVENS.

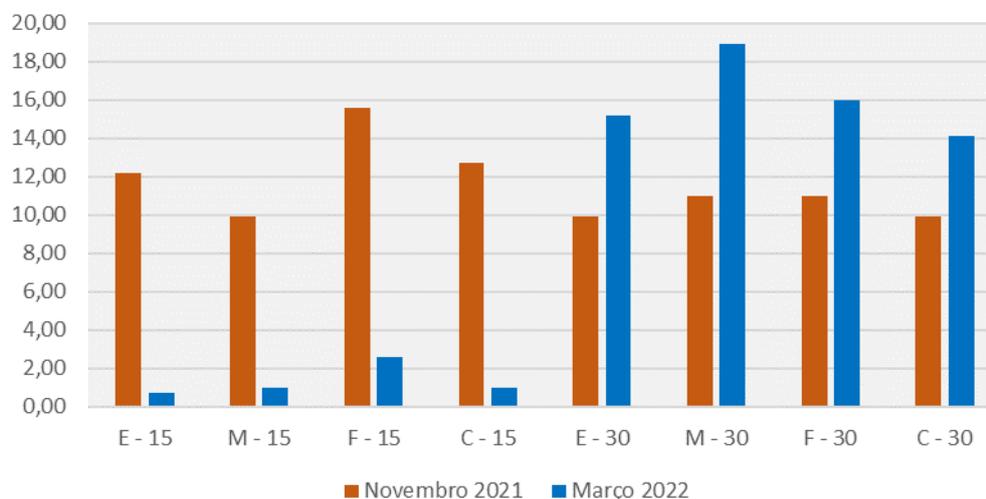


FONTE: O AUTOR, 2022.

Finalmente, quanto ao fósforo, é um elemento que também compõe as fezes humanas e por tal fato eram esperados altos índices do nutriente nas amostras. Além disso, o fósforo influencia diretamente o metabolismo das plantas, sendo necessário para realizar a transferência de energia da célula, além de auxiliar na fotossíntese e respiração dos vegetais (GRANT et al., 2001).

No GRÁFICO 7 podem ser visualizados os resultados das análises de fósforo realizadas:

GRÁFICO 7: CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO (mg/dm<sup>3</sup>) PARA AS DUAS AMOSTRAGENS REALIZADAS NO REFÚGIO MAR DE NUVENS.



FONTE: O AUTOR, 2022.

Interessante observar o déficit de fósforo na camada de 15 cm para a segunda amostragem quando comparados os valores com os de mesma data, porém na profundidade de 30 cm, e até mesmo em relação à todas as medidas de novembro de 2021.

Vale destacar que baixos níveis de fósforo podem causar estresse moderado as plantas, porém não são suficientes para levar a sintomas evidentes dessa deficiência. Somente quando o estresse é mais severo, as plantas então mudam de coloração variando para verde-escuro e até mesmo púrpura (GRANT et al., 2001).

#### 4.3 ENTREVISTA ABERTA COM OS MORADORES

Conforme proposto na metodologia dessa pesquisa, foi realizada uma entrevista para tomar a opinião sobre diversos quesitos envolvendo a BET junto dos moradores do Refúgio Mar de Nuvens. A seguir tem-se a entrevista da moradora Laísa:

1. Funcionamento – Por favor, faça uma descrição resumida de como opera a BET instalada na residência de vocês.

*Do banheiro, os dejetos são conduzidos até a BET. A BET possui uma camada de pneus onde ficam os dejetos, uma camada de calça cerâmica permeável, e acima, camadas de brita, manta Bidin, areia e terra, onde plantamos as bananeiras, lírios entre outras plantas que auxiliam na evapotranspiração.*

2. Construção – Qual o nível de dificuldade para construção da BET? Contem um pouco sobre a experiência. Quais as dicas para alguém que pretende construir um sistema parecido com esse em sua casa?

*Nós mesmos a construímos, foi bastante trabalhoso, em especial cavar o local sem auxílio de ferramentas motorizadas ou elétricas, assim como a construção do piso e das paredes com tijolos e concreto, pois o concreto também fizemos à mão. Concluída esta parte, o restante foi tranquilo.*

*Minha dica para facilitar a construção da bet seria contratar maquinário para cavar o buraco e bater o concreto (betoneira).*

3. Operação – Como vocês avaliam o desempenho da BET até agora? Já ocorreu algum tipo problema? (Extravasamento, odores indesejados, ocorrência de insetos, entre outros).

*Funciona perfeitamente, o local se tornou um lindo jardim, sempre com flores. Até o momento não tivemos qualquer problema.*

4. Manutenção – Como acontece a manutenção do sistema? Com que periodicidade? Vocês julgam fácil ou difícil de fazer?

*Até o momento não gerou manutenção, a não ser as podas das plantas, que cresceram bastante.*

5. Vocês indicariam a construção de outras BETs para vizinhos, amigos e parentes? Por quê?

*Com certeza. Além de ser uma opção ecológica para os dejetos, que não polui o meio ambiente, ela transforma o que seria um problema ambiental em solução.... um jardim lindo e produtivo, florido e cheiroso, atrai borboletas e beija flores.*

*Já recomendamos para nosso vizinho, que viu todo o processo de construção da bet e fez uma um pouco maior na casa dele.*

*A BET se tornou um lindo jardim, que chama atenção de todas as pessoas que vêm nos visitar. Atrai insetos e pássaros.*

6. Qual era o sistema anterior de tratamento de esgoto que o local possuía? Como vocês observam a(s) mudança(s) agora com a BET operando? Qual o grau de satisfação com a tecnologia empregada?

*Satisfação total.*

*Não tínhamos outro sistema. Construímos do zero nossa casa e as fossas. O tratamento da água cinza é feito por círculo de bananeiras.*

*Moramos em uma área rural, com floresta e essa região não possui tratamento de esgoto público, de forma que muitos residentes utilizam meios mais antigos e poluentes. A BET é um diferencial em nossa região e uma solução ecológica para tratamento de esgoto em áreas rurais como a que residimos.*

Curitiba, 21 de abril de 2022.

Laísa Musial

De acordo com o relato da moradora fica evidente a satisfação do casal com a alternativa escolhida para o tratamento do esgoto sanitário da residência. Assim como é importante a informação de que, até o momento, não houve nenhum problema ou mau funcionamento da BET, mais alguns argumentos que podem indicar que o dimensionamento do tanque foi feito de forma correta na fase de planejamento do projeto.

Por fim, as opiniões da Laísa trazem um ponto de vista pouco abordado nesse trabalho como qualidade das BETs, o aspecto paisagístico desempenhado pela tecnologia e a atração de mais insetos e pássaros para o local. Algo que reafirma o que Tonetti et al. (2018) classifica como vantagem ambiental ao se escolher uma forma descentralizada para o tratamento de esgotos: a melhoria das condições ecológicas locais (vide TABELA 1). A FIGURA 19 traz belos registros (de diferentes épocas) das tantas plantas e flores da BET, responsáveis pelo aspecto paisagístico e pelos serviços ecossistêmicos relatados pela moradora.

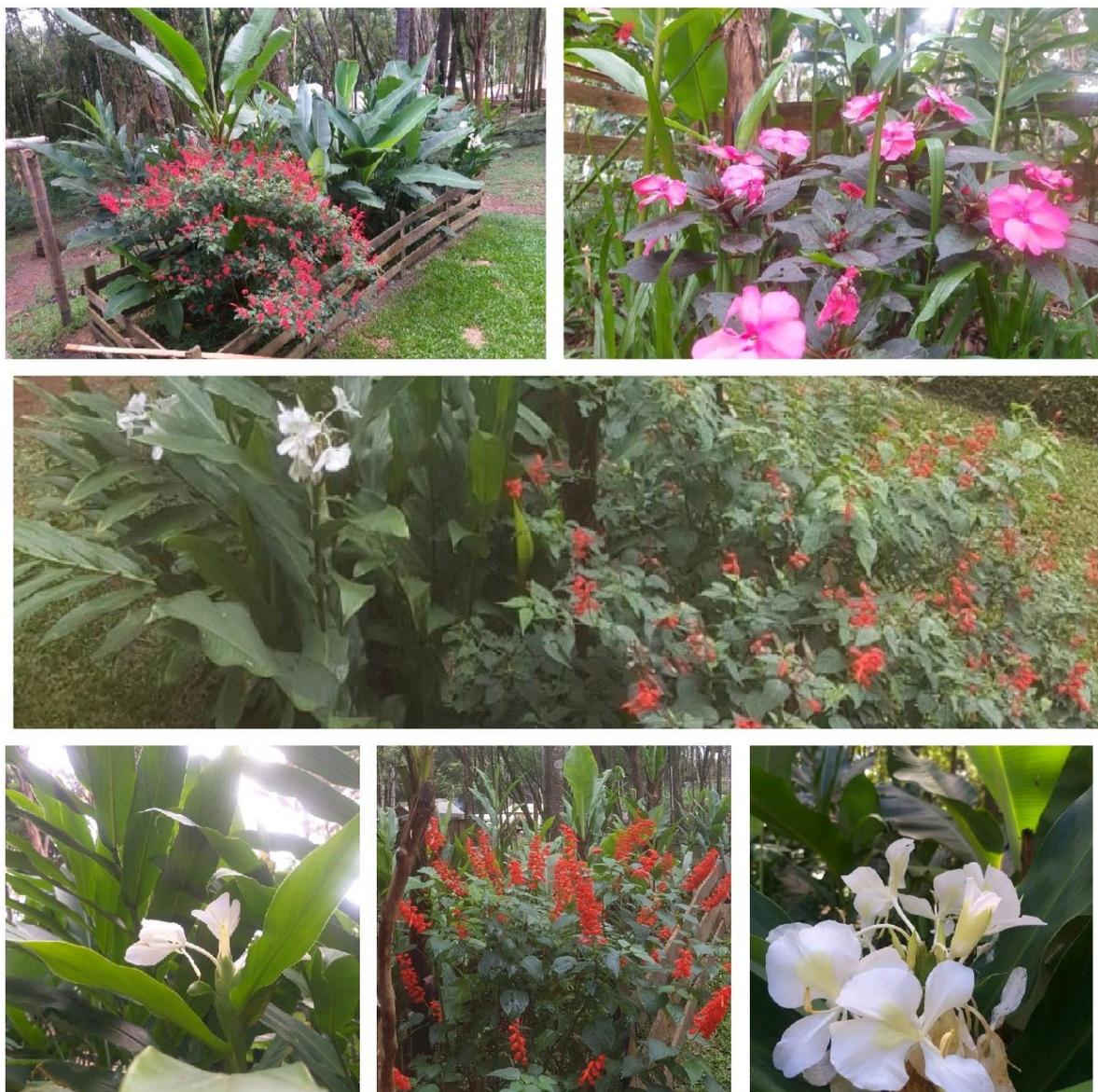


FIGURA 19: Registros das diferentes plantas e flores da BET, responsáveis pela melhora nos aspectos paisagístico e de serviços ecossistêmicos locais. Fonte: Refúgio Mar de Nuvens (2021/2022). Elaborado pelo Autor, 2022.

## 5 PROPOSTA DE ESTUDO A LONGO PRAZO

A atual pesquisa, além de contribuir com o conhecimento técnico sobre BETs de um modo geral, tem como objetivo fundamental propor o acompanhamento a longo prazo do funcionamento e das características da BET do Refúgio Mar de Nuvens.

Para tal, é necessário o envolvimento direto dos moradores locais Laísa e Bruno. Além da continuidade da participação da Universidade Federal do Paraná, aqui representada pela orientadora do trabalho, professora doutora Ana Flavia Locateli Godoi. Quanto a participação desse segundo ente (a UFPR) os arranjos são diversos, podendo se consolidar com a continuidade desse acompanhamento com a destinação e inclusão de novos alunos realizando seus trabalhos de conclusão de curso e/ou outras teses e trabalhos sobre essa mesma BET. Existe também a possibilidade de aulas expositivas em disciplinas que incluam em suas ementas o estudo de tratamento de esgoto e de alternativas para tal. Ou até mesmo visitas técnicas ao local nas Semanas Acadêmicas de Engenharia Ambiental da UFPR (evento de ocorrência anual destinado a proporcionar atividades extraclasse aos alunos do curso).

Quanto as questões metodológicas que envolvem esse estudo futuro, a principal que necessitaria do comprometimento dos moradores do Refúgio Mar de Nuvens seria a continuidade das medidas de nível de efluentes no tanque da BET. Na atual pesquisa a proposta inicial de periodicidade das tomadas de nível foi de fazê-las semanalmente, porém num novo contexto em que se vislumbra o acompanhamento sendo realizado durante anos, uma medida de nível mensal passaria a ser suficiente (de preferência num mesmo dia de referência por mês. Por exemplo, todo dia 10 de cada mês).

Já por parte da UFPR, sendo essa representada por alunos e professores, ficaria a responsabilidade de refazer ao menos duas ou uma vez ao ano todo o ensaio de amostragem e análises do solo (em intervalos idênticos de 6 em 6 meses, ou no caso de anualmente num mesmo mês de referência). Com essas informações seria possível traçar uma análise cada vez mais rica com o passar dos anos, vislumbrando um estudo de referência sobre BETs.

Fica ainda a proposta da inclusão de análises laboratoriais da qualidade e caracterização do efluente interno da BET. Para tal, é necessário aguardar o nível

da bacia subir até as camadas superiores (preferencialmente quando alcançar a camada de areia, posicionada aproximadamente em 70 cm de profundidade). Podendo esse item ser incorporado num eventual trabalho de continuidade de acompanhamento da BET. Com a concretização de tal proposta seria possível entender as relações entre os níveis de efluente, qualidade e características do solo e qualidade e características do efluente e como todos esses fatores influenciam o sistema como um todo.

Por fim, de forma mais imediata e independente do estudo a longo prazo, propõem-se o estudo e realização de alternativas de correção e/ou remediação do atual acúmulo de alumínio no solo da BET. Remediação pode ser realizada por qualquer material capaz de melhorar as características e propriedades do solo. Especificamente para a cultura da bananeira, é sugerida a calagem com calcário dolomítico, rica em cálcio e magnésio (EMBRAPA, 2012).

Também a adição de biomassa ao solo (podendo ser a cobertura com vegetação morta) melhora significativamente as condições físicas do solo (estrutura, aeração, porosidade), contribuindo com o crescimento das raízes (EMBRAPA, 2012). Tal atividade, em conjunto com a remediação, deve desacelerar o processo de saturação do solo e resultar em melhorias a curto e médio prazo para o sistema, além da tentativa de aumentar o tempo de vida das plantas que atualmente fazem o papel fundamental da evapotranspiração na bacia.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os frutos obtidos nesse trabalho pretendem contribuir no contexto de pesquisa a longo prazo de uma importante e não tão popular opção de tecnologia descentralizada de tratamento de esgotos sanitários, as Bacias de Evapotranspiração.

Quanto aos resultados produzidos na fase de análises do solo, o indicador “m%”, ou seja, a saturação por alumínio demonstra que a BET já vem acumulando esse elemento em seu solo, algo prejudicial para o ambiente das plantas ali presentes. Assim como o decréscimo de pH, que é outro parâmetro que indica saturação do solo futuramente. Portanto, sugere-se a remediação e/ou adubação do solo da BET, com intuito de melhorar as condições gerais e também dar longevidade ao sistema como um todo.

Vale salientar que essas análises de solo foram realizadas a partir de metodologias e estudos da área de Agronomia, que tecnicamente estudam a qualidade de solos para o plantio de culturas. Ainda que os resultados técnicos apontem para um solo pobre em nutrientes é importante retomar que o principal objetivo dessa pesquisa está relacionado a avaliação da BET como tecnologia de tratamento de efluentes sanitários. E em relação à isso, pode-se considerar que foram obtidos alguns resultados positivos, como os serviços ecossistêmicos prestados pela BET, a satisfação dos usuários e o fato de não ocorrerem problemas ou mau funcionamento da tecnologia.

Também é necessário lembrar que esse trabalho cumpriu com a função primordial de caracterizar uma BET que ainda possui pouco tempo de uso, e que o sistema ainda passará por diversas mudanças ao longo de sua vida útil. Nesse primeiro ensaio de acompanhamento pouca informação foi produzida quanto a relação entre efluente e solo, até mesmo pelo baixo nível do efluente no tanque. Porém, com o passar do tempo, cada vez mais o efluente deverá influenciar nos níveis e disponibilidade de nutrientes presentes no solo, essenciais para as plantas e para o processo de evapotranspiração. Tal constatação reafirma a importância da proposição e execução do estudo a longo prazo da BET do Refúgio Mar de Nuvens.

Finalmente, o trabalho também tem o objetivo de auxiliar na propagação não só tecnologias como as BETs, mas também ações comprometidas ambiental e

socialmente à fim de popularizar e tornar acessível o conhecimento técnico, proporcionando maior qualidade vida para a sociedade.

## REFERÊNCIAS

- Baião, I. et al. **Avaliação de um sistema de tratamento de efluente sanitário por evapotranspiração**. Research, Society and Development, v.9, n.7, p. 1-18, 2020.
- BENJAMIN, A. M. **Bacia de evapotranspiração: tratamento de efluentes domésticos e produção de alimentos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2013.
- BRIX, H. **Function of macrophytes in constructed wetlands**. Water Science and Technology, London, v. 29, n. 4, p. 71-78, 1994.
- COMEC - COORDENAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA. Curitiba. Disponível em: <http://www.comec.pr.gov.br/Pagina/Regiao-Metropolitana-de-Curitiba>. Acesso em: 02 jul. 2021.
- EMATER/FBB. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais. Fundação Banco do Brasil. **Tecnologia social: Fossa Ecológica/Tevap**. 14 p. 2016.
- EMBRAPA. **Monitoramento Fenológico da Corticeira-da-Serra, nos Municípios de Colombo e Curitiba, PR**. Colombo/PR, 2006.
- FERRI, M. G. **Fisiologia Vegetal**. Editora Pedagógica e Universitária Ltda. São Paulo, 1985.
- FIGUEIREDO, I. C.S. **Tratamento de esgoto na zona rural: diagnóstico participativo e aplicação de tecnologias alternativas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, na Área de Saneamento e Ambiente) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP. 2019.
- FNEM - FÓRUM NACIONAL DE ENTIDADES METROPOLITANAS. São Paulo. Disponível em: <https://fnembrasil.org/regiao-metropolitana-de-curitiba-pr/> . Acesso em: 16 jul. 2021.
- FOLLADOR, K. et al. 2015. SANEAMENTO BÁSICO: MEIO AMBIENTE E SAÚDE. **Revista UNINGÁ Review**. Vol.23, n.1, pp.24-28 (Jul-Set 2015).
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4a. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1998.
- FREITAS, G. H. S.; MICHELS, F. S.; PASSOS, W. E. O formalismo integral para um volume de controle. In: 8º ENEPE – Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2014, Grande Dourados. **Anais...**Grande Dourados: Universidade Federal da Grande Dourados, 2014. p. 2-3.

FUNASA. 2015. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. 4a. ed. Brasília: Funasa.

FUNASA. 2018. Ministério de Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **CataloSan: Catálogo de soluções sustentáveis de saneamento - gestão de efluentes domésticos**. Brasília: Funasa. 50 p. Eds: Paulo, P.L.; Galbiati, A.F.; Magalhães, F.J.C.

FUNASA. Ministério de Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Rural**. Brasília: Funasa. 260 p. 2019.

GALBIATI, A. F. **Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração**. Dissertação (Mestrado em tecnologias ambientais). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Campo Grande, MS. 2009.

GOOGLE EARTH. Disponível em:

[https://earth.google.com/web/search/Campina+Grande+do+Sul,+PR/@-25.44833242,-49.13280976,886.86926018a,65992.42385636d,35y,0h,0t,0r/data=CoQBGloSVAoIMHg5NGRjZWI5ZGVjMzc5OTIzOjB4OGNkM2UzM2QyZmQwNzFIZRkP1lrzPI05wCFIF5tWCo1lwCoZQ2FtcGluYSBHcmFuZGUgZG8gU3VsLCBQUhgCIAEiJgokCd-rt1WjXTNAEd2rt1WjXTPAGTm5\\_ECLWjFAlD-6FrgNwITA](https://earth.google.com/web/search/Campina+Grande+do+Sul,+PR/@-25.44833242,-49.13280976,886.86926018a,65992.42385636d,35y,0h,0t,0r/data=CoQBGloSVAoIMHg5NGRjZWI5ZGVjMzc5OTIzOjB4OGNkM2UzM2QyZmQwNzFIZRkP1lrzPI05wCFIF5tWCo1lwCoZQ2FtcGluYSBHcmFuZGUgZG8gU3VsLCBQUhgCIAEiJgokCd-rt1WjXTNAEd2rt1WjXTPAGTm5_ECLWjFAlD-6FrgNwITA) . Acesso em: 02 jul. 2021

GRANT, C. A. *et al.* 2001. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Revista Informações Agrônomicas**, nº 95 – setembro/2001.

IBGE. 2010. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. IBGE: Rio de Janeiro. 2010.

LANDAU, E. C.; MOURA, L. **Variação geográfica do saneamento básico no Brasil em 2010: domicílios urbanos e rurais**. Brasília: Embrapa, 2016.

LIBRALATO, G.; VOLPI G.; AVEZZÚ, F. To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal of Environmental Management**, Inglaterra, p. 61–68, 2012.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 5 ed. São Paulo: Ceres, 1989, 294p.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia, na Área de Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MESQUITA, T. C. R. *et al.* 2021. Gestão descentralizada de soluções de esgotamento sanitário no Brasil: aspectos conceituais, normativos e alternativas tecnológicas. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 56, p. 46-66, jan./jun. 2021.

NATALINO, L. **Implantação de tecnologia descentralizada de tratamento de efluentes para comunidade tradicional do município de Paranaguá – PR.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2021.

NATALINO, L. **Projeto Baná.** Curitiba, 2020. Não publicado.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C. *et al.* **Variabilidade de atributos físicos e químicos de solos da formação Guabirotuba em diferentes unidades de amostragem.** R. Bras. Ci. Solo, 34: 1491 – 1502, 2010.

ONU. **Transformando o Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Nova York, 2015.

PAMPLONA, S.; VENTURI, M. **Esgoto à flor da terra: sistema de evapotranspiração é solução simples, acessível e sustentável.** Permacultura Brasil: soluções ecológicas. Número 16. 2004.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual do Paraná. 2ª edição. Curitiba/PR. 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Curitiba. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/perfil-da-cidade-de-curitiba/174>. Acesso em 02 de jul. 2021.

RESENDE, R. G.; FERREIRA, S.; FERNANDES, L. F. R. O saneamento rural no contexto brasileiro. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 10, n. 1, p.131–149, 2018.

ROCHA, G. **Tanque de Evapotranspiração para tratamento de efluentes domésticos em zonas rurais.** 2021. 95 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021.

ROSSI, F. A.; DUMKE, E.; KRUGER, E. L. Atualização do ano climático de referência para Curitiba. In: X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de conforto no Ambiente Construído, 2009, Natal. **Anais...Natal**, 2009. p. 2.

SILVA, A. P. R. S. **Uso de Traçadores para Avaliação da Hidrodinâmica de um Tanque de Evapotranspiração – TEvap.** 2019. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações em Saneamento. Informações para planejar o Esgotamento Sanitário – Diagnóstico SNIS-AE 2019.** Brasília: Ministério das Cidades, 2019.

TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. **BALANÇO HÍDRICO - Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas.** INPE. São José dos Campos, 2005.

TONETTI, A. L. *et al.* **Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções.** Campinas, SP. Biblioteca/Unicamp. 153 p. 2018.

TRATA BRASIL (Org.). **Pesquisa Saneamento Básico em Áreas Irregulares – Relatório Brasil.** São Paulo, 2016. 118 p.

VERDEJO, M. E. **Diagnóstico rural participativo: guia prático DRP.** Brasília: MDA/Secretaria da Agricultura Familiar, 2006.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos de tratamento de esgotos. Série: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Vol. 1. 3a. ed. Belo Horizonte. DESA/UFMG, 452 p. 2005.

VON SPERLING, M. Avaliação e análise comparativa de três diferentes sistemas de “Wetlands” - Fluxo Superficial, Vertical e Subsuperficial- utilizados para o tratamento de curso d’água poluído por fontes difusas e pontuais, para o tratamento de esgotos brutos e para o pós-tratamento de efluentes de reatores UASB. In: BRASIL- Fundação Nacional da Saúde. 7º Caderno de pesquisa em engenharia de saúde pública. 1a. ed. Brasília: Funasa, p.81-108. 2013. **Anais...** Brasília, 2013.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos.** 8a. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2018.p. 140.

WHO/UNICEF. **World Health Organization and the United Nations Children’s Fund. Progress on sanitation and drinking water.** 2015.

WHO/UNICEF. **World Health Organization and the United Nations Children’s Fund. Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines.** 2017.

## ANEXOS

### ANEXO I:

#### CAPÍTULO V ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO PARA FINS DE FERTILIDADE

Renato Marques<sup>1</sup>

Antônio Carlos Vargas Motta<sup>2</sup>

##### 1. 1 DETERMINAÇÃO DA ACIDEZ DOS SOLOS

Os parâmetros que envolvem acidez e alcalinidade são de grande utilidade no estabelecimento das características dos solos, visto que as propriedades físicas, químicas e biológicas estão direta ou indiretamente associadas com acidez ou alcalinidade. Explorando dois casos extremos: solo com pH maior que 8 geralmente têm problemas com salinidade, dispersão do solo, deficiência de Fe e outros. No extremo oposto, valores de pH abaixo de 3 podem indicar a presença de solo tiomórfico recém drenado, onde poucas plantas podem sobreviver. Problemas associados com alcalinidade e pH extremamente baixos estão restritos a uma pequena área do território brasileiro: às regiões semi-áridas e pequenas manchas de solo do litoral, respectivamente. Contudo, o mais importante em regiões tropicais são problemas relativos à acidez do solo representada por valores abaixo da faixa de pH entre 5 e 6,5, a qual é requerida para a maioria das culturas melhoradas. Assim, necessitamos medir a acidez do solo e o poder tampão do mesmo, com a finalidade de fazer as correções necessárias.

---

<sup>1</sup> Eng. Florestal, Doutor, Professora do DSEA/UFPR. Rua dos Funcionários, 1540, CEP 80035-050, Curitiba (PR), e-mail: marques@agrarias.ufpr.br

<sup>2</sup> Eng. Agrônomo., Ph.D., Professor do DSEA/UFPR

### A. 1.1 DETERMINAÇÃO DA ACIDEZ ATIVA (pH CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol/L – 1:2,5)

O solo é tipicamente um ácido fraco, pois apenas uma pequena parte de sua acidez encontra-se dissociada na fase líquida, a qual é denominada acidez ativa e representa a atividade dos íons H<sup>+</sup> na solução do solo. Essa acidez pode ser medida em soluções aquosas ou salinas. Nas análises de rotina do LQFS do Departamento de Solos da UFPR, este valor de acidez é determinado conforme descrito abaixo.

#### 1.1.1 Comentários

O pH em solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol/L foi introduzido por SCHOFIELD e TAYLOR (1955) e por ser determinado em solução salina apresenta valores menores do que o pH em água. Em estudo feito em solos do Estado de São Paulo, esta diferença foi da ordem de 0,6 unidade (QUAGGIO, 1983). Este estudo mostrou também que existe estreita correlação entre estas duas medidas de pH. Algumas vantagens são enumeradas por PEECH (1965) para a dosagem do pH em cloreto de cálcio:

- a) o pH em CaCl<sub>2</sub> é pouco afetado pela relação entre terra e solução;
- b) a concentração salina de 0,01 mol/L é suficiente para padronizar as variações de sais entre amostras, evitando-se assim as variações estacionais de pH;
- c) a suspensão de solo em CaCl<sub>2</sub> é floculada, o que minimiza os erros provenientes do potencial de junção líquida, uma vez que o eletrodo de referência permanece num sobrenadante isento de partículas de solo;
- d) a concentração salina utilizada é semelhante à concentração de sais observada em soluções de solo de boa fertilidade. E o Ca<sup>2+</sup> é normalmente o íon mais abundante em solos. Por essas razões, o pH em CaCl<sub>2</sub> representa a atividade do íon H<sup>+</sup>, mais próxima daquela que existe no ambiente radicular das plantas.

**Outra vantagem:** precisão e estabilidade do aparelho de leitura.

#### 1.1.2 Procedimento

1- Com cachimbo volumétrico, transferir 10 cm<sup>3</sup> de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) para frasco plástico e adicionar 25 mL de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol/L;

2- Agitar em agitador circular por 15 minutos e deixar em repouso durante 40 minutos;

3- Efetuar leitura após calibração do potenciômetro com soluções padrão de pH 7,0 e pH 4,0;

4- Entre cada leitura, lavar o eletrodo com água deionizada, com auxílio de pisceta, e enxugá-lo levemente com papel toalha de textura fina.

### 1.1.3 Reagentes

#### **a) Solução de cloreto de cálcio 0,01 mol/L:**

Dissolver 1,47 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  em água deionizada e completar o volume para 1 litro. Deve-se misturar bem com um bastão de vidro e ajustar o pH para 5,5 com ácido acético.

### 1.1.4 Cuidados

A calibração deve ser feita após aquecimento prévio do potenciômetro e as soluções padrão devem ser retiradas da geladeira com antecedência de forma a estarem à temperatura ambiente no instante da calibração. No caso do uso de eletrodos combinados, o diafragma lateral, que corresponde à saída do eletrodo de referência, deve ficar coberto de líquido.

## B. 1.2 DETERMINAÇÃO DA ACIDEZ POTENCIAL (pH SMP)

### 1.2.1 Comentários

O valor de  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ , também chamado de acidez potencial é constituído de duas partes distintas da acidez dos solos: acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) e acidez não trocável ( $\text{H}^+$ ). O método de referência para extração da acidez potencial dos solos é o da solução de acetato de cálcio 1N a pH 7,0. Este método apresenta, contudo, alguns problemas relacionados com a qualidade dos reagentes, com o ponto de viragem e suscetibilidade à formação de fungos na solução estocada (RAIJ e QUAGGIO, 1983).

O método da solução tamponada SMP tem sido utilizado em substituição ao do acetato pois apresenta grande vantagem analítica, ou seja, usa-se a mesma solução de  $\text{CaCl}_2$  da determinação da acidez ativa. Além disso, também mostra estreita correlação com o método do acetato (PAVAN et al., 1992).

### 1.2.2 Procedimento

- a) Na mesma amostra que foi feito o  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ , adicionar 5 ml de SMP;
- b) Agitar em agitador circular por 15 minutos e deixar em repouso por uma noite;
- c) Efetuar a leitura no potenciômetro, conforme descrito no item 4.1.1;
- d) Os teores de  $\text{H}^+\text{Al}$  são obtidos em tabelas de correspondência com os valores de  $\text{pH}_{\text{SMP}}$ .

### 1.2.3 Reagentes

#### a) Solução SMP

Em balão volumétrico de 1 litro, colocar, nesta ordem: 106,2 g de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), 6,0 g de dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ), 4,0g de acetato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$ ) e 5,0 mL de trietanolamina. Acrescentar água. Separadamente, dissolver 3,6g de p-nitrofenol em cerca de 200mL de água quente, filtrando, se houver impurezas. Acrescentar esta solução ao balão volumétrico, completar o volume e agitar. No dia seguinte, ajustar o pH a 7,5 com NaOH 40% ou HCl 1+1. Manter a solução em refrigerador. Verificar ocasionalmente o pH, corrigindo se necessário (RAIJ e QUAGGIO, 1983).

## 2. 2 DETERMINAÇÃO DOS CÁTIOS TROCÁVEIS ( $\text{Al}^{3+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ e $\text{Mg}^{2+}$ )

### A. 2.1 COMENTÁRIOS

Os cátions trocáveis são extraídos do solo com uma solução de KCl 1mol/L, através do deslocamento destes íons dos sítios de troca do solo pelo  $\text{K}^+$  presente na solução de KCl.

No caso específico da extração do alumínio, a qualidade do reagente é de fundamental importância, pois reagentes que geram soluções de elevado pH inicial provocam a hidrólise e precipitação do íon  $\text{Al}^{3+}$ , o que resulta em valores menores na determinação deste elemento (CANTARELLA et al., 1981).

Outras formas existem para extrair estes cátions trocáveis do solo. No IAC, em São Paulo, por exemplo, estes cátions são extraídos por resinas trocadoras de íons que permitem a extração também de P e K trocáveis. Esta última metodologia é

bastante promissora, mas demanda investimentos em equipamentos e treinamento de pessoal de laboratório para as atividades específicas deste tipo de análise.

## B. 2.2 EXTRAÇÃO DO $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ e $\text{Al}^{+3}$ POR SOLUÇÃO KCl

### 2.2.1 Procedimento

- Com cachimbo volumétrico, transferir 10 cm<sup>3</sup> de TFSA para erlenmeyer de 125mL e adicionar 100mL de KCl 1mol/L;
- Agitar em agitador circular por 5 minutos;
- Deixar em repouso durante uma noite;
- Pipetar 20 mL para determinação do  $\text{Al}^{3+}$ , 20 mL para determinação do  $\text{Ca}^{2+}$  e 20 mL para determinação do  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ .

### 2.2.2 Reagentes

#### a) Solução de cloreto de potássio 1mol/L:

Dissolver 74,5 g de KCl em água deionizada e completar o volume para 1 litro.

## C. 2.4 DETERMINAÇÃO DO Al TROCÁVEL

A análise quantitativa de Al em solução pode ser determinada via análise titrimétrica, onde uma solução padrão com concentração conhecida é usada para reagir com uma solução com concentração desconhecida. No caso do Al, o íon é deslocado do complexo de troca com a solução de KCl e titulado com uma solução básica, em uma titulação ácido-base. Um indicador de neutralização é usado para determinar a completa neutralização do Al em solução. A reação envolvida é a seguinte:



### 2.4.1 Procedimento

- Em 20 mL do extrato, adicionar 3 gotas de indicador Azul de Bromotimol;
- Titular com solução de NaOH 0,02 mol/L até viragem de cor de amarelo-cítrico para azul.

### 2.4.2 Cálculo

$Al^{3+} \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \text{Volume (mL) de NaOH gasto na titulação}$

### 2.4.3 Reagentes

#### a) Solução de hidróxido de sódio 1,0 mol/L:

Em balão de 1000 mL dissolver uma ampola de NaOH e completar o volume com água deionizada.

#### b) Solução de hidróxido de sódio 0,02 mol/L:

Em balão de 1000 mL dissolver 20 mL de NaOH 1,0 mol/L e completar o volume com água deionizada.

#### c) Azul de Bromotimol:

a) Em balão de 100 mL colocar 1,0mL de NaOH 1,0mol/L; completar volume com água deionizada e agitar (NaOH 1%).

b) Pesar 0,2 g de azul de bromotimol: Colocar num gral de vidro e juntar 32 mL de NaOH 1%. Triturar até que a solução adquira cor verde. A seguir, passar para balão de 200 mL e completar volume com água deionizada.

## D. 2.5 DETERMINAÇÃO DO Ca + Mg TROCÁVEIS PELO EDTA (NÃO REALIZAMOS PELO MÉTODO DA TÍTULAÇÃO, UTILIZAMOS AA)

### 2.5.1 Comentários

Assim como para Al, a análise quantitativa de Ca e Mg em solução, pode ser determinada também via análise titrimétrica. Mas diferente do Al, estes elementos são determinados por uma titulação de complexação. A utilização de complexos, principalmente se for de espécie única, simplifica nitidamente as titulações complexométricas e facilita a detecção dos pontos finais.

Os ácidos aminopolicarboxílicos são excelentes agentes complexadores e o mais importante deles é o ácido etilenodiaminotetra-acético ou chamado também pela abreviatura EDTA. A estrutura espacial do seu ânion, que tem seis átomos doadores, capacita-o a satisfazer o número de coordenação de seis freqüentemente encontrado entre os metais e a formar anéis de cinco membros sem tensões por quelação. Os complexos resultantes têm estruturas semelhantes

mas diferem um dos outros na carga que carregam. Então, o EDTA forma complexos no meio aquoso e ele reage com todos os metais na razão 1:1.

E a dissociação do complexo é governada pelo pH da solução. Em valores de pH mais baixos decrescerá a estabilidade do complexo metal-EDTA. Quanto mais estável é o complexo mais baixo é o pH em que se pode fazer a titulação do íon metálico com EDTA. O pH mínimo para que o complexo exista é de 8 a 10 para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , e  $\text{Mg}^{2+}$ . Em solução a pH 10, Ca+Mg são determinados juntos e a pH 12,5 o Ca é determinado isoladamente, sendo o teor de Mg obtido por diferença (RAIJ et al., 1987).

Pelo baixo custo, o emprego do EDTA para determinação de Ca e Mg, em análises de solos ainda é, em alguns laboratórios, a melhor alternativa.

O EDTA forma complexos com constantes de estabilidade variáveis para diferentes metais. A constante de estabilidade do Ca é maior que a do Mg, o que significa que o cálcio é titulado antes do magnésio, em uma solução contendo os dois elementos.

Na titulação de um ácido forte, se o pH for posto em gráfico contra o volume da solução da base forte adicionada, o ponto de inflexão ocorrerá no ponto de equivalência. Semelhante é na titulação com o EDTA. Se fizermos um gráfico de pH contra o volume da solução de EDTA adicionado, ocorrerá um ponto de inflexão no ponto de equivalência. As constantes de estabilidade aparentes de vários complexos metal-EDTA estão indicadas na extrema direita das curvas. Quanto maior for a constante de estabilidade, mais nítido é o ponto final, desde que o pH se mantenha constante.

Nas titulações ácido-base, o ponto final é geralmente detectado por um indicador sensível ao pH. Nas titulações com o EDTA emprega-se um indicador sensível ao íon metálico, indicadores metalocrômicos. Tais indicadores formam complexos com íons metálicos específicos; como estes têm uma cor diferente da cor no ponto de equivalência. O ponto final da titulação também pode ser avaliado por outros métodos, inclusive técnicas potenciométricas, amperométricas, condutométricas e espectrofotométricas.

Os indicadores metalocrômicos visuais formam o mais importante grupo de indicadores para as titulações com EDTA e as operações deverão ser limitadas

ao uso de indicadores. O negro de Eriocromo é usado entre pH 7 a 11. Neste pH, a adição de sais metálicos produz uma mudança nítida de cor, do azul ao vermelho (BASSET, 1978).

### 2.5.2 Procedimento

- a) Em 20 mL do extrato, adicionar 4 mL de tampão pH 10,0;
- b) Adicionar 3 gotas de indicador Negro de Eriocromo;
- c) Titular com EDTA 0,01 mol/L até viragem de cor de rosa para azul.

### 2.5.3 Cálculos

$$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}\text{)} = \text{Volume (mL) de EDTA gasto na titulação}$$

### 2.5.4 Reagentes

#### **a) Solução tampão pH 10:**

Em balão de 2 litros, dissolver 135 g de cloreto de amônio em 400 mL de água deionizada. Juntar 1200 mL de amoníaco (NH<sub>4</sub>OH). Pesas 1,232 g de sulfato de magnésio (CaSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O) e 1,86 g de EDTA e completar o volume com água deionizada.

Controle de neutralidade: Pipetar 3 mL da mistura, juntar cerca de 50 mL de água deionizada e colocar 3 gotas de Negro de Eriocromo. A cor rosa violeta deverá passar para o azul puro apenas com uma gota de EDTA 0,01 mol/L.

**b) Mistura Tamponante:** Transferir os 2 litros para um frasco maior e adicionar 333 mL de trietanolamina. Agitar bem.

#### **c) Solução Indicadora Negro de Eriocromo T (NET):**

Dissolver 0,1 g de NET em 10 mL de metanol e adicionar 10 mL de trietanolamina. Conservar a solução em frasco plástico.

#### **d) EDTA 0,01 mol/L:**

Dissolver 3,7223 g de NA<sub>2</sub>EDTA.2H<sub>2</sub>O em água deionizada e completar o volume para 1 litro.

## E. 2.6 DETERMINAÇÃO DO Ca TROCÁVEL PELO EDTA

### 2.6.1 Procedimento

- a) Em 20 mL do extrato, adicionar 4 mL de solução tampão pH 12;
- b) Adicionar 1 pitada de indicador Calconcarbonato + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;
- c) Titular com EDTA 0,01 mol/L até viragem de cor de rosa para azul-roxo.

### 2.6.2 Cálculos

$\text{Ca}^{2+}$  (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) = Volume (mL) de EDTA gasto na titulação

### 2.6.3 Reagentes

#### a) Solução tampão pH 12:

Dissolver 100 g de KOH em cerca de 500 mL de água deionizada. Em frasco de 1000 mL com rolha, colocar 250 mL de trietanolamina e a solução de KOH. Completar o volume com água deionizada e agitar.

#### b) Indicador Ac. Calconcarbônico + Sulfato de Sódio:

- 1 - Pesar exatamente 49,5 g de sulfato de sódio (P.M. 142,04) ;
- 2 - Pesar exatamente 0,5 g de ácido calconcarbônico (C<sub>21</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 3H<sub>2</sub>O) (P.M. 492,46) ou 0,4234 g de calcon (C<sub>20</sub>H<sub>13</sub>N<sub>2</sub>NaO<sub>5</sub>S) (P.M. 416,99);
- 3 - Em gral de porcelana, adicionar os 49,5 g de NaSO<sub>4</sub>;
- 4 - Triturar, adicionando os 0,5 g de ácido calconcarbônico, até obter pó bem fino e bastante homogêneo;
- 5 - Guardar em frasco escuro muito bem vedado em local livre de umidade.

## 3. 3 DETERMINAÇÃO DE P E K “DISPONÍVEIS”

### A. 3.1 COMENTÁRIOS

Conforme comentado no item 2, os elementos P e K podem ser determinados em suas formas trocáveis, que apresentam boa correlação com a absorção dos elementos do solo pelas plantas. No Brasil, nas regiões com predominância de solos ácidos, tem-se utilizado também a extração de P e K do solo com soluções de ácidos fortes diluídos, os quais também apresentam estreita correlação com a absorção de P e K pelas plantas e com a produção das lavouras. Entre os extratores ácidos, o extrator duplo ácido (Mehlich-1) tem a vantagem de fornecer extratos límpidos por sedimentação, dispensando a filtração (TEDESCO et al., 1995).

## B. 3.2 EXTRAÇÃO DE P E K COM SOLUÇÃO EXTRATORA DE MEHLICH I OU NORTH CAROLINA

### 3.2.1 Procedimento

- a) Com cachimbo volumétrico, transferir 10 cm<sup>3</sup> de TFSA em erlenmeyer de 125 ml e adicionar 100 ml de extrator;
- b) Agitar durante 10 minutos em agitador circular;
- c) Deixar em repouso durante uma noite;
- d) Pipetar 25 mL do sobrenadante para efetuar as análises de P e K.

## C. 3.3 DETERMINAÇÃO DO P “DISPONÍVEL”

O P pode ser determinado em solução por métodos colorimétricos, visto que este forma compostos com cor azul ou amarelo, quanto reage com molibdato e vanadato em ambiente ácido e reduzido, respectivamente. Logo, moléculas de ácido fosfomolibdico ou fosfovanadato têm a capacidade de refletir as cores azul ou amarelo e, ao mesmo tempo, absorver outras cores, que não sejam azuis ou amarelos, quando incidida uma luz policromática. A intensidade da cor, azul ou amarelo, da solução formada é dada pela quantidade de luz refletida pelas moléculas formadas, e está diretamente relacionada com concentração em P. Ao mesmo tempo que refletem mais as cores azul ou amarelo com o aumento da concentração de P em solução, os demais comprimentos de onda, de uma luz policromática, passam a ser absorvidos em maior intensidade. Assim, é possível determinar a concentração de P em solução, através da intensidade da cor azul ou amarelo, estabelecendo-se uma relação entre concentração de P em solução e absorbância em um certo comprimento de onda, com equipamento chamado colorímetro ou espectrocolorímetro.

### 3.3.1 Procedimento

- a) Em 5 mL do extrato, adicionar 10 mL de solução de molibdato e 1 pitada de ácido ascórbico;
- b) Agitar e deixar descansar por 30 minutos.
- c) Ler em fotocolorímetro no comprimento de onda de 660 nm.

### 3.3.2 Reagentes

#### **a) Solução extratora Mehlich - 1**

HCl 0,05N + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025N, diluição de 1 : 10

#### **b) Solução concentrada de molibdato**

(A) Em balão de 2000 mL, adicionar cerca de 1000 mL de água deionizada, 300 mL de ácido sulfúrico concentrado e 4g de subcarbonato de bismuto. Resfriar.

(B) Dissolver 40 g de molibdato de amônio em aproximadamente 400 mL de água deionizada.

Adicionar lentamente a solução B na solução A, resfriar e completar volume com água deionizada.

#### **c) Solução diluída de molibdato**

Em balão de 1000mL, transferir 300mL da solução concentrada de molibdato de amônio e completar o volume com água.

#### **d) Solução Base de 50 mg P/L**

Em balão de 1000 mL, transferir 0,219 g de Fosfato de Potássio Monobásico (seco em estufa a 60 °C durante uma hora e resfriado em dessecador). Juntar cerca de 400 mL de água deionizada, 25 mL de ácido sulfúrico 7 N (196 mL para 1000 mL) e completar o volume com água deionizada.

#### **e) Soluções padrão de P**

Em balões de 100mL adicionar 0,6, 1,2, 1,8, 2,4, 3,0, 3,6, 4,2, 4,8, 5,4 e 6,0 ml da solução base de 50 mg P/L e completar o volume com água deionizada. As soluções resultantes terão, respectivamente, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 e 30 mg P/L.

Para a confecção da curva de calibração deve-se seguir o mesmo procedimento descrito acima para a determinação do P « disponível ».

## D. 3.4 DETERMINAÇÃO DO K "DISPONÍVEL"

### 3.4.1 Procedimento

A dosagem do K é feita no restante do extrato, diretamente por espectroscopia de emissão de chama ou fotometria de chama. A fotometria de chama é destinada para análise de potássio, sódio, cálcio e lítio. Estes elementos

podem serem excitados com um baixo nível de energia na forma de calor, permitindo então a emissão de radiações características. As radiações podem ser observadas pela mudança na coloração da chama. Uma mistura de ar e solução é aquecida, quando pulverizada na chama, fazendo com que os átomos sejam excitados e emitam radiações específicas. A radiação vinda dos átomos que se encontram na chama passa através de um filtro óptico que permite somente a radiação característica do elemento em investigação e chega a uma fotocélula. O sinal de saída da fotocélula é medido por um galvanômetro adequado. Logo, é possível estabelecer uma calibração entre diferentes concentrações de solução padrão e emissão de radiação para um determinado elemento.

### 3.4.2 Reagentes

#### a) Soluções padrão de K

(A) Em balão de 1000 mL, pesar 1,907 g de KCl p.a. (seco em estufa a 40 °C por uma hora). Completar o volume com água deionizada.

(B) Em balão de 1000 mL transferir 100 mL da solução A e completar o volume com água deionizada.

Em balões de 100 mL adicionar 0,5, 2,0, 4,0, 8,0, 12,0, e 20,0 mL da solução B e completar o volume com água deionizada. As soluções resultantes terão, respectivamente, 5, 20, 40, 80, e 120 mg K/L ou 0,0127, 0,0513, 0,1025, 0,2051, 0,3076 e 0,5116 cmol/L.

Para a confecção da curva de calibração a leitura das soluções é feita diretamente por fotometria de chama.

## 4. 4 DETERMINAÇÃO DO CARBONO

### A. 4.1 MÉTODO COLORIMÉTRICO

Este método foi desenvolvido por QUAGGIO e RAIJ (1979), introduzindo modificações em um método usado nos Estados Unidos. O método difere do anterior em três aspectos: a) a digestão é a frio; b)  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  é usado no lugar do  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , por ser sal de maior solubilidade e c) ao invés de determinar-se o excesso de dicromato por titulação, determina-se por colorimetria o íon  $\text{Cr}^{3+}$  formado na reação de oxi-redução (oxidação da matéria orgânica e redução do dicromato). A

determinação via colorimetria é possível visto que ocorre uma mudança de cor quando o  $\text{Cr}^{6+}$  ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) passa para  $\text{Cr}^{3+}$ , durante o processo de oxi-redução indicado acima.

Para a determinação da matéria orgânica, usa-se curva padrão preparada a partir de solos com diferentes teores de matéria orgânica, que englobam as diferentes situações a campo.

#### 4.1.1 Procedimento

- a) Com cachimbo volumétrico, transferir 1  $\text{cm}^3$  de TFSA para erlenmeyer de 125mL e adicionar 10 mL de solução oxidante de dicromato de sódio;
- b) Esperar  $\pm$  20 minutos e diluir para 100 mL;
- c) Deixar em repouso durante uma noite;
- d) Ler em fotocolorímetro no comprimento de onda de 650 nm,
- e) Encontrar os valores de correspondência de carbono e matéria orgânica com o auxílio de tabelas de referência.

#### 4.1.2 Reagentes

##### a) Solução de Dicromato

Dissolver 200 g de Dicromato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) num béquer com mais ou menos 500 mL de água deionizada. Passar esta solução para balão de 1000 mL e adicionar lentamente, com a proveta, 280 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado. **Deixar esfriar** e completar o volume com água deionizada.

#### 4.1.3 Observação

A determinação do carbono presente nos solos pode também ser efetuada através da metodologia da combustão, com detecção por infra-vermelho, metodologia esta bastante precisa mas que demanda equipamento sofisticado e ainda não disponível no LQFS do DSEA da UFPR.

## 5 DETERMINAÇÃO DE MICRONUTRIENTES CATIÔNICOS

### 5.1 COMENTÁRIOS

A extração de cobre, zinco, ferro, manganês, níquel e cádmio das formas disponíveis pode ser feita por soluções de sais, ácidos ou quelantes. A extração com HCl 0,1 mol/L, apresenta boa correlação com a absorção destes elementos pelas plantas, com a vantagem de extrair quantidades maiores, facilitando a determinação do cobre por espectrofotometria de absorção atômica. A espectroscopia de absorção atômica, ou simplesmente absorção atômica (AA), tem como princípio básico a absorção de radiação (com comprimento de onda específico para cada elemento) por elementos atomizados, em seu estado elementar. Esta radiação normalmente é emitida pela excitação do próprio elemento em uma fonte de ressonância.

A fonte de ressonância é a chamada de lâmpada catódica oca, a qual é coberta por uma fina camada de um certo metal (por exemplo Zn). A lâmpada é idealizada de tal modo que esta camada de metal é bombardeada por elétrons em alta velocidade, provocando o excitação do átomo que cobre a lâmpada e produzindo emissão de radiação específica ao metal constituinte da lâmpada. Esta radiação é encaminhada para uma chama onde encontram-se diversos átomos em estado elementar, os quais, submetidos à alta temperatura, se dissociaram na forma gasosa. Dentro de certos limites, os átomos em estado elementar absorvem o comprimento de onda enviado pela lâmpada. Assim é possível estabelecer uma calibração entre concentração do átomo que se encontra na chama e a quantidade de comprimento de onda absorvido.

## B. 5.2 EXTRAÇÃO DE MICRONUTRIENTES COM SOLUÇÃO EXTRATORA DE HCl 0,1N

### 5.2.1 Procedimento (Tucker and Kurtz, SSSP 1955).

- a) Pesar 5,0 g de TFSA em um erlenmeyer de 125 mL.
- b) Adicionar 50 mL de HCl 0,1mol/L.
- c) Fechar o frasco erlenmeyer.
- d) Agitar por 45 minutos em agitador mecânico.
- e) Centrifugar ou filtrar.
- f) Tomar uma alíquota de 10 mL.
- g) Determinar concentração no Espectrofotômetro de Absorção Atômica.

### 5.2.2 Reagentes

A preparação dos reagentes (HCl e padrões dos elementos) pode ser efetuada a partir de ampolas próprias para este fim. Estas ampolas com soluções padrão são fabricadas por diferentes empresas e, como exemplo, podem ser citadas as ampolas Titrisol (Merck), Normasol (Reagen) e Normex (Formitalia Carlo Elba).

Na ausência destas ampolas os reagentes podem ser preparados como descrito abaixo.

- a) **Solução extratora de HCl 0,1 mol/L:** medir 83,3 mL de HCl concentrado p.a. e dissolver a 10 L com água deionizada.
- b) **Padrão de 1.000 mg L<sup>-1</sup> de Zn:** pesar 1,0 g de Zn metálico e dissolver com 20 mL de HCl a 50%. Diluir a 1 L.
- c) **Padrão de 1.000 mg L<sup>-1</sup> de Cu:** pesar 1,0 g de Cu metálico num béquer de 100 mL. Fechar o béquer com vidro de relógio. Fazer uma solução com 1 parte de água desionizada (bidestilada) e 1 parte de HNO<sub>3</sub>. Passar, cuidadosamente, um mínimo desta solução para o copo de béquer; deixar o copo mais ou menos fechado com vidro de relógio até o cobre metálico estar dissolvido. Posteriormente passar esta solução para balão volumétrico de 1000 mL e completar o volume com água desionizada (bidestilada).
- d) **Padrão de 1000 mg L<sup>-1</sup> de Fe.** Pesar 2.000 g de ferro reduzido (pó) num béquer de 1 L. Fechar o béquer com vidro de relógio e passar, devagar, 500 mL de HCl concentrado p.a. para béquer, para dissolver o ferro. Esperar por 24 horas. Passar, então esta solução para o balão volumétrico de 2000 mL e completar o volume com água desionizada (bidestilada). Agitar bem e estocar num frasco plástico.
- e) **Padrão de 1000 mg L<sup>-1</sup> de Mn.** Pesar 2000 g de manganês metálico e dissolver numa pequena quantidade de HNO<sub>3</sub> [1 parte de água desionizada (bidestilada) e 1 parte de HNO<sub>3</sub> concentrado]. Passar, então, a solução para balão volumétrico de 2000 mL e completar o volume com água desionizada (bidestilada). Agitar bem e estocar num frasco plástico.
- f) **Solução padrão de trabalho:** pipetar 0 – 2,5 – 5 – 10 – 15 e 25 mL da solução padrão mista de Zn, Cu, Fe e Mn para balões de 1L e completar o volume com HCl 0,1 mol/L utilizado para a extração das amostras. Estes padrões contêm 0 – 0,25 – 0,5 – 1,0 – 1,5 e 2,5 mg l<sup>-1</sup> de Zn, Cu, Fe e Mn.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) BASSET, J; DENNEY, R. C.; JEFFERY, G. H.; MENDHAM, J. **Vogel: Análise Inorgânica Quantitativa**. Rio de Janeiro – RJ, 1978. Quarta Edição, Editora Guanabara S.A.
- 2) CANTARELLA, H.; DECHEN, A.R.; RAIJ, B. van. **Influência da origem do cloreto de potássio utilizado em extrações de amostras de solos nos resultados de alumínio trocável**. *Bragantia*, Campinas, v. 40, p. 189-192, 1981.
- 3) EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, 1997.
- 4) PAVAN, M.A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. IAPAR: Londrina, 1992. (IAPAR. Circular, 76).
- 5) PEECH, M. Hydrogen-ion activity. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 914-926.
- 6) QUAGGIO, J.A. **Crítérios para calagem em solos do Estado de São Paulo**. Piracicaba, 1983. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz.
- 7) QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. Comparação de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, p. 184-187, 1979.
- 8) RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 31p. (IAC. Boletim Técnico, 81).
- 9) RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargil, 1987.
- 10) SCHOFIELD, R.K.; TAYLOR, A.N. The measurement of soil pH. **Soil Society of America Proceedings**, Madison, v. 19, p. 164-167, 1955.  
TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos/UFRGS, 1995. (Boletim Técnico, 5).