



**FACULDADE DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**Geologia Aplicada**

**Projecto científico**

**Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas**



**Autora: Ferreira, Neima Maria Ibrahim**

**Maputo, Outubro de 2023**



## **FACULDADE DE CIÊNCIAS**

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### **Projecto científico**

**Avaliar a eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas**

**Nome da candidata:** Ferreira, Neima Maria Ibrahim

**Curso:** Geologia Aplicada

**Supervisor:** Prof. Doutor. Farisse João Chirindja

**Maputo, 23 de Outubro de 2023**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais **Rosmina Momed Faquir Salo e Ilídio António Ibrahimo Ferreira** e ao meu padraсто **Cristiano Ferreira José**.

Igualmente dedico aos meus avôs paternos António de Albuquerque Ferreira (em memória) e Rassula Ibrahimo Jala, pelo amor que recebi e continuou a receber. A minha avó materna Mariamo Chicália (em memória) pelo amor e aprendizado e ao meu avô Mohamed Faquir Salo.

A minha querida e amada sobrinha Whakila Rosmin Ferreira.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a **Allah** por sempre mostrar-me o caminho certo e pelas bênçãos em minha vida ao longo de toda a minha existência e principalmente nos anos desta licenciatura.

A elaboração de um trabalho nunca é realizado apenas pelo autor, mas em colaboração com várias pessoas especiais que Allah põem em nossos caminhos, agradeço ao **Prof. Farisse João Chirindja**, o meu supervisor pelo acompanhamento ao longo da execução do trabalho e pelos ensinamentos e aos **Dr. Amade Gani** e Prof. Dr. Eng. **Jonas Valente Matshinhe** pela orientação, paciência e motivação.

Agradeço a ajuda, o apoio e os conhecimentos transmitidos dos catadores e funcionários da lixeira municipal de Hulene B. O meu agradecimento aos docentes do Departamento de Geologia da UEM, pelo amor, pelos momentos únicos nas AJUS e pelo conhecimento transmitido, sou muito grata pela experiência que teve momentos maus e muitos bons que compartilhei e levarei para toda a vida. Igualmente agradeço a todo corpo técnico e administrativo (CTA), em especial a Célia Macamo e Hognério.

Agradeço a minha madrasta **Iva Carla Castelo Branco**, pelo apoio incondicional. Aos meus irmãos Adil Ferreira, Shamila Ferreira, Erica Ferreira, Shirley Ferreira, Jamila Ferreira, Enzo Ferreira, M. Tamin José, M. Razin José e Yakin José. Aos meus tios maternos que sempre apoiaram em todas as decisões tomadas ao longo de 9 anos, Momed Hanif, Ismael Salo, Amida Salo, Zulficar Salo, Cheinaz Salo e Abdul Salo. Ao meu tio paterno Luís Manuel Ibrahim Ferreira. Ao meu padrinho amado **Armando Grachane** pela dedicação desde o meu ensino primário e a minha tia **Samira Chicália** pelo apoio e dedicação.

Agradeço em especial aos meus queridos amigos Regina Livro, Zelia Pedro e Elvânia Buque (em memória) e Adélio Maló Timulua, pela dedicação, apoio, pela ajuda e por sempre estarem do meu lado. Agradeço a Allah por ter amigos como eles. Indo por este caminho sem esquecer agradeço em especial, com todo o amor e carinho ao Salif Babú e ao Rosário Fernandes. O meu agradecimento mútuo vai ao Heldo Manhiça, ao Eugénio Tembe e ao Geraldo Marengula.

Aos meus colegas e amigos de curso e os do curso de Cartografia e Pesquisa Geológica, levarei comigo sempre no meu coração e nas minhas memórias todas as aventuras e tudo que partilhamos, nos momentos de alegria e tristeza. Agradeço-vos, Lília, Neusia, Salva, Neusa, Fátima, Adila, Custódio, Emerson, Rui, Richeiro, Irwin, Lima, Alfredo e Mário.

## **DECLARAÇÃO DE COMPROMISSO DE HONRA**

Eu, **Neima Maria Ibrahim Ferreira**, declaro por minha honra que este Projecto Científico é da minha autoria não foi submetido ou apresentado em nenhuma outra instituição para obtenção de qualquer grau académico e é resultante da investigação por mim realizada sob orientações dos meus supervisores. O seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto e nas referências bibliográfica.

Maputo, 23 Outubro de 2023

---

Neima Maria Ibrahim Ferreira

## RESUMO

O método Fukuka é uma tecnologia de gestão de aterro sanitário em ambiente semi-aeróbico concebido no município japonês de Fukuoka. Esta tecnologia permite a construção de aterros sanitários melhorados de forma simples e de baixo custo, a partir de materiais e métodos disponíveis no local a ser implementado. Um aterro semi-aeróbico contém áreas com ambientes bioquímicos aeróbicos com a introdução de ar a partir dos tubos ventiladores de gases e áreas com ambientes bioquímicos anaeróbicas.

A implementação deste método na lixeira municipal de Hulene, deve-se principalmente à otimização e o aumento de tempo de utilidade da lixeira e, pela minimização do impacto ambiental e sócio-ambiental dentro da lixeira e nos bairros de Hulene B e Laulane, através da rápida estabilização do processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos com a recirculação do lixiviado para a bacia colectora.

Para o presente estudo, foram recolhidas três amostras de lixiviado e, codificadas como P1, P2 e P3. A amostra P1 foi colhida na bacia colectora de lixiviado; a amostra P2 foi colhida na região de cota mais baixa e a amostra P3 colhida dentro da lixeira nas camadas de resíduo sólido. Estas amostras foram submetidas a análises das suas propriedades microbiológicas, bioquímicas, físico-químicas e químicas. Posteriormente foi calculado o caudal diário de lixiviado recirculado para as bacias colectoras e; quantificados as concentrações do biogás emitido pela lixeira.

Os resultados mostram que o lixiviado é constituído por microrganismos patogênicos que o método Fukuoka não consegue eliminar; por nitratos, sulfetos e metais pesados que constituem a sua carga tóxica em menor concentração o que indica que o método é eficaz na redução destes poluentes tóxicos. A água que ocorre na região de cotas mais baixas é realmente contaminada pelo lixiviado e, atinge as águas subterrâneas. A pluma de contaminação desaparece a 200 m.

Cerca de 2,678 m<sup>3</sup>/dia de lixiviado são desviados da camada de resíduos sólidos urbanos, durante o pico da época seca para a bacia colectora. Este volume aumenta com a entrada da época chuvosa. A redução do volume de lixiviado e da concentração de contaminantes, bem como a diferença na emissão dos gases como metano e carbónico dão indicações do bom funcionamento do método Fukuoka.

**Palavras-chave:** Protecção das águas subterrâneas, Método Fukuoka, Lixiviado, Recirculação e Contaminação.

## ÍNDICE GERAL

DEDICATÓRIA .....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
DECLARAÇÃO DE COMPROMISSO DE HONRA .....	iv
RESUMO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS: .....	viii
ÍNDICE DE TABELAS:.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	x
CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Apresentação do problema de pesquisa .....	2
1.2. Objectivos .....	3
1.2.1. Geral.....	3
1.2.2. Específicos .....	3
1.3. Justificativa e relevância do estudo.....	4
CAPÍTULO II .....	6
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	6
2.2. Lixeira Municipal de Hulene .....	8
2.3. Método Fukuoka .....	9
2.4. Biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos .....	14
2.5. Poluição e contaminação da água subterrânea .....	17
2.6. Caracterização dos parâmetros microbiológicos do lixiviado .....	18
2.7. Caracterização dos parâmetros físico-químicos do lixiviado.....	20
2.8. Caracterização dos parâmetros químicos do lixiviado.....	22
CAPÍTULO III.....	24
ÁREA DE ESTUDO.....	24
3.1. Localização geográfica da área de estudo (lixeira municipal de Hulene).....	24
3.2. Geologia da área de estudo (lixeira municipal de Hulene) .....	25
3.3. Geomorfologia da área de estudo (lixeira municipal de Hulene).....	27
3.4. Hidrogeologia do Município de Maputo.....	28

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

CAPÍTULO IV.....	29
METODOLOGIA E TÉCNICA DE PESQUISA .....	29
4.1. Recolha de informação e amostragem .....	29
4.2. Trabalho de campo.....	30
4.3. Parte experimental (realização de experiências pelo laboratório da <i>Swisslab</i> ).....	35
CAPÍTULO V .....	37
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	37
5.1. Apresentação dos resultados das análises microbiológicas das amostras de lixiviado .....	37
5.2. Apresentação dos resultados das análises bioquímicas das amostras de lixiviado .....	38
5.3. Apresentação dos resultados das análises físico-químicas das amostras de lixiviado .....	39
5.4. Apresentação dos resultados das análises químicas do lixiviado.....	42
5.5. Quantificação do biogás emitido na lixeira municipal de Hulene .....	43
5.6. Apresentação do cálculo do caudal diário de lixiviado.....	46
CAPÍTULO VI.....	47
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	47
6.1. Interpretação e discussão dos resultados das análises microbiológicas das amostras de lixiviado .....	47
6.2. Interpretação e discussão dos resultados das análises microbiológicas das amostras de lixiviado .....	47
6.3. Interpretação e discussão dos resultados das análises físico-químicas das amostras de lixiviado .....	50
6.4. Interpretação e discussão dos resultados das análises químicas das amostras de lixiviado .....	53
6.5. Interpretação e discussão da temperatura e humidade nos tubos ventiladores de gases .....	55
6.6. Interpretação e discussão do biogás emitido na lixeira municipal de Hulene.....	55
6.7. Interpretação e discussão do cálculo do caudal diário do lixiviado a partir da bacia colectora..	57
CAPÍTULO VII .....	60
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	60
7.1. Conclusões .....	60
7.2. Recomendações.....	60
7.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
APÊNDICES.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS:

<b>Figura 1:</b> A- Bacia colectora de lixiviado. B- secção dos 18 tubos ventiladores de gases.....	12
<b>Figura 2:</b> Mapa do enquadramento geográfico da Lixeira Municipal de Hulene.....	24
<b>Figura 3:</b> Mapa geológico da área onde se enquadra a Lixeira Municipal de Hulene.....	27
<b>Figura 4:</b> Fluxograma metodológico geral. ....	30
<b>Figura 5:</b> Amostragem da amostra P2. 2. Região de cota mais baixa (indicada pela seta) e a bacia colectora de lixiviado. ....	31
<b>Figura 6:</b> Mapa ilustrativo dos pontos de amostragem de lixiviado. Fonte: Adaptado em Google Earth.....	32
<b>Figura 7:</b> Ilustração das garrafas plásticas utilizadas para a amostragem e conservação do lixiviado. ....	32
<b>Figura 8:</b> Mapa ilustrativo dos pontos de amostragem de gases a partir dos 18 tubos ventiladores de gases. <b>Fonte:</b> Adaptado pelo Google Earth.....	33
<b>Figura 9:</b> A-Equipamento utilizado para medição do gás CH <sub>4</sub> ; B- Equipamento para medição dos outros gases (CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S e H <sub>2</sub> ); C- Equipamento utilizado na medição da temperatura e humidade.....	34
<b>Figura 10:</b> Medição do caudal de lixiviado na bacia colectora. ....	34
<b>Figura 11:</b> Resultados das análises microbiológicas das três amostras de lixiviado. ....	37
<b>Figura 12:</b> Resultados das análises bioquímicas das três amostras de lixiviado. ....	38
<b>Figura 13:</b> Gráfico dos resultados da análise de pH (25°C) das três amostras de lixiviado. ....	40
<b>Figura 14:</b> Resultados da análise das propriedades físico-químicos das três amostras de lixiviado. ....	41
<b>Figura 15:</b> Resultados da análise das propriedades químicas das três amostras de lixiviado. ....	42
<b>Figura 16:</b> Variação da temperatura nos tubos ventiladores de gases. ....	43
<b>Figura 17:</b> Variação da humidade nos tubos ventiladores de gases. ....	44
<b>Figura 18:</b> Quantificação dos gases emitidos pela lixeira municipal de Hulene. ....	45

**ÍNDICE DE TABELAS:**

<b>Tabela 1:</b> Classificação dos resíduos sólidos urbanos de acordo com a norma moçambicana NM 339. Classificados quanto a origem e periculosidade. ....	7
<b>Tabela 2:</b> Condições ambientais que permitem o crescimento dos microrganismos aeróbicos nas camadas de resíduos sólidos urbanos.....	10
<b>Tabela 3:</b> Limites mínimos e máximos dos parâmetros microbiológicos, físico-químicos, bioquímicos e metais cada fase da biodecomposição da matéria orgânica (resíduos sólidos urbanos) num aterro sanitário. ....	17
<b>Tabela 4:</b> Descrição dos principais tipos de poluentes encontrados na água.....	18
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros analisados no lixiviado e os métodos utilizados em cada análise. ....	35
<b>Tabela 6:</b> Resultado do cálculo do caudal de lixiviado diário recirculado para a bacia colectora. ....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### Lista de abreviaturas

C.E	Condutividade eléctrica
DBO <sub>5</sub>	Demanda bioquímica de oxigénio (20 °C/5dias)
DQO	Demanda química de oxigénio
F.Q	Físico-químico
ISO	<i>International organization for standardization</i>
n <sup>o</sup>	Número
NP	Norma portuguesa
P1	Amostra de lixiviado da bacia colectora
P2	Amostra de lixiviado da região de cotas baixas
P3	Amostra de lixiviado das camadas de resíduo sólido urbano
pH	Potencial hidrogênico
ppm	Parte por milhão
PVC	Policloreto de vinil
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SMEWW	<i>Standard methods for the examination of water and wastewater</i>

### Lista de símbolos

°C	Graus celsius
μS	Microsiemens
km	Kilometros
km <sup>2</sup>	Kilometros quadrados
l/s	Litros por segundos
m	Metros
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por segundos
m <sup>3</sup> /h	Metros cúbicos por hora
mg/l	Miligramas por litro

### Lista de químicos

CH <sub>4</sub>	Metano
Cd	Cádmio
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
Fe	Ferro
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogénio
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogénio
NO <sub>2</sub>	Nitrito
NO <sub>3</sub>	Nitrato
O <sub>2</sub>	Oxigénio
Pb	Chumbo
S <sup>2-</sup>	Sulfeto
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre

## **CAPÍTULO I**

### **1. INTRODUÇÃO**

A sete quilómetros do centro da Cidade de Maputo, está localizada a maior e mais antiga lixeira a céu aberto da capital do país, implementada na época colonial. A lixeira municipal de Hulene ocupa uma área total de vinte e dois hectares e tem uma altura que varia entre seis e quinze metros.

Os resíduos sólidos urbanos que são descartados na lixeira são em geral constituídos por matéria orgânica (69%), papelão (12%), plástico (10%) e outros tipos de resíduos (9%); oriundos de diversas partes da província e cidade de Maputo. A biodecomposição natural da matéria orgânica produz o lixiviado e o biogás, que são os principais poluentes das lixieras urbanas e geram vários impactos ambientais e sócio-ambientais negativos dentro da lixeira e nos bairros de Hulene B e Laulane.

Com a tragédia que ocorreu no dia 19 de Fevereiro de 2018, causada pelo desabamento das camadas de resíduo sólido urbano devido a saturação da água da chuva; que provocou a morte de desassete pessoas e o ferimento de outras cinco. O Conselho Municipal da Cidade de Maputo em colaboração com o Ministério da Terra e Ambiente em parceria com o governo do Japão (JICA), implementaram o método Fukuoka na parte Oeste da lixeira, exatamente onde ocorreu o desabamento das montanhas de resíduo sólido urbano.

O método Fukuoka é um tipo de aterro semi-aeróbico de baixo custo onde ocorre a recirculação do lixiviado para bacias de decantação (bacias colectoras) onde se pode fazer o devido tratamento que infelizmente não acontece. Este método foi implementado na lixeira com o objectivo de garantir a sustentabilidade ambiental ao reduzir os impactos ambientais e sócio-ambientais negativos que a lixeira gera nos bairros de Hulene B e Laulane e, assim promover melhor qualidade de vida dos seus residentes.

Um aterro sanitário semi-aeróbico que utiliza o método Fukuoka é construído a partir de técnicas simples, com a instalação de tubos de drenagem de lixiviado e ventiladores de gases. Estes tubos são responsáveis pela entrada de ar nas camadas de resíduo sólido urbano, aumentando as

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

regiões aeróbicas que promovem a redução do volume de lixiviado através da sua recirculação e a redução do gás metano emitido na lixeira.

O presente trabalho científico avalia a eficiência do método Fukuoka na recirculação do lixiviado e retenção dos seus poluentes na protecção das águas subterrâneas que ocorrem nos bairros de Hulene B e Laulane a partir da análise qualitativa e quantitativa do lixiviado recirculado e do biogás emitido pela lixeira.

### **1.1. Apresentação do problema de pesquisa**

Nas áreas urbanas uma das principais fontes antropogênicas de contaminação das águas subterrâneas são os poluentes produzidos pela biodecomposição dos resíduos sólidos urbanos descartados em lixeiras a céu aberto, sem tratamento adequado. Estes poluentes estão presentes no lixiviado e no biogás; são em geral orgânicos e inorgânicos e estão inclusos nestes grupos, os fenóis, o nitrogénio amoniacal, o fosfato, os sulfetos, os metais pesados etc. (Morais, 2005; Kamaruddin *et al.*, 2014).

A lixeira municipal de Hulene ocupa uma área grande dos bairros de Hulene B e Laulane que habitam cerca de 48.717 e 27.996 habitantes que utilizam as águas subterrâneas do aquífero de Grande Maputo para suprimir as suas necessidades diárias. Este aquífero é considerado vulnerável a contaminações devido ao seu carácter freático e o tipo de formação geológica (Tamele Jr, 2014; Muchimbane, 2010). Dentro da lixeira municipal de Hulene existem zonas onde a profundidade da camada de resíduo sólido urbano atinge mais de 20 metros"; causando a contaminação das águas subterrâneas dos poços rasos (Azevedo, 2015).

Segundo Muguio (2022), o tratamento e o monitoramento dos poluentes produzidos pela biodecomposição dos resíduos sólidos urbanos descartados em lixeiras a céu aberto sempre foi um grande desafio em Moçambique, com o desastre que ocorreu no ano de 2018, o governo moçambicano de modo a garantir a sustentabilidade ambiental melhorando de maneira significativa a vida dos residentes dos bairros de Hulene B e Laulane, implementou o método Fukuoka na lixeira municipal de Hulene; transitando de um sistema de lixeira a céu aberto para um sistema de aterro sanitário semi-aeróbico.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

O método Fukuoka reduz o contacto entre os poluentes presentes no lixiviado com as águas subterrâneas diminuindo o risco da sua contaminação através do processo de recirculação do lixiviado. Presentemente poucos estudos são realizados sobre a contribuição que o método Fukuoka gera na protecção das águas subterrâneas através da retenção dos poluentes que contaminam as águas subterrâneas que ocorrem na região onde está instalada a lixeira. Desta forma o Conselho Municipal da Cidade de Maputo que é o órgão de estado responsável legalmente pela lixeira, não tem nenhum conhecimento sobre a eficiência do funcionamento deste método e se, após sua implementação esta de facto a contribuir para a redução dos impactos negativos dentro da lixeira e nos bairros de Hulene B e Laulane. Sendo assim surge o seguinte problema de pesquisa:

*Qual é a contribuição do método Fukuoka na retenção dos poluentes presentes no lixiviado que é recirculado na protecção das águas subterrâneas que ocorrem no bairro de Hulene B e Laulane?*

### **1.2. Objectivos**

#### **1.2.1. Geral**

- Avaliar a eficiência do método Fukuoka na recirculação do lixiviado produzido na lixeira municipal de Hulene e na retenção dos seus poluentes na protecção das águas subterrâneas da região.

#### **1.2.2. Específicos**

- Identificar os poluentes presentes no lixiviado fresco e recirculado para a bacia colectora pelo método Fukuoka na lixeira municipal de Hulene;
- Quantificar a composição química do biogás emitido para a atmosfera pelo método Fukuoka na lixeira municipal de Hulene;
- Estimar o caudal de lixiviado recirculado por dia para a bacia colectora pelo método Fukuoka na lixeira municipal de Hulene;
- Relacionar a composição do lixiviado, do biogás e do caudal de lixiviado recirculado com a eficiência do método Fukuoka na retenção dos seus poluentes na lixeira municipal de Hulene.

### **1.3. Justificativa e relevância do estudo**

Um dos grandes desafios que os países em desenvolvimento como Moçambique tem é a gestão de resíduos sólidos urbanos de maneira viável e sustentável. A cidade de Maputo produz diariamente grandes quantidades de resíduos sólidos urbanos e a falta de lugares adequados para a sua deposição e tratamento produzem impactos ambientais que podem durar várias décadas. Estes problemas são causados pela produção de lixiviado que é altamente tóxico e a emissão de biogás produzidos pela biodecomposição dos resíduos sólidos urbanos.

O objectivo dos estudos modernos sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos e o seu tratamento é de garantir a sustentabilidade do aterro e a redução da carga poluente do lixiviado e do biogás. Com a tragédia de 19 de Fevereiro na lixeira municipal de Hulene, o conselho municipal da cidade de Maputo, buscou formas de encerrar a lixeira de forma viável, sustentável e econômica sem causar mais danos ao ambiente e a comunidade que reside ao seu redor; residentes dos bairros de Hulene B e Laulane através da implementação do método Fukuoka.

A pouca disponibilidade de informações teóricas em trabalhos científicos e tecnológicos sobre a implementação, instalação, tratamento e controle do método Fukuoka e a protecção que gera sobre as águas subterrâneas faz com que este trabalho seja relevante no âmbito científico e geotécnico pois contribui para o conhecimento e aprimoramento das técnicas utilizadas no método Fukuoka e a expansão de aterros sanitários semi-aeróbicos no país; contribuindo na melhoria da qualidade de vida da população que reside próximo as lixeiras.

Inserese no âmbito econômico pelo uso de material local, de fácil acesso e de baixo custo no país para a construção e implementação do método Fukuoka. Também se inserese no âmbito hidrogeológico porque a técnica de recirculação do lixiviado para uma bacia colectora desvia e retém os seus poluentes evitando que atinjam as águas subterrâneas da região e assim evita a sua poluição e contaminação.

Inserese no âmbito ambiental e geoambiental porque acelera o processo de biodegradação da matéria orgânica e promove a rápida estabilização do aterro sanitário através da recirculação do lixiviado, reduzindo seu volume e do gás metano. É também relevante porque ao se conhecer a composição microbiológica e química do lixiviado contribui para a eficiência do seu tratamento

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na  
Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

e reaproveitamento e, facilita também o tratamento das águas subterrâneas contaminadas pelo  
lixiviado reduzindo potenciais problemas de saúde relacionados ao seu consumo.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo destina-se à descrição de conceitos e abordagens relevantes acerca do tema em estudo. Assim são abordados aspectos relacionados com a definição, classificação e gestão dos resíduos sólidos urbanos em Moçambique. Além deste conteúdo teórico este capítulo irá abordar informações teóricas sobre a lixeira municipal de Hulene e a implementação do método Fukuoka nela, e os conceitos relacionados as fases de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos e, por fim alguns aspectos relacionados a contaminação da água subterrânea.

#### **2.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**

O decreto nº 13/2006 de 15 de Junho, publicado no suplemento do boletim da república nº 24, 1ª série, sobre o processamento de gestão de resíduos sólidos urbanos no território nacional, resultante das actividades humanas, ao abrigo disposto no artigo 33, da lei nº 20/97 de 1 de Outubro, define o resíduo sólido urbano como "substâncias ou objectos que são eliminados pela população quando estes não têm mais utilidade ou quando a lei do estado obriga a sua eliminação". Este decreto descreve ainda que, estes resíduos sólidos urbanos são também conhecidos e vulgarmente chamados por "*lixo*" (Langa, 2014).

Os resíduos sólidos urbanos estão no estado sólido ou semi-sólido, e são gerados pelas sobras da actividade humana no quotidiano. Estes resíduos sólidos urbanos provêm da utilização de várias substâncias necessárias diariamente para cada cidadão ou família de uma dada região ou cultura. Dentre essas substâncias que são utilizadas em maior escala e que geram grandes quantidades de sobras ou resíduo são: o papel, o plástico, o vidro, os metais, o couro, a borracha, os tecidos, a madeira, os solos, a cerâmica e restos de alimentos.

##### **a) Regulamento dos Resíduos Sólidos Urbanos**

O decreto nº 94/2014 de 31 de Dezembro, aprovou o regulamento sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos que estabelece as regras de gestão destes resíduos no território moçambicano e é aplicável a todas as pessoas singulares e colectivas, públicas ou privadas que estejam envolvidas na gestão dos resíduos sólidos urbanos. Este regulamento classifica os resíduos sólidos urbanos de acordo com a norma moçambicana NM 339 (Cambule & Pereira, 2015). A Tabela 1 abaixo,

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

descreve a classificação dos resíduos sólidos urbanos de acordo com a norma moçambicana NM 339; classificados quanto a origem e periculosidade.

**Tabela 1:** Classificação dos resíduos sólidos urbanos de acordo com a norma moçambicana NM 339. Classificados quanto a origem e periculosidade.

Classificação dos resíduos sólidos urbanos	
Quanto à origem	Quanto à periculosidade
<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Resíduos domiciliares (actividades domésticas);</li><li>✓ Resíduos de limpeza urbana (limpeza de espaços públicos e serviços conexos);</li><li>✓ Resíduos de estabelecimentos comerciais (gerados durante a actividade destes estabelecimentos sem incluir o lixo urbano);</li><li>✓ Resíduo de serviços de saneamento básico (serviços de saúde, construção civil e de transporte).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Resíduos perigosos: Entram neste grupo resíduos com as propriedades ou características como inflamabilidade, corrosividade, reactividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade ou mutagenicidade;</li><li>✓ Resíduos não-perigosos: estão inclusos neste grupo todos os resíduos que não apresentam as propriedades ou características dos resíduos perigosos.</li></ul>

Fonte: (Ribeiro & Buque, 2013).

### b) Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos em Maputo

O decreto nº 13/2006 de 15 de Junho, define a gestão de resíduos sólidos urbanos como sendo o conjunto de normas, procedimentos, operações, acções financeiras e, planeamento administrativo, sociais, educativas, monitoria, supervisão e a avaliação com vista a assegurar uma gestão dos resíduos desde o seu descarte até a sua disposição final, tendo em conta a sua redução, reciclagem e reutilização, incluindo a separação, recolha, manuseamento, transporte, armazenamento e a sua eliminação de modo a obter benefícios ambientais, económicos e sociais de cada religião e cultura.

A geração de resíduos sólidos urbanos na cidade de Maputo é um processo constante e diário que varia em quantidades e composição conforme o seu nível de desenvolvimento socioeconómico, actividade económica, localização dos bairros e principalmente pelo costume e hábito dos munícipes. Em Moçambique a parte responsável pela recolha e disposição dos resíduos sólidos urbanos após o seu descarte é o ministério superintendente ao meio ambiente e o Conselho Municipal e; a parte administrativa que é responsável por este trabalho é o departamento da

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

direcção da recolha de "lixo" e cemitérios. Este departamento distribui e controla os contentores de resíduos sólidos urbanos que estão espalhados pela cidade de Maputo em cinquenta e três bairros e o seu número varia de acordo com o bairro.

Segundo Tvedten (2013), a zona que compõem os bairros nobres da cidade, tem disponível em média cerca de seis contentores por bairro e as zonas suburbanas tem disponível apenas um contentor por bairro, para o descarte dos resíduos sólidos urbanos. Estes resíduos são geralmente recolhidos por empresas e microempresas que prestam serviços ao Conselho Municipal, cujo objectivo é a recolha dos resíduos sólidos urbanos até o local final de deposição ou descarte, que é a Lixeira Municipal de Hulene.

### **2.2. Lixeira Municipal de Hulene**

A lixeira municipal de Hulene remota de 1973, quando a comunidade do bairro de Hulene decidiu reaproveitar um areiro abandonado de areia branca para eliminar os resíduos que não eram mais úteis no seu dia a dia. A deposição dos resíduos sólidos urbanos cresceu de forma rápida para o sentido leste e ultrapassando a área do antigo areiro. (Bernardo, 2023).

Antes da implementação do método Fukuoka na lixeira municipal de Hulene, o descarte dos resíduos sólidos urbanos era realizada de forma inadequada, num solo não previamente tratado em termos de infra-estrutura. Este termo "a céu aberto" foi parcialmente modificado em 2020 para um sistema de aterro sanitário do tipo semi-aeróbico.

Um ano depois do deslizamento das montanhas de "lixo", o Conselho Municipal da cidade de Maputo em colaboração com o ministério da Terra e Ambiente, introduziram na lixeira municipal de Hulene o método Fukuoka, em cooperação com o governo do Japão. Foi assinado em Yokohama no Japão um acordo de cooperação na gestão de resíduos sólidos urbanos, onde o governo japonês prestou assistência técnica, formação e transferência de tecnologias na área de gestão de resíduos sólidos urbanos (Nguelela, 2019).

O método Fukuoka tem como principais objectivos na Lixeira Municipal de Hulene de:

- Garantir que a lixeira seja usada de forma sustentável por mais de 10 ou 15 anos sem causar danos a saúde pública e ao meio ambiente no futuro;

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

- Gerir de forma segura a diminuição do risco de deslizamentos e incêndios;
- Reduzir a geração de gases de efeito estufa e promover de forma rápida e eficaz a biodecomposição da matéria orgânica presente nas camadas de resíduos sólidos urbanos.

Um aterro sanitário é em geral uma área adequada para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos em menor espaço possível. Trata-se de uma obra de engenharia civil que segue normas técnicas e operativas de forma a assegurar a protecção ambiental e controlar a poluição que o descarte final inadequado dos resíduos sólidos urbanos promove. Esta obra de engenharia envolve técnicas operacionais como: divisão de células, compactação de resíduos, cobertura, sistemas de impermeabilização, sistemas de drenagem de líquidos e gases, tratamento do lixiviado, monitoramento geotécnico e ambiental (Carvalho, 2001). A lixeira contém actualmente um total de 18 tubos ventiladores de gases e uma bacia colectora de lixiviado com quatro secções.

### **2.3. Método Fukuoka**

O método Fukuoka é uma tecnologia de aterro sanitário desenvolvido pela universidade e o município de Fukuoka, no Japão. É um tipo de aterro sanitário semi-aeróbico, com uma estrutura simples e de baixo custo, no que diz respeito aos materiais e métodos para o tratamento de lixiviado; desenvolvido para países em desenvolvimento como a Malásia, Irão, China, México e Oceania, e em África alguns países adoptaram esta tecnologia como o Quénia, a Etiópia e o Sudão assim como Moçambique que adoptou esta tecnologia em 2020 (JICA, 2007; Ngulele, 2019). Este tipo de aterro sanitário é muito vantajoso no quesito ambiental, porque promove a estabilização do aterro, a biodecomposição rápida e eficiente dos resíduos sólidos urbanos (matéria orgânica) e a recirculação e drenagem do lixiviado para uma bacia colectora e, promove a redução do volume do lixiviado e do gás metano.

#### **a) Funcionamento do método Fukuoka**

O método Fukuoka é uma tecnologia que reduz a matéria orgânica utilizando microrganismos aeróbicos (ambiente aeróbico), dentro das camadas de resíduos sólidos urbanos diminuindo a carga sobre o meio ambiente e assim, promove a rápida estabilização dos aterros sanitários. Esta estabilização do aterro é em geral influenciada pela quantidade de humidade, oxigénio, pH e

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

temperatura existente nas camadas de resíduos sólidos urbanos. As percentagens ideais destes parâmetros que permitem o crescimento das bactérias aeróbicas e que facilitam a rápida biodegradação da matéria orgânica, estão descritas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Condições ambientais que permitem o crescimento dos microrganismos aeróbicos nas camadas de resíduos sólidos urbanos.

<b>Parâmetros</b>	<b>Limites que permitem o crescimento</b>
Concentração de oxigénio	> 1%
Teor de humidade	20-60%
pH	5-9
Temperatura	15-40° C

**Fonte:** JICA, (2007).

Quando a humidade ou água é mínima nas camadas de resíduos sólidos urbanos dentro do aterro, o processo de activação dos microrganismos aeróbicos não ocorre e a biodegradação dos resíduos sólidos urbanos é retardado. A humidade do aterro provém da precipitação que ocorre ao longo do ano e, pode variar de acordo com o clima do país. Em alguns países a precipitação chega a atingir 3000 mm e em outros apenas atinge 500 mm (sendo esta condição pouco favorável para aterros semi-aeróbicos). Quando a precipitação na região do aterro for inferior ao necessário que são de 500 mm, durante um longo período, deve-se considerar, além da precipitação no aterro, a quantidade de água incluída nos resíduos sólidos urbanos que chegam ao aterro, o lixiviado gerado pela biodecomposição aeróbica e as águas sujas na área ao redor do aterro.

Neste tipo de aterro sanitário, a temperatura predominante para a actividade microbiana deve variar entre os 15 a 40°C (JICA, 2007). É essencial que haja um controle da temperatura e que esta seja mantida a pelo menos 15°C. A camada de resíduos sólidos urbanos deve ser mantida no estado aeróbico até a extensão possível. Estruturas com excesso de água intersticial deve ser removida da camada de aterro, isto porque, camadas que possuem muita quantidade de água

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

intersticial provocam cargas no tubo de descargas de colecta de lixiviado, na bacia colectora e; controlo de lixiviado e revestimento de superfície, causando assim custos adicionais ao controle e manutenção das infra-estruturas. A água intersticial na camada residual reduz os espaços na camada e promove uma rápida insuficiência de oxigénio que gera uma condição anaeróbica, a fim de promover a actividade aeróbica e manter uma condição não saturada.

### **b) Construção de um aterro sanitário segundo o Método Fukuoka**

O aterro sanitário é uma técnica controlada de atenuação natural dos resíduos sólidos urbanos em que os microorganismos biodegradam a matéria orgânica até que não apresente mais ricos ao ambiente (Helene, 2019). No método Fukuoka os tubos de descarga de colecta de lixiviado e os tubos de ventilação de gases são equipamentos essenciais. Os tubos de descarga de colecta de lixiviado, são instalados no fundo da área do aterro. Estes tubos descarregam rapidamente o lixiviado na área do aterro (bacia colectora) e introduzem ar fresco que, promove a biodecomposição aeróbica da camada de resíduos sólidos urbanos e reduzem a água na camada.

Os tubos de descarga e colecta de lixiviado devem ser de estruturas simples, que sejam comuns, baratos e de fácil acesso no país, no caso da lixeira Municipal de Hulene foram utilizados tubos do tipo PVC. Os tubos devem estar sempre abertos para a atmosfera e deve haver capacidade suficiente na bacia colectora para controlar o lixiviado recirculado ainda a ser tratado. Na Lixeira Municipal de Hulene a bacia colectora de lixiviado foi construída com betão e contém quatro secções. A Figura 1, mostra a bacia de colecta de lixiviado e a secção transversal dos tubos ventiladores de gases.



## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

**Figura 1:** A- Bacia colectora de lixiviado. B- secção dos 18 tubos ventiladores de gases.

Os tubos devem estar instalados em secção transversal do tubo de descarga de lixiviado e na parte inferior da área do aterro, permitindo a entrada suave de ar na área do aterro. O diâmetro do tubo principal de descarga e colecta de lixiviado é recomendado pelo menos 600 mm e o mínimo de 450 mm para alcançar os efeitos do método Fukuoka. Por serem a base do método, estes tubos devem ser adequadamente protegidos para que não sejam danificados pela operação do aterro ou pela pressão causada pelos resíduos do aterro; ou ainda pelas crianças e catadores de "lixo" que frequentam a lixeira (Jica, 2007).

Para alcançar os objectivos descritos pelo método Fukuoka, além de terem sido instalados os tubos de descarga e colecta de lixiviado é necessário a instalação também dos tubos de ventilação de gás, que também são de material plástico do tipo PVC no interior das camadas de resíduos sólidos urbanos. Os tubos devem ser instalados em intervalos adequados e através de uma configuração da estrutura de controlo no local do aterro. Estes tubos de ar são colocados a cada 10-15 m de altura do aterro e, em aterros planos a cada 20-40 m.

O intervalo ideal varia de acordo com a espessura da camada de resíduos sólidos urbanos do aterro. Portanto, espessuras de 10 m da camada de resíduos sólidos urbanos é recomendado um intervalo de 40 m; uma espessura de 10-20 m, o intervalo recomendado é de 30 m e se a espessura for superior a anterior, o intervalo recomendado é de 20 m. A utilização de um intervalo inferior a 20 m permite maior biodecomposição, mas como as tubulações de ventilação de gás dificultam a operação do aterro não podem ser recomendados. As funções e finalidades dos tubos verticais de ventilação de gás são as seguintes:

- i. Suprimir a geração de gás metano através da expansão da área aeróbica;
- ii. Remoção rápida da carga poluente do lixiviado;
- iii. Recirculação de lixiviado usando tubos verticais de ventilação de gás.

Para a protecção dos tubos de ventilação de ar, são utilizados os seguintes materiais: tubo perfurado, tapete de gabião, pedras de cobertura e pedras trituradas.

**c) Recirculação do lixiviado em aterros semi-aeróbicos**

O lixiviado é um líquido escuro que contém matéria sólida dissolvida e em suspensão, certas substâncias químicas dependendo do tipo de resíduos que é depositado no aterro e os produtos de resíduos microbianos. O lixiviado por sua vez, se mistura com as águas da chuva e, esta mistura é designada por percolado. O percolado é todo o líquido que passa através de um meio poroso. Nos aterros sanitários e lixeiras, a água da chuva infiltra-se nas camadas de resíduos sólidos urbanos, onde existe o lixiviado em formação ou formado e ocorre uma combinação de ambos, o percolado.

O processo de produção do lixiviado pode ser influenciado por factores climáticos (precipitação pluviométrica, evapotranspiração e temperatura), hidrogeológicas (escoamento superficial, infiltração, topografia, geologia e recirculação do lixiviado), pelas características da camada de cobertura (humidade, vegetação, declividade), características dos resíduos (composição gravimétrica, compactação, permeabilidade, granulometria, permeabilidade, peso específico) e pelo método de impermeabilização de fundo do local (Regattieri, 2003; Moravia, 2010). A ausência de produção de lixiviado no aterro sanitário implica problemas no sistema de drenagem e conseqüentemente a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Segundo Nishuwaki (2016), a recirculação do lixiviado faz parte de um dos princípios técnicos do método Fukuoka e têm como principais vantagens as seguintes:

- Redução das emissões de compostos orgânicos voláteis;
- Redução da toxicidade do lixiviado e de resíduos;
- Redução dos custos de tratamento de lixiviado;
- Redução do volume de lixiviado;
- A utilização mais eficaz da capacidade útil do aterro;
- Estabilização mais rápida dos resíduos;
- Produção de CH<sub>4</sub> mais rápida e em menor quantidade (Gotardo, 2016).

De acordo com Pires (2011), a recirculação consiste na redução das concentrações dos sólidos totais dissolvidos bem como da DBO<sub>5</sub> e DQO, por meio das acções de adsorção e dos microrganismos que, convertem a matéria orgânica em matéria mineralizada.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

A recirculação do lixiviado e a introdução de ar nas camadas de resíduo sólido urbano aceleram o processo de estabilização que resulta numa rápida biodegradação dos substratos orgânicos no aterro sanitário. Além da estabilização, estas condições inibem o acúmulo de ácido orgânico e favorecem o aumento do pH (Husseien *et al.*, 2022). De acordo com Draskrowsta *et al.* (2021), a recirculação do lixiviado durante a fase de estabilização, contribui para melhorar a eficiência em relação a actividade biológica e a metanogênese.

### **2.4. Biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos**

Os resíduos sólidos urbanos dos aterros sanitários apresentam composição química orgânica e inorgânica variada e, portanto, sofrem processos de oxidação e biodecomposição na presença ou ausência de oxigénio e água. Esses processos são capazes de converter os resíduos sólidos urbanos em substâncias mais estáveis. Essa conversão se processa pela actuação de organismos biodecompositores: bactérias arqueas metanogênicas, fungos, protozoários e algas. A biodegradabilidade dos aterros sanitários é influenciada pela: granulometria, composição química, idade, temperatura, aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes, pH dos líquidos, densidade e o grau de compactação dos resíduos sólidos urbanos.

#### **a) Fases da biodegradação da matéria orgânica presente nas camadas do resíduo sólido urbano**

Segundo Pohland & Harper (1985), existem cinco fases para avaliar a estabilidade dos resíduos sólidos em aterros que, são:

##### **Fase I ou inicial:**

- Presença de microrganismos aeróbicos e facultativos, ou seja, a biodegradação da matéria orgânica se inicia na presença de oxigénio;
- Esta fase tem duração de aproximadamente um mês;
- As camadas de resíduos sólidos urbanos apresentam muito acúmulo de água e temperaturas elevadas;
- O lixiviado formado nesta fase apresenta concentrações de sais de alta solubilidade como o cloreto de sódio;

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

- Devido a elevação da temperatura, pode ocorrer a formação de sais contendo metais, pois a esta temperatura muitos iões são solúveis em água;
- Os principais produtos formados nesta fase são  $H_2O$  e  $H_2CO_3$ , sendo que a presença do ácido carbónico eleva o pH;
- Os líquidos percolados provêm da humidade dos resíduos sólidos urbanos (matéria orgânica).

### **Fase II ou transição:**

- Ocorre actividade microbiana anaeróbica a partir de bactérias fermentativas e acetogênicas;
- Ocorre a formação de compostos orgânicos simples e de alta solubilidade, principalmente ácidos graxos voláteis e grandes quantidades de nitrogénio amoniacal;
- Os líquidos percolados contêm  $NH_3$  e em altas concentrações os ácidos orgânicos: acético, propiónico, butírico, láctico e fórmico.
- A presença deste ácido acarreta uma queda no pH podendo levar a solubilização de matérias inorgânicos como o ferro, o manganês, o zinco, o cálcio e o magnésio;
- Nesta fase o lixiviado caracteriza-se por ter uma grande quantidade de matéria orgânica.

### **Fase III ou formação ácida:**

- Início da produção de  $CH_4$  de forma intermitente;
- Ocorre a diminuição da concentração de nitrogénio e fosforo para o crescimento dos microrganismos;
- Os compostos orgânicos gerados na fase anterior são convertidos em  $CO_2$  e  $CH_4$ ;
- O pH se eleva pela redução de ácidos, conseqüentemente, diminui a solubilização de compostos inorgânicos;
- A carga de matéria orgânica é reduzida no lixiviado, significando uma menor biodegradabilidade.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

### **Fase IV ou fermentação metanogênica:**

- Intensifica a geração de CO<sub>2</sub> (40%) e CH<sub>4</sub> (60%), sendo a principal fase de produção de gás e permanecendo constante a produção e a composição do biogás;
- A concentração do ácido diminui e o pH sobe entre 7 e 8;
- A carga orgânica do lixiviado decresce e as concentrações de nutrientes se torna limitada;
- Os íons sulfato e nitrato são reduzidos para sulfitos e amônia e as concentrações de DBO<sub>5</sub> e DQO reduzem;
- Alguns metais são removidos por complexação e precipitação. Esta fase é a mais longa no aterro, variando de 6 meses até vários anos.

Durante a metanogênese os processos de biodegradação da matéria orgânica nos aterros sanitários geram efluentes líquidos e gasosos. As emissões gasosas nos aterros resultam da acção de microrganismos metanogênicos responsáveis pela fermentação do ácido acético e gás hidrogénio em metano (CH<sub>4</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), conhecidos como biogás (Ferreira, 2011). O biogás é uma mistura de 50% a 60% de metano (CH<sub>4</sub>), 40 a 50% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases em concentrações traço, menores que 1%, como por exemplo o sulfeto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S), o monóxido de carbono (CO), as mercaptanas (CH<sub>3</sub>SH) e diversos outros compostos orgânicos voláteis.

### **Fase V ou maturação final:**

- Ocorre uma queda acentuada na produção de gás, cessando ao final e os líquidos percolados permanecem com concentrações mais baixas;
- Escassez de nutrientes e paralisação do gás;
- O oxigénio volta a aparecer e as matérias orgânicas resistentes a biodegradabilidade são convertidas em moléculas como ácidos húmicos;
- Ocorre a estabilização da actividade biológica.

Os limites dos parâmetros das propriedades microbiológicos, físico-químicos, bioquímicos e metais encontrados em cada fase da biodecomposição da matéria orgânica (resíduos sólidos urbanos) estão descritos na Tabela 3.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

**Tabela 3:** Limites mínimos e máximos dos parâmetros microbiológicos, físico-químicos, bioquímicos e metais cada fase da biodecomposição da matéria orgânica (resíduos sólidos urbanos) num aterro sanitário.

Parâmetros	Fase II	Fase III	Fase IV	Fase V
<b>pH</b>	6.7	4.7-7.7	6.3-8.8	7.1-8.8
<b>ST</b>	2050-2450	4120-55300	2090-6410	1460-4640
<b>DBO<sub>5</sub></b>	100-10900	1000-57700	600-3400	4-120
<b>DQO</b>	480-18000	1500-71100	580-9760	31-900
<b>AVT (mg HAc/l)</b>	100-3000	3000-18800	250-400	Ausente
<b>Cobre</b>	0.085-0.39	0.005-2.2	0.03-0.18	0.02-0.56
<b>Ferro</b>	69-312	90-2200	115-336	4-20
<b>Chumbo</b>	0.001-0.004	0.01-1.44	0.01-0.10	0.01-0.01
<b>Magnésio</b>	66-96	3-1140	81-505	81-190
<b>Zinco</b>	0.06-21	0.65-220	0.40-6	0.40
<b>Cádmio</b>	190-490	70-3900	76-490	76-254
<b>Cloreto</b>	30-50000	30-50000	30-50000	30-50000
<b>Sulfeto</b>	Ausente	0-818	0.9	Ausente
<b>Coliformes totais</b>	10 <sup>0</sup> -10 <sup>5</sup>	10 <sup>0</sup> -10 <sup>5</sup>	Ausente	Ausente
<b>Coliformes fecais</b>	10 <sup>0</sup> -10 <sup>5</sup>	10 <sup>0</sup> -10 <sup>5</sup>	Ausente	Ausente

**Fonte:** Lima, (2006).

É importante referir que, a lixeira municipal de Hulene não recebe resíduo sólido hospitalar sendo este por vezes incinerado no hospital central de Maputo ou encaminhado para o aterro sanitário de Mavoco localizado no distrito de Boane.

### 2.5. Poluição e contaminação da água subterrânea

As lixeiras e aterros sanitários controlados causam vários impactos ao meio ambiente e a saúde humana. Estes impactos são:

- Poluição e contaminação das águas superficiais e subterrâneas;
- Devastação da vegetação;
- Queimas e riscos de explosão;
- Odores;

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

- Poluição do ar.

A poluição da água indica que uma ou mais das suas utilizações foram prejudicadas, isto porque, altera o aspecto do sistema original, afectando desta forma ao homem que utiliza a água para o consumo, necessidades domésticas e industriais; e irrigação de plantações. Noutra contexto a contaminação da água impede a sobrevivência de vida vegetal e animal; e causa graves consequências aos seres humanos, alterando as características e propriedades físico-químicas da água devido a presença de factores patogênicos e químicos. Os poluentes chegam a água a partir de fontes naturais e antropogénicas. As fontes naturais geralmente são as actividades humanas e a dissolução de minérios; já as fontes antropogénicas temos as actividades industriais, agrícolas, minerais, descarte incorrecto de resíduos sólidos urbanos etc.

As lixeiras e aterros sanitários são uma fonte de poluição e contaminação das águas subterrâneas, através de poluentes orgânicos e inorgânicos presentes no lixiviado ou no biogás. Os principais poluentes e parâmetros que alteram as propriedades da água e que são oriundos das lixeiras a céu aberto e aterros sanitários estão descritos na Tabela 4 abaixo.

**Tabela 4:** Descrição dos principais tipos de poluentes encontrados na água.

<b>Tipos de poluentes e parâmetros que alteram as propriedades</b>	
<b>Microbiológicos</b>	Microrganismos patogênicos (vírus, bactérias e parasitas)
<b>Bioquímicos</b>	DBO, DQO e M.O
<b>Físico-químicos</b>	pH, alcalinidade, dureza, condutividade elétrica, salinidade, sólidos dissolvidos, etc.
<b>Químicos</b>	Metais pesados, fertilizante, petróleo, plástico, compostos orgânicos sintéticos esgotos domésticos e industriais etc.

**Fonte:** Adaptado em Moravia (2010).

### 2.6. Caracterização dos parâmetros microbiológicos do lixiviado

Quanto a constituição microbiológica do lixiviado são descritos os coliformes totais e bactérias coliformes.

**a) Bactérias coliformes e coliformes fecais**

As bactérias coliformes têm a capacidade de fermentar a lactose num período de 24 horas, numa temperatura de 45,5 °C, em meio EC (meio cultivo para demonstração selectiva de coliformes termotolerantes) e tem como produto um gás. Geralmente são quantificadas as bactérias coliformes do género *Escherichia* que é de origem fecal e o seu *habitat* natural é o trato gastrointestinal do homem e dos animais (Geus & Lima, 2008).

Segundo Carvalho *et al.* (2008), algumas destas bactérias tende a ter maior facilidade de multiplicarem-se dentro da água e servem como indicadores da contaminação fecal na água, indicando a sua potabilidade.

**2.7. Caracterização dos parâmetros bioquímicos do lixiviado**

Quanto a constituição bioquímica do lixiviado são descritos a demanda bioquímica de oxigénio (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxigénio (DQO), matéria orgânica (oxidabilidade) e o oxigénio dissolvido na água.

**a) Demanda bioquímica do oxigénio (DBO<sub>5</sub>)**

A forma mais utilizada para medir a quantidade de matéria orgânica biodegradável presente é através da demanda bioquímica de oxigénio (DBO<sub>5</sub>). Este parâmetro mede a quantidade de oxigénio necessária para estabilizar biologicamente a matéria orgânica presente numa amostra, após um tempo padrão de 5 dias e uma temperatura de 20° C. A DBO<sub>5</sub> retrata a quantidade de oxigénio requerida para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea. É uma indicação indirecta de carbono orgânico biodegradável (Lôbo, 2006).

**b) Demanda química de oxigénio (DQO)**

A demanda química de oxigénio (DQO), é a quantidade de oxigénio consumido por materiais e por substâncias orgânicas e minerais, que se oxidam sob condições definidas. Este parâmetro na água, pode estimar um potencial poluidor (se for consumido o oxigénio) de efluentes domésticos e industriais (Zuccari *et al.* 2005).

### **Relação DBO<sub>5</sub>/DQO**

A razão DBO<sub>5</sub>/DQO é usualmente adoptada para indicar o grau de biodegradabilidade de águas residuárias. Valores maiores que 0,50 indicam que a matéria orgânica presente é facilmente biodegradável. Quando essa relação é menor que 0,30 pode ser indicativo de que os compostos presentes são pouco biodegradáveis, e que a água residuária é recalcitrante ao tratamento biológico.

Os parâmetros analíticos adoptados como indicadores tradicionais de poluição por esgotos sanitários são a DBO e DQO. Quando inicia a fase metanogênica, a fracção DBO<sub>5</sub>/DQO cai para valores menores que 0,1 indicando baixa biodegradabilidade dos compostos orgânicos presentes (Bocchiglieri, 2010).

#### **c) Matéria Orgânica (oxidabilidade)**

A oxidabilidade ou índice de permanganato é um parâmetro que permite fornecer informações sobre a qualidade da água destinada ao consumo humano, ao identificar os teores de matéria orgânica presente na mesma. Esta análise corresponde a quantidade de oxigénio necessária para oxidar a matéria orgânica existente na água em meio ácido e através do aquecimento.

#### **d) Oxigénio dissolvido**

O oxigénio dissolvido refere-se ao oxigénio molecular (O<sub>2</sub>) dissolvida na água. As fontes principais deste elemento na água são a atmosfera (devido a diferença de pressão parcial) e as algas (fotossíntese das algas e ocorre em águas poluídas ou eutrofizadas). Conhecer a concentração de oxigénio dissolvido na água é também importante para a análise química da demanda bioquímica de oxigénio (Pintos, 2007).

### **2.8. Caracterização dos parâmetros físico-químicos do lixiviado**

Quanto a constituição físico-química do lixiviado são descritos a alcalinidade total, condutividade eléctrica (25°C), pH (25°C), sólidos totais dissolvidos, cloretos (Cl<sup>-</sup>), sulfetos (S<sup>2-</sup>) e nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

### **a) Condutividade eléctrica (25 °C)**

Segundo Ferreira (2010), a condutividade eléctrica contribui para uma melhor compreensão das fases de estabilização da matéria orgânica em um aterro sanitário. Este parâmetro varia com a concentração total de substâncias ionizadas dissolvidas em um meio aquoso, com a temperatura, mobilidade e a valência dos iões e com as concentrações reais e relativa de cada ião (Henriques, 2019).

### **b) pH (25 °C)**

O pH é uma medida da concentração de iões hidrogénio presentes na fase líquida em escala anti-logarítmica, indicando condições de acidez, neutralidade ou alcalinidade do meio (Moravia, 2010; Ferreira, 2010). O pH é um importante parâmetro de acompanhamento do processo de biodecomposição dos resíduos sólidos urbanos, indicando a evolução da biodegradação microbológica da matéria orgânica e a evolução global do processo de estabilização da massa de resíduos (Lôbo, 2006).

### **c) Alcalinidade total**

A alcalinidade total expressa a capacidade da água resistir as variações de pH e tamponamento durante a neutralização dos iões hidrogénicos ( $H^+$ ) que constituem os ácidos (Finhani, 2015). Segundo Moravia (2010), alcalinidade total é a medida da capacidade dos iões presentes em um meio capaz de neutralizar ácidos. A alcalinidade total pode ser devida a bicarbonatos, carbonatos ou hidróxidos e representa a capacidade do meio em resistir a possíveis oscilações do pH.

### **d) Sólidos totais dissolvidos**

Os sólidos totais dissolvidos em água, são toda a matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo determinado. Os sólidos totais dividem-se em três grupos que são determinados pela ignição da amostra a cerca de 600°C e, distinguem-se por sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e sólidos suspensos totais (SST).

Os sólidos fixos totais correspondem a parte que equivale a matéria mineral que permanece, visto que a sua volatilização é mínima. Já os sólidos voláteis totais constituem parte da matéria

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

orgânica que volatiliza durante o processo de queima, visto que uma certa quantidade da matéria orgânica não queima, assim como existe matéria mineral que é destruída a altas temperaturas. Por fim, os sólidos suspensos totais correspondem ao resíduo ou material que fica retido no filtro ou em suspensão.

### e) Cloretos (Cl<sup>-</sup>)

O cloro, na forma de íon cloreto, é um dos principais aniões inorgânicos em águas naturais e residuárias. Segundo Bilgili *et al.* (2006), o cloreto é um parâmetro de conservação e não de biodegradação e são componentes comuns do lixiviado de aterros sanitários e não geram nenhum tipo de contaminação ou problema de saúde; são advindos da dissolução de sais como o cloreto de sódio e outros elementos como Ca, K, Ag, Mg, Sr, Ba, Li etc. (Souto, 2009).

### f) Sulfetos (S<sup>2-</sup>)

O sulfeto ocorre frequentemente em águas subterrâneas e sedimentos. Geralmente é produzido pela biodecomposição da matéria orgânica e redução bacteriana do sulfato. O sulfeto de hidrogénio é o mais abundante na água; este composto em maior quantidade na água provoca toxicidade, mau odor e corrosão nas águas. Os esgotos sanitários e efluentes industriais são ricos em sulfatos que, em condições anaeróbicas e acção biológica, ocorre a sua redução a sulfeto na água (Matias, 2010).

### g) Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Segundo Hirata (2002), o nitrato é o poluente de ocorrência mais frequente nas águas subterrâneas e residuárias, porque esta presente em fertilizantes agrícolas; ocorre na criação de animais, sistemas de saneamento *in situ* (tanques sépticos e fossas rudimentares) e nas indústrias químicas, siderúrgicas, farmacêuticas, alimentícios, frigoríficos e matadouros (Milanez *et al.*, 2015).

## 2.9. Caracterização dos parâmetros químicos do lixiviado

Quanto a constituição química do lixiviado são descritos os metais pesados como cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) e também o Magnésio (Mg) que é um metal alcalino terroso.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

### **a) Metais pesados e magnésio**

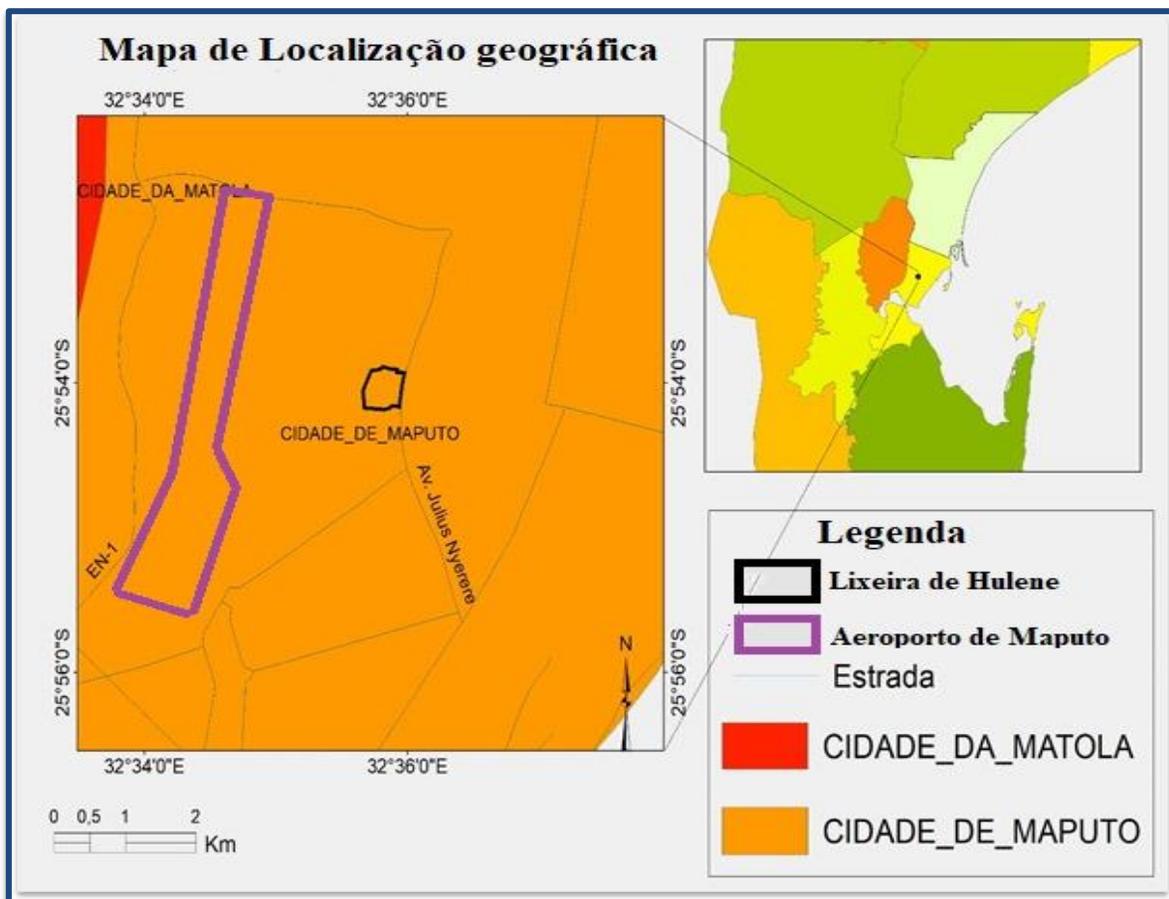
Os metais pesados ocorrem nas águas naturais devido ao lançamento de efluentes industriais que são gerados pelas indústrias extractivas de metais, de tintas e pigmentos e a galvanoplástica. Os metais pesados não se degradam e acumulam-se nos elementos do meio ambiente manifestando sua toxicidade (Azzolini, 2002). Estão presentes nos resíduos sólidos urbanos em grandes quantidades, principalmente em grandes cidades, onde as utilizações de produtos domésticos contêm grandes quantidades de metais pesados. Os produtos mais utilizados que contêm os metais pesados são as pilhas, bactérias, jornais, tintas, tecidos, têxtis, enlatados e inclusive nos alimentos (Monteiro, 2003). A fracção da matéria orgânica aparece também como fonte dos metais Cu, Pb e Zn, os plásticos são fonte de Cd, Pb e o Cu se manifestam em quantidades importantes nos mateis ferrosos e o papel fonte de Pb (Celere *et al.*, 2007).

## CAPÍTULO III

### ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. Localização geográfica da área de estudo (lixeira municipal de Hulene)

A lixeira municipal de Hulene está localizada a 7 km do centro da cidade de Maputo, nos bairros de Hulene B e Laulane e ocupa uma área aproximadamente a 22 hectares e a altura da montanha de resíduos sólidos urbanos varia na faixa entre 6 a 15 m. A cidade de Maputo tem uma altitude media de 47 m e, está localizada a Oeste da Baía de Maputo. Os seus limites correspondem as latitudes 25° 49' 09" S (extremidade norte) e 26° 05' 23" S (extremidade sul) e as longitudes 33° 00' 00" E (extremidade Leste) e 32° 26' 15" E (extremidade Oeste). A figura 2, descreve o mapa de localização geográfica da Lixeira Municipal de Hulene.



**Figura 2:** Mapa do enquadramento geográfico da Lixeira Municipal de Hulene. **Fonte:**GTK, Consortium (2006).

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

A lixeira municipal de Hulene é limitada na parte frontal pela Avenida Julius Nyerere, na parte Oeste e laterais está cercada por residências do bairro de Hulene B; a Leste do Aeroporto Internacional de Maputo e no centro-Oeste do distrito Municipal de Kamavota. Localiza-se no distrito de KaMavota e, é limitado a Norte pelo bairro Magoanine A e pela avenida Maria de Lurdes Mutola; a Sul pelo bairro de Hulene A e pela rua da Beira; a Este pelos bairros de Laulane e 3 de Fevereiro e pela Avenida Julius Nyerere; e a Oeste com o Aeroporto Internacional de Maputo.

### **a) Clima do Município de Maputo**

A cidade de Maputo está inserida na zona dos anticiclones subtropicais em conjunto com a depressão de origem térmica que se forma no continente africano no verão. Este conjunto forma as principais forças de acção que condicionam a circulação atmosférica, resultando em duas características bem distintas; o período seco e frio que ocorre de Abril a Setembro com temperaturas mais baixas registadas em Junho e Julho (média 21° C) e precipitação escassa cujos valores mínimos foram registados em Agosto (~12 mm) e o outro quente (média 25° C) e chuvoso que ocorre de Dezembro a Março, com 60% de precipitação anual, com pico em Janeiro (~125 mm). O clima predominante é o subtropical húmido, com temperaturas médias anuais de 25,5 °C e uma média anual de 789,2 mm de precipitação; com ventos predominantes de SE (Bernardo, 2023).

### **3.2. Geologia da área de estudo (lixeira municipal de Hulene)**

A lixeira municipal de Hulene está inserida nas formações geológicas das formações da Ponta Vermelha e de Malhazine, sendo maioritariamente na formação de Malhazine (Munchimbane, 2010). A Leste são delimitados por depósitos de origem marinha, formados durante as transgressões e a Oeste as formações continentais constituídas principalmente por arenitos. Geologicamente, o depósito de rejeitos de Hulene situa-se na bacia sedimentar Mesocenozóica, no sul de Moçambique, numa zona de contacto entre as litologias das formações da Ponta Vermelha e de Malhazine (Bernardo *et al.*, 2022).

A formação da Ponta Vermelha data do Pleistoceno superior ao Pleistoceno inferior e estende-se de Maputo a Marracuene, com orientação NE-SW ao longo de 3 a 4 km. Esta formação é

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

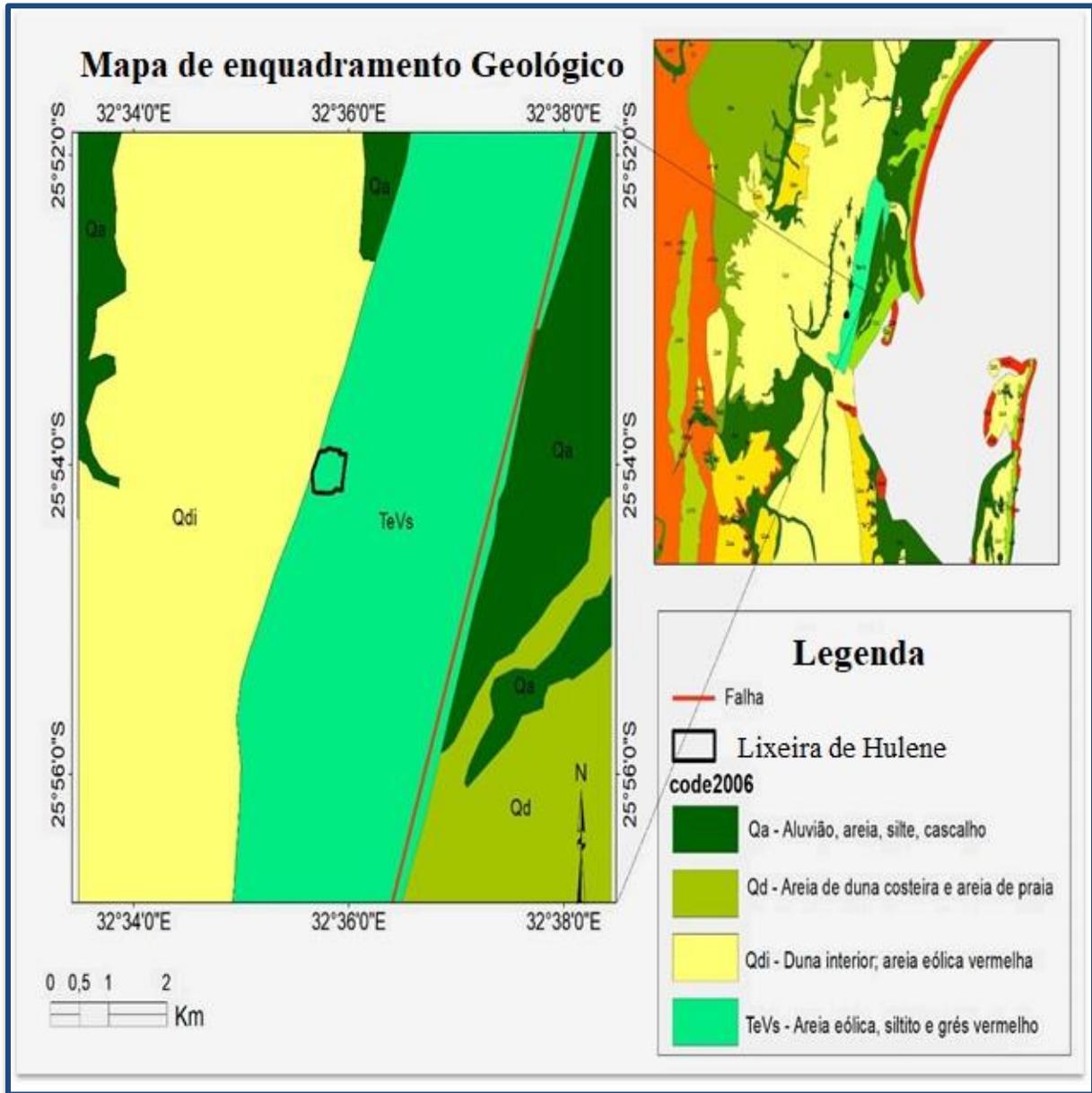
constituída por areias vermelhas passando para amarelas, devido a sua composição química que apresenta altos teores de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e de óxido de alumínio III ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A superfície desta formação apresenta cor vermelha, sendo pouco consolidada e com a ocorrência de areias soltas e ocorrência de um conglomerado na base da unidade.

A análise textural evidencia material bem calibrado. O formato da curva, assimétrica negativa e leptocurtica, indica que os sedimentos foram depositados em ambiente fluvial ou eólico. O facto da unidade assentar sugere que se trata possivelmente de um manto eólico sobre uma plataforma de abrasão marinha (Bernardo, 2023).

Durante a regressão do Pleistoceno Superior ocorreu a formação de um novo campo dunar, representado pela formação de Malhazine. Esta formação é constituída por areias finas e grosseiras, mal consolidadas, com cores claras a avermelhadas, fixadas por vegetação em sucessivos processos de consolidação. Mineralogicamente é constituído por quartzo (98%), com pequenas concentrações de ilmenita, leucoxena, monazite, silimanite, zircão e rutilo.

As transgressões e regressões que continuaram no Holoceno depositaram as areias de dunas costeiras, depósitos de praias (areais brancos) e os aluviões (argilas escuras fluviais com intercalações de níveis de carbonatadas e salíferos). A formação de Malhazine está depositada sobre a formação do Mioceno-Pleistoceno e é composta de arenitos calcários argilosos com *ostrea cullata* na parte superior.

De acordo com Munchimbane (2010), em seus estudos no bairro de Hulene, Laulane e 3 de Fevereiro, a descrição de perfil dos furos destas áreas apresentam um perfil litológico que varia da base ao topo: margas/argila cinzenta – arenitos – areia fina a grosseira. A lixeira municipal de Hulene localiza-se maioritariamente na formação de Malhazine, espalhando-se para Este (formação da Ponta Vermelha). A Figura 3, descreve o mapa geológico da área onde está instalada a lixeira municipal de Hulene.



**Figura 3:** Mapa geológico da área onde se enquadra a Lixeira Municipal de Hulene. **Fonte:**GTK, Consortium (2006).

### 3.3. Geomorfologia da área de estudo (lixeira municipal de Hulene)

De acordo com Munchimbane (2010), o município de Maputo apresenta características geomorfológicas de uma planície costeira que pertence ao sistema dunar da bacia sedimentar sul

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

do Save e apresentam expressões visíveis e são do tipo longitudinal com cristas orientadas para N-NW e depressões intradunares orientadas no mesmo sentido preenchidos por quilômetros de extensões de areia branca e fina.

As dunas são paralelas a formação da ponta vermelha e atingem alturas de até 50 m, sugerindo que foram afectadas por um sistema de ventos semelhantes, e que as intercalações avermelhadas da formação de malhazine poderiam resultar da remoção da formação da ponta vermelha. A lixeira municipal de Hulene localiza-se na depressão intradunar e na encosta dunar Leste. O limite Leste corresponde as cotas altas com altitude variando de 52-54 m, enquanto o limite Oeste as cotas baixas, variando de 34-32 m (Bernado, 2023).

### **3.4. Hidrogeologia do Município de Maputo**

De acordo Bernardo *et al.*, (2022), o Município de Maputo que abarca a lixeira municipal de Hulene, está inserido sobre um sistema hidrogeológico de aquífero sedimentar formado pelos sedimentos Terciário-Quaternário; o aquífero de Grande Maputo. O substrato do aquífero é de marga argilosa a argila cinzenta. Regionalmente, distinguem-se duas unidades aquíferas, respectivamente, o aquífero superior e inferior. O aquífero superior é livre e é formado por dunas interiores constituídas por sedimentos de granulometria diferente desde as areias finas a grosseiras, a pouco argilosas. O aquífero inferior é constituído por arenitos e calcários.

Estes dois tipos de aquíferos estão separados por uma camada semi-impermeável de areias argilosa. Localmente a ausência contínua da camada semi-impermeável, entre as areias finas a grosseiras e os arenitos, interliga a circulação das águas dos dois aquíferos sem descontinuidade. Nos lugares onde as areias grosseiras assentam directamente sobre a camada de argila, desenvolvem condições de semi-confinamento. O nível da água dos poços rasos varia entre 1,5 e 9,3 m de profundidade com uma média de 3,8 m nestes aquíferos (Tamele Jr., 2014).

De acordo com Bernardo (2023), a condutividade hidráulica foi estimada em 1-5 m/d e a recarga média do aquífero na região de Maputo é de 165-185 mm/ano e pode diminuir para 140-150 mm/ano. Os aquíferos superficiais e subterrâneos são recarregados pela precipitação, infiltração de rios, lagos e águas subterrâneas.

## CAPÍTULO IV

### METODOLOGIA E TÉCNICA DE PESQUISA

Neste capítulo, são descritos os métodos, técnicas, normas e procedimentos utilizados durante a amostragem, conservação e análises das propriedades microbianas, físico-químicas, bioquímicas e químicas do lixiviado. São ilustrados os aparelhos utilizados para medir e quantificar os gases, a temperatura e humidade dos 18 tubos ventiladores de gases. Também é descrito o método utilizado na medição do caudal de lixiviado que é recirculado até as bacias colectoras.

#### 4.1. Recolha de informação e amostragem

As informações teóricas sobre a área de estudo, foram obtidas a partir da revisão bibliográfica, realizada em livros, revistas científicas, trabalhos de pesquisa como monografias, tese e dissertações, relacionados ao tema em estudo e, conversas com os funcionários do conselho municipal que estão afectos na lixeira e "catadores de lixo".

A amostragem foi realizada em ambiente natural (trabalho de campo), dentro da lixeira e arredores; por outro lado, as experiências foram realizadas em ambiente laboratorial (parte experimental). Após a amostragem, as amostras foram conservadas e encaminhadas para o laboratório de águas da *Swizlab*, localizada na cidade da Matola, na estrada número 4.

Na pesquisa qualitativa o ambiente é a fonte directa da recolha de dados e o pesquisador é o elemento principal e que define a viabilidade da pesquisa, por outro lado, a pesquisa quantitativa descreve a análise e representação dos dados que depende do seu tratamento estatístico, de modo, a garantir a qualidade e precisão dos resultados (Richardson *et al.*, 2006).

A parte experimental baseia-se essencialmente na amostragem, conservação, análise e caracterização das propriedades microbiológicas, bioquímicas, físico-químicas e químicas do lixiviado. Para a análise e caracterização das propriedades das amostras foram utilizadas normas técnicas como a *Standard methods for the examination of water and wastewater* (SMEWW), a *International Organization for Standardization* (NP EN ISO) e a norma técnica elaborada pelo

# Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

laboratório da *Swisslab* (ML.IT/Swisslab/FQL). A Figura 4, ilustra o fluxograma metodológico geral utilizado na parte experimental do trabalho.

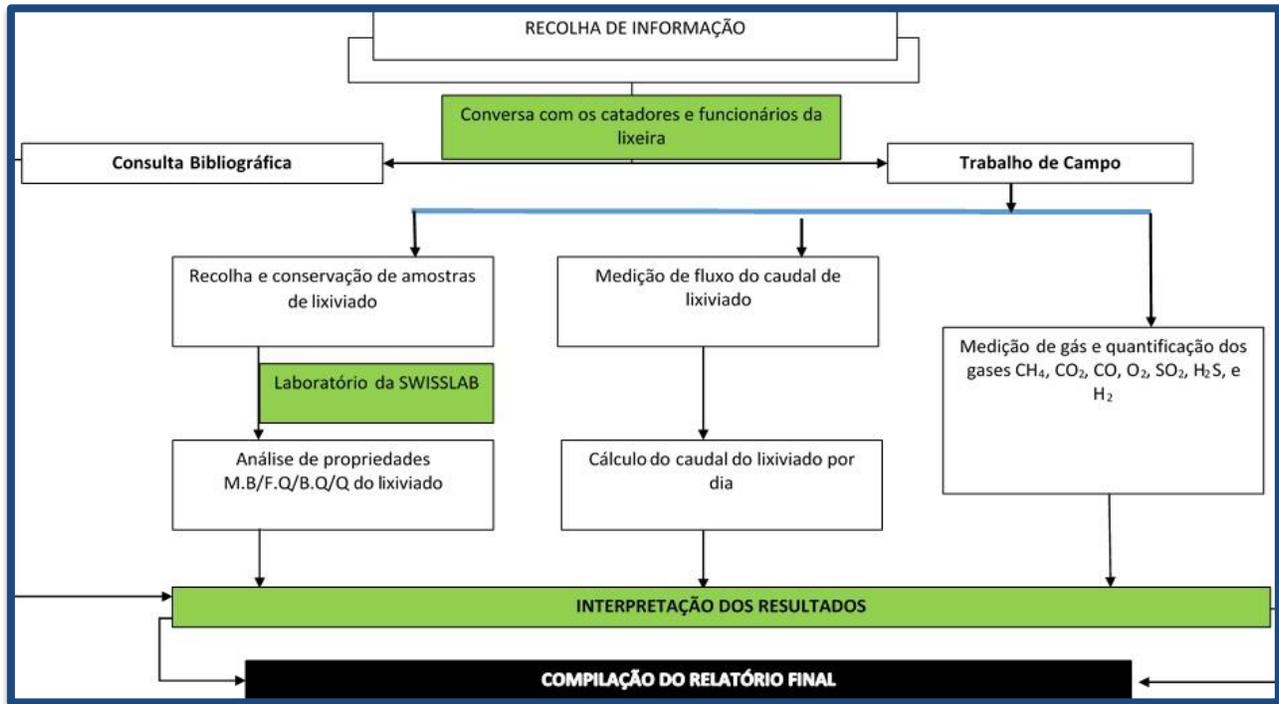


Figura 4: Fluxograma metodológico geral.

## 4.2. Trabalho de campo

O trabalho de campo foi realizado na Lixeira Municipal de Hulene nos dias 29 de Abril e 27 de Maio de 2021. Durante o trabalho de campo foram recolhidas três amostras de lixiviado e, quantificadas as concentrações do biogás e por fim foi medido o caudal de lixiviado recirculado para a bacia colectora.

### a) Escolha de pontos de amostragem e conservação das amostras de lixiviado

A amostragem do lixiviado foi realizada no dia 27 de Maio de 2021 e foram escolhidos amostras de três pontos, respectivamente uma amostra proveniente da bacia colectora de lixiviado recirculado; lixiviado que migra até a região de cotas mais baixas e a terceira amostra representa o lixiviado que está a ser produzido nas camadas de resíduos sólidos urbanos. A escolha do ponto um de amostragem é explicado pelo facto do lixiviado da bacia colectora não sofrer nenhum tipo de tratamento após a sua recirculação ficando acumulado por vários meses sem um

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

destino final adequado. A escolha do ponto de amostragem dois dará indicações de ocorrência de algum tipo de contaminação da água superficial do pântano (zona mais baixa) próximo a lixeira; posteriormente esta amostra dará informações da poluição e contaminação da água subterrânea naquele ponto e, por fim o ponto de amostragem três foi escolhido por estar dentro da lixeira e ao redor das camadas de resíduos sólidos urbanos em biodecomposição. Neste ponto se obteve a amostra de lixiviado fresco, ou seja, que está a ser produzido (parte da lixeira onde o método Fukuoka não abrange).

A amostragem foi realizada, durante o pico da época seca, com pouco índice de precipitação, isto porque, nesta época, a concentração dos componentes microbiológicos e químicos do lixiviado estão mais altos, devido à baixa dissolução do lixiviado pela água da chuva, comparando-se a época chuvosa, que ocorre a dissolução dos seus componentes microbiológicos e químicos pela água da chuva. A Figura 5, ilustra a amostragem do lixiviado na região de cotas mais baixa e descreve a parte Oeste da lixeira onde foi construída a bacia colectora de lixiviado vistas da secção dos 18 tubos ventiladores de gases.



**Figura 5:** Amostragem da amostra P2. 2. Região de cota mais baixa (indicada pela seta) e a bacia colectora de lixiviado.

A Figura 6 abaixo, descreve espacialmente os três pontos de amostragem de lixiviado a partir de uma imagem satélite, da área em estudo, a lixeira municipal de Hulene.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas



**Figura 6:** Mapa ilustrativo dos pontos de amostragem de lixiviado. Fonte: Adaptado em Google Earth.

As três amostras de lixiviados foram conservadas em garrafas plásticas com capacidade líquida de 1.5 litros e codificadas como P1 (lixiviado da bacia colectora), P2 (lixiviado da região de cotas baixas) e P3 (lixiviado fresco); e encaminhadas no mesmo dia ao laboratório de águas da *Swizlab*, para dar início as análises das suas propriedades microbiológicas, bioquímicas, físico-químicas e químicas. A Figura 7, ilustra as garrafas plásticas utilizadas durante o processo de amostragem e conservação das amostras de lixiviado até chegarem ao laboratório.

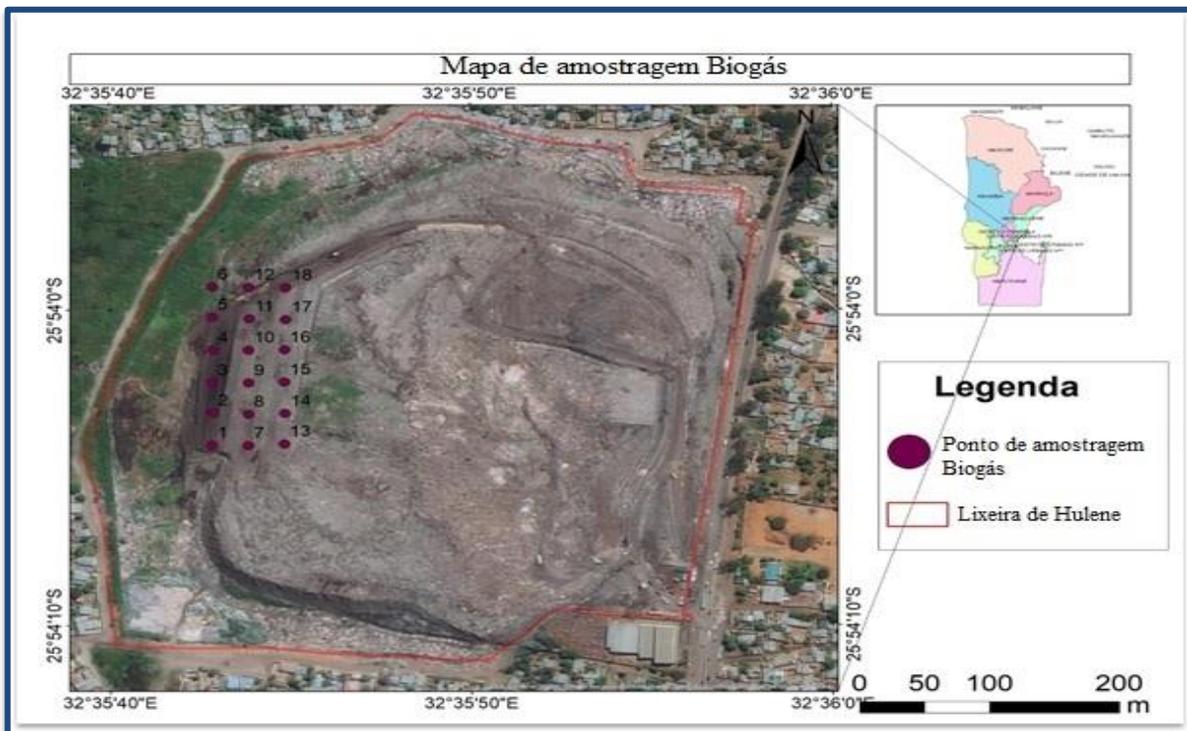


**Figura 7:** Ilustração das garrafas plásticas utilizadas para a amostragem e conservação do lixiviado.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

**b) Técnicas utilizadas na quantificação das concentrações do biogás emitido pela lixeira municipal de Hulene**

Durante o trabalho de campo foram quantificadas as emissões de gases como CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub> que são em geral produzidos pela biodecomposição aeróbica, anaeróbica e semi-aeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos. Estes gases são libertos para a atmosfera a partir dos tubos ventiladores de gases, construídos por baixo das camadas de resíduos sólidos urbanos e, distribuídos em sequências vertical e horizontal, em três camadas distintas e totalizando 18 tubos ventiladores. Em cada camada contêm seis tubos ventiladores de gás, que servem também como fonte de entrada de oxigénio para as camadas de resíduos sólidos urbanos em biodecomposição. A Figura 8 ilustra os 18 pontos de amostragem que foram usados para medir e quantificar os gases.



**Figura 8:** Mapa ilustrativo dos pontos de amostragem de gases a partir dos 18 tubos ventiladores de gases.

**Fonte:** Adaptado em Google Earth

Foram utilizados dois aparelhos para quantificar os gases. O gás metano foi medido com o auxílio dum equipamento detector de gás metano, e os restantes gases por um analisador multigás

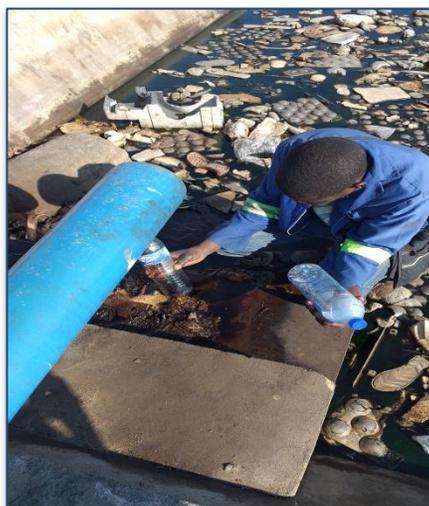
## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

modelo S360. Para medir a temperatura e humidade dos tubos foi utilizado o equipamento WP6930, rating 5V/1<sup>a</sup>, Q/TMY 003-2018, JIG 1022-2016. A Figura 9 mostra os equipamentos utilizados para medir e quantificar os gases, a temperatura e humidade.



**Figura 9:** A-Equipamento utilizado para medição do gás CH<sub>4</sub>; B- Equipamento para medição dos outros gases (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub>); C- Equipamento utilizado na medição da temperatura e humidade.

A medição do caudal de lixiviado por dia foi realizado a partir de uma garrafa plástica com capacidade líquida de 500 ml e, com o auxílio dum cronómetro foi determinado o tempo gasto em segundos que levou para encher a garrafa; por fim foi calculado o caudal de lixiviado na lixeira, para o pico da época seca. A Figura 10 descreve o processo de medição do caudal de lixiviado através do tubo de descarga da bacia colectora.



**Figura 10:** Medição do caudal de lixiviado na bacia colectora.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

O caudal volumétrico é definido como sendo a quantidade em volume que escoar através de certa secção em um intervalo de tempo considerado. As unidades volumétricas mais comuns são: m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/h, l/h e l/min.

Este método também foi utilizado por Regattieri (2003), realizado em um tubo de descarga de lixiviado para uma bacia colectora. Onde utilizou uma garrafa com capacidade de 20 litros e utilizou um cronómetro para medir o tempo de enchimento dessa garrafa. O caudal foi calculado a partir do tempo gasto em segundos que a garrafa levou a encher, demonstrada pela equação 1:

$$Q = \left( \frac{V}{t} \right) \times 3,6 \text{ (m}^3\text{/h)} \quad (1)$$

Onde:

**Q** – é o caudal volumétrico de lixiviado;

**V** – é o volume do recipiente (garrafa com capacidade líquida de 500 ml);

**T** – é o tempo de enchimento da garrafa (segundos).

### 4.3. Parte experimental (realização de experiências pelo laboratório da *Swisslab*)

Esta parte consistiu em analisar as propriedades microbiológicas, bioquímicas, físico-químico e químico das três amostras de lixiviado no laboratório da *Swizlab*. Na tabela 5, estão representados todos os parâmetros analisados neste trabalho e os métodos utilizados em cada procedimento experimental para cada análise realizada nas amostras de lixiviado.

**Tabela 5:** Parâmetros analisados no lixiviado e os métodos utilizados em cada análise.

Parâmetros	Método	Unidade
Coliformes fecais	MI.PE/Swisslab/ML/003	UFC/100 ml
Bactérias coliformes	MI.PE/Swisslab/ML/002	UFC/100 ml
Demanda bioquímica de oxigénio (DBO <sub>5</sub> )	SMEWW 5210B:2012	mg/l
Demanda química de oxigénio (DQO)	SMEWW 5220D:2012	mg/l
Matéria orgânica	NP EN ISO 8467:2001	mg/l
Oxigénio dissolvido	SMEWW 4500-O:2012	mg/l

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

Condutividade eléctrica 25° C	SMEWW 2510B:2012	µS/cm
pH	MI.PE/Swisslab/FQL/007	Sorenson
Alcalinidade total	SMEWW 2320B:2012	mg/l
Sólidos totais dissolvidos	MI.PE/Swisslab/FQL/008	mg/l
Cloretos (Cl <sup>-</sup> )	SMEWW 4500-Cl:2012	mg/l
Sulfetos (S <sup>2-</sup> )	SMEWW 4500-S:2012	mg/l
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	SMEWW 4500-NO <sub>3</sub> B:2012	mg/l
Metais (Mg, Zn, Cd,Pb, Cu e Fe)	SMEWW 3120B:2012	mg/l

**Fonte:** Swisslab (2021) & APHA (2012).

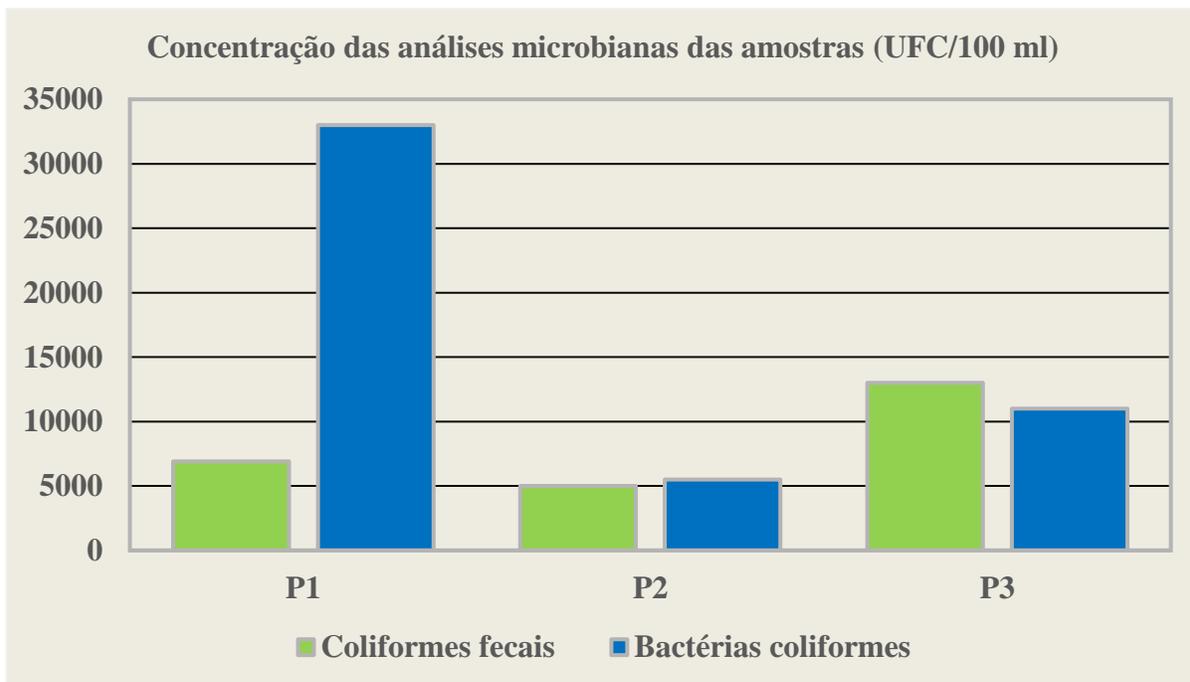
## CAPÍTULO V

### 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises microbiológicas, bioquímicas, físico-químicas e químicas do lixiviado. São também apresentados os resultados das concentrações do biogás emitido, e o cálculo do fluxo de caudal de lixiviado recirculado por dia para a bacia colectora.

#### 5.1. Apresentação dos resultados das análises microbiológicas das amostras de lixiviado

As análises microbiológicas realizadas nas três amostras, foram as bacteriais coliformes e os coliformes fecais. Os resultados obtidos nas análises microbiológicas estão representados no gráfico da Figura 11.



**Figura 11:** Resultados das análises microbiológicas das três amostras de lixiviado.

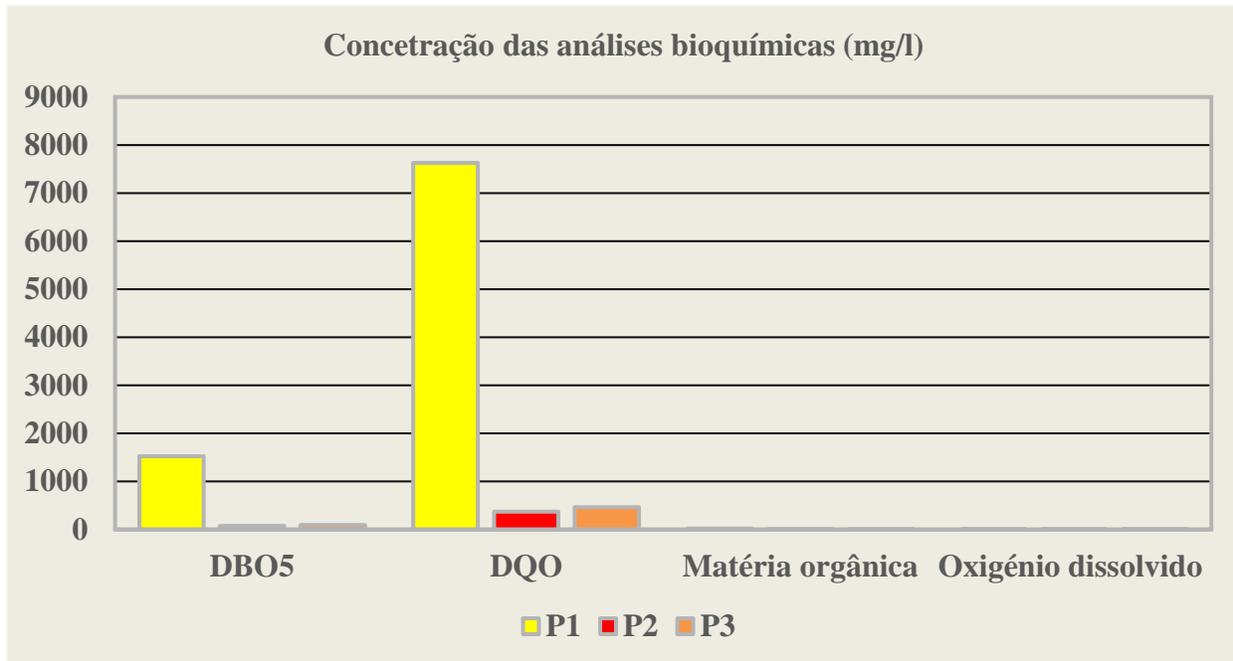
Os resultados das análises microbiológicas mostram pouca concentração de microrganismos patogênicos nas amostras P2 com valores de 5000 UFC/100 ml para coliformes fecais e 5500 UFC/100 ml para bactérias coliformes. Como mostra o gráfico acima, as amostras P1 e P3

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

apresentam alta carga bacteriana com valores de 3300 UFC/100 ml para a P1 e 110000 UFC/100 ml para a P3. A amostra P3 apresenta maior quantidade de coliformes fecais com 13000 UFC/100 ml e a amostra P1 apresenta um valor de 6900 UFC/100 ml coliformes fecais.

### 5.2. Apresentação dos resultados das análises bioquímicas das amostras de lixiviado

As análises bioquímicas que foram realizadas nas três amostras são: demanda bioquímica de oxigênio ( $DBO_5$ ), demanda química de oxigênio (DQO), matéria orgânica (oxidabilidade) e oxigênio dissolvido. O gráfico representado pela Figura 12, apresenta os resultados obtidos das análises bioquímicas das três amostras de lixiviado.



**Figura 12:** Resultados das análises bioquímicas das três amostras de lixiviado.

De acordo com o gráfico representado acima, a amostra P1 apresenta altas concentrações de  $DBO_5$  com valor de 1525 mg/l, DQO com valores de 7625 mg/l, matéria orgânica em torno de 19,84 mg/l e oxigênio dissolvido com 5,40 mg/l. nota-se que a concentração de DQO é maior que a concentração de  $DBO_5$ , não só na amostra P1 como para as amostras P2 e P3. As amostras P2 e P3 apresentam valores de 75 e 93 mg/l  $DBO_5$  e valores de 374 e 463 mg/l de DQO. Os resultados da matéria orgânica e do oxigênio dissolvido para as amostras P2 e P3 são 7,04 e 3,84 mg/l e 2,2 e 2,6 mg/l. As três amostras apresentam baixas concentrações da matéria orgânica

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

assim como o oxigênio dissolvido não superior a 20 mg/l para a matéria orgânica e não superior a 6 mg/l para o oxigênio dissolvido mostrando uma diferença na composição orgânica do lixiviado após a sua formação.

### Relação DBO<sub>5</sub>/DQO (biodegradabilidade)

$$P1 = \frac{1525}{7625} = 0,2000$$

$$P2 = \frac{75}{374} = 0,2005$$

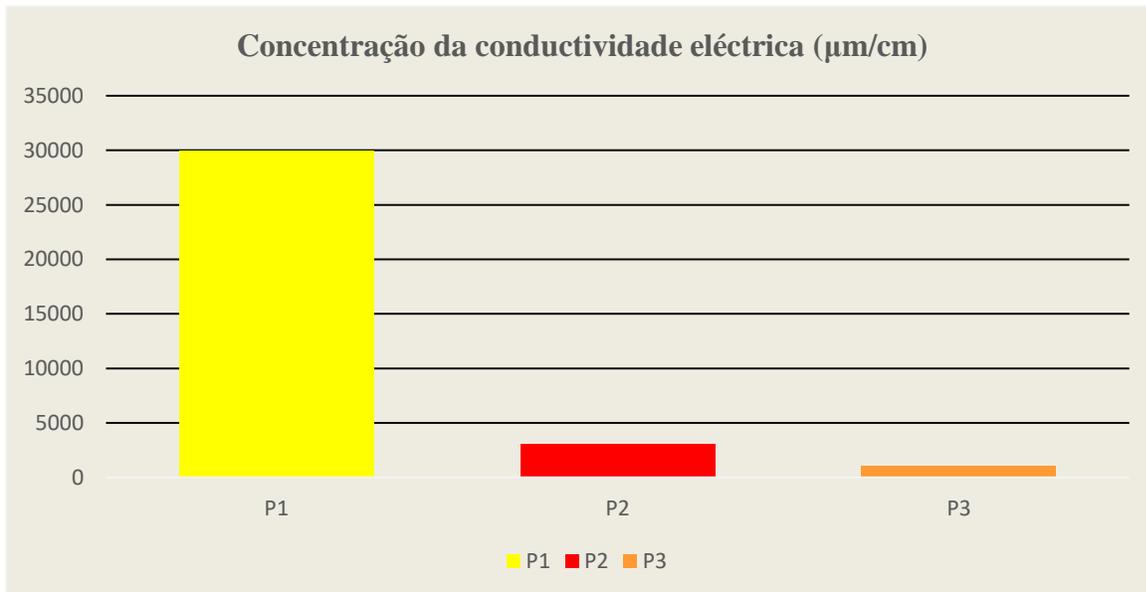
$$P3 = \frac{93}{463} = 0,2008$$

### 5.3. Apresentação dos resultados das análises físico-químicas das amostras de lixiviado

As análises físico-químicas que foram possíveis de realizar são: condutividade elétrica (25°C), pH (25°C), alcalinidade total, sólidos totais dissolvidos, cloretos (Cl<sup>-</sup>), sulfetos (S<sup>2-</sup>) e nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). A condutividade elétrica e o pH (25°C) são expressos em unidades diferentes dos demais parâmetros que fazem parte das propriedades físico-químicas e por essa razão os seus resultados estão apresentados em gráficos diferentes dos demais parâmetros.

#### a) Condutividade elétrica (25 °C)

O gráfico da Figura 13, mostra o resultado obtido na análise da condutividade elétrica das três amostras de lixiviado.



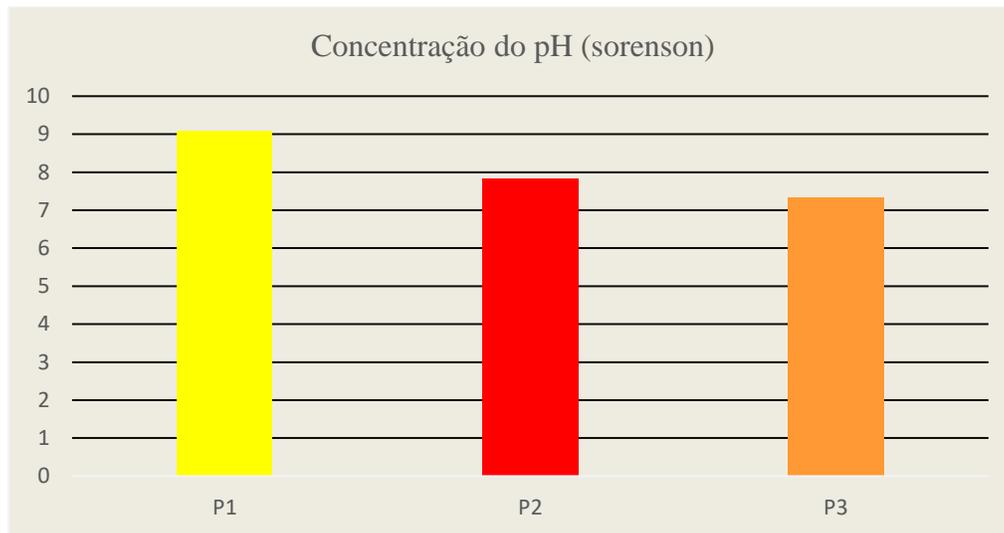
**Figura 13:** Gráfico dos resultados da análise de condutividade elétrica (25°C) das três amostras de lixiviado.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

Observa-se alta concentração de condutividade eléctrica para a amostra P1 com valores de 30000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e as amostras P2 e P3 apresentam concentrações de 3060 e 1015  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente. A amostra P3 apresenta condutividade eléctrica muito baixa.

### b) pH (25 °C)

O gráfico representado pela figura 14 apresenta a variação do pH obtido nas análises das três amostras de lixiviado.



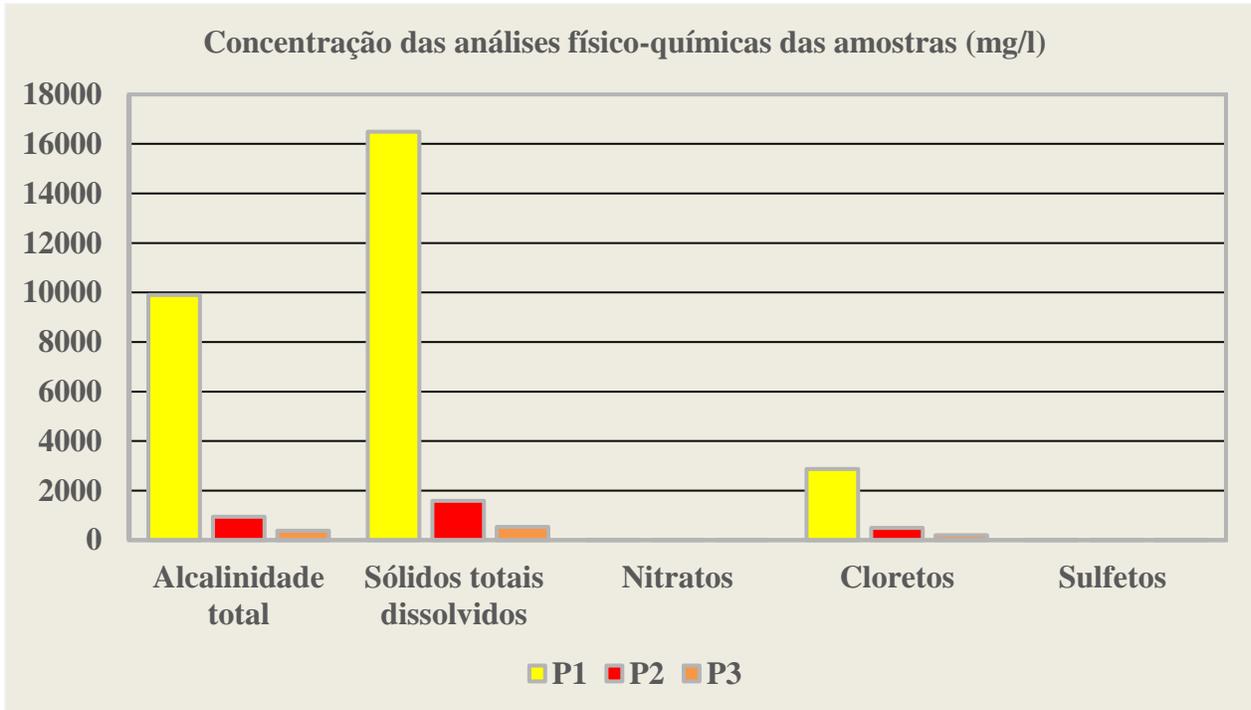
**Figura 13:** Gráfico dos resultados da análise de pH (25°C) das três amostras de lixiviado.

Os resultados descritos pelo gráfico da figura 14 mostram que os valores de pH não oscilam muito nas três amostras. A amostra P3 apresenta valor de pH neutro com 7,33 Sorensen e a amostra P2 está mais próximo da faixa do básico com 7,82 Sorensen; a amostra P1 tem um pH fortemente básico com valores altos de 9,03 Sorensen.

### c) Outras análises físico-químicas

A alcalinidade, os nitratos e os sulfetos são em geral a carga inorgânica poluidora do lixiviado juntamente com outras substâncias químicas como o nitrogénio amoniacal, os sulfatos, os fenóis, os metais pesados, etc. A Figura 15, mostra o gráfico com as variações das análises físico-químicas das três amostras de lixiviado em estudo, referente a alcalinidade total, sólidos totais dissolvidos, cloretos, sulfetos e nitratos.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas



**Figura 14:** Resultados da análise das propriedades físico-químicos das três amostras de lixiviado.

O valor de alcalinidade total mais alto foi observado na amostra P1 com valor de 9900 mg/l; as amostras P2 e P3 têm uma alcalinidade total de 944,46 e 376,20 mg/l. A amostra P1 apresenta alto valor de sólidos totais dissolvidos com uma concentração de 16500 mg/l e as amostras P2 e P3 apresentam concentrações entre 1590 e 533 mg/l. O valor mais alto obtido para cloretos foi observado na amostra P1 com 2870 mg/l e as amostras P2 e P3 apresentam concentrações baixas com 494,8 e 197,9 mg/l.

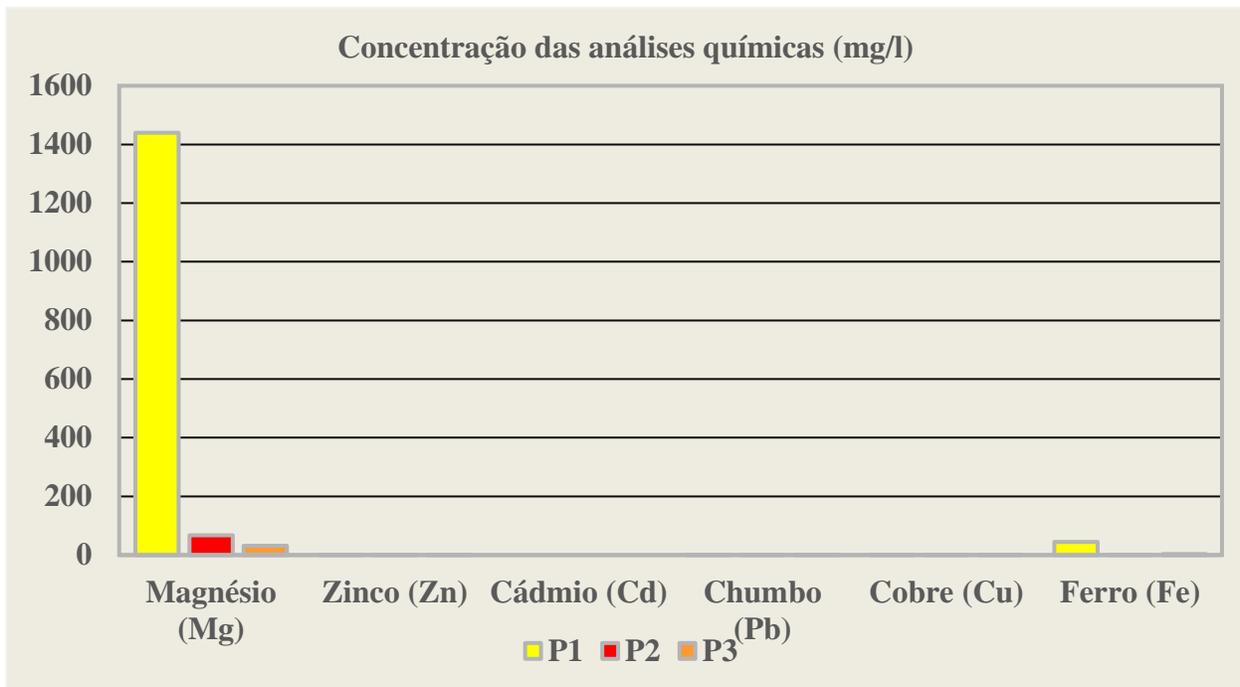
Para os sulfetos observou-se alta concentração na amostra P3 com valores de 5,6 mg/l e as amostras P1 e P2 apresentam respectivamente 0,8 e 1,2 mg/l, observa-se que a amostra P3 é rica em sulfetos, diferente dos outros parâmetros físico-químicos que apresenta baixas concentrações em relação a amostra P1 e P2; a sua quantidade ultrapassa os 5 mg/l e a amostra P1 apresenta baixa concentração que não ultrapassa o 1 mg/l. Por último a amostra P1 apresenta alta concentração de nitratos com 0,09 mg/l e as amostras P2 e P3 concentrações de 0,05 e 0,04 mg/l. A concentração de nitratos não apresenta muita variação e são inferiores a 1 mg/l.

#### 5.4. Apresentação dos resultados das análises químicas do lixiviado

As análises químicas realizadas nas três amostras de lixiviado foi a determinação de metais. Nos metais alcalinos terrosos analisou-se a concentração de magnésio (Mg) e nos metais pesados as concentrações de zinco (Zn), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu) e ferro (Fe).

##### a) Metais alcalino-terrosos e pesados

O gráfico representado pela Figura 16, mostra a variação das concentrações dos metais nas três amostras de lixiviado.



**Figura 15:** Resultados da análise das propriedades químicas das três amostras de lixiviado.

De acordo com o gráfico acima, os valores mais altos obtidos foram para a amostra P1 para os metais Mg e Fe. A amostra P1 apresenta uma concentração de 1440 mg/l para Mg e as amostras P2 e P3 apresentam baixas concentrações inferiores a 100 mg/l, em torno de 67,9 e 31,26 mg/l, respectivamente para o Fe a amostra P1 apresenta uma concentração de 44,740 mg/l e, as amostras P2 e P3 apresentam concentrações de 1,099 e 3,363 mg/l. Não foi observada nenhuma concentração considerável para o metal Cd nas três amostras, sendo que o valor obtido foi inferior a 1 mg/l (<0.001/LQ).

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

Os resultados das três amostras para o metal Zn, mostra que a amostra P1 apresenta alto valor com uma concentração de 1,019 mg/l superior a 1 mg/l e as amostras P2 e P3 apresentam concentrações inferiores a 1 mg/l entre 0,416 e 0,259 mg/l. Para os metais Pb e Cu foram observados valores inferiores a 1 mg/l nas três amostras. As concentrações de Pb são 0,218, 0,121 e 0,102 mg/l respectivamente para as amostras P1, P2 e P3; e para as concentrações de Cu apresentam as amostras P1, P2 e P3 valores de 0,434, 0,141 e 0,112 mg/l.

### 5.5. Quantificação do biogás emitido na lixeira municipal de Hulene

Foram medidas a temperatura e a humidade nos 18 tubos ventiladores de gases e a concentração dos componentes do biogás respectivamente os gases como o metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), oxigénio (O<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrogénio (NO<sub>2</sub>), sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) e hidrogénio (H<sub>2</sub>); emitido para a atmosfera através dos tubos ventiladores de gases na lixeira municipal de Hulene.

#### a) Apresentação dos resultados da temperatura nos tubos ventiladores de gases

A variação de temperatura observada nos tubos ventiladores de gases está representada pelo gráfico descrito na Figura 17.

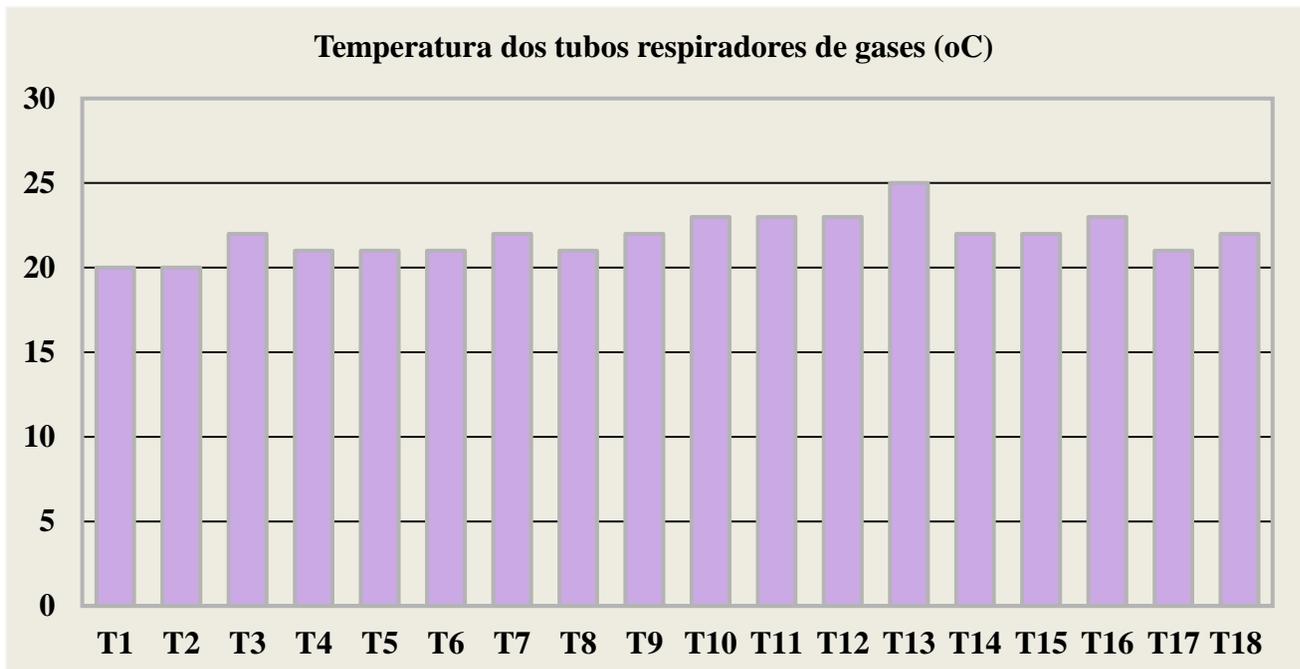


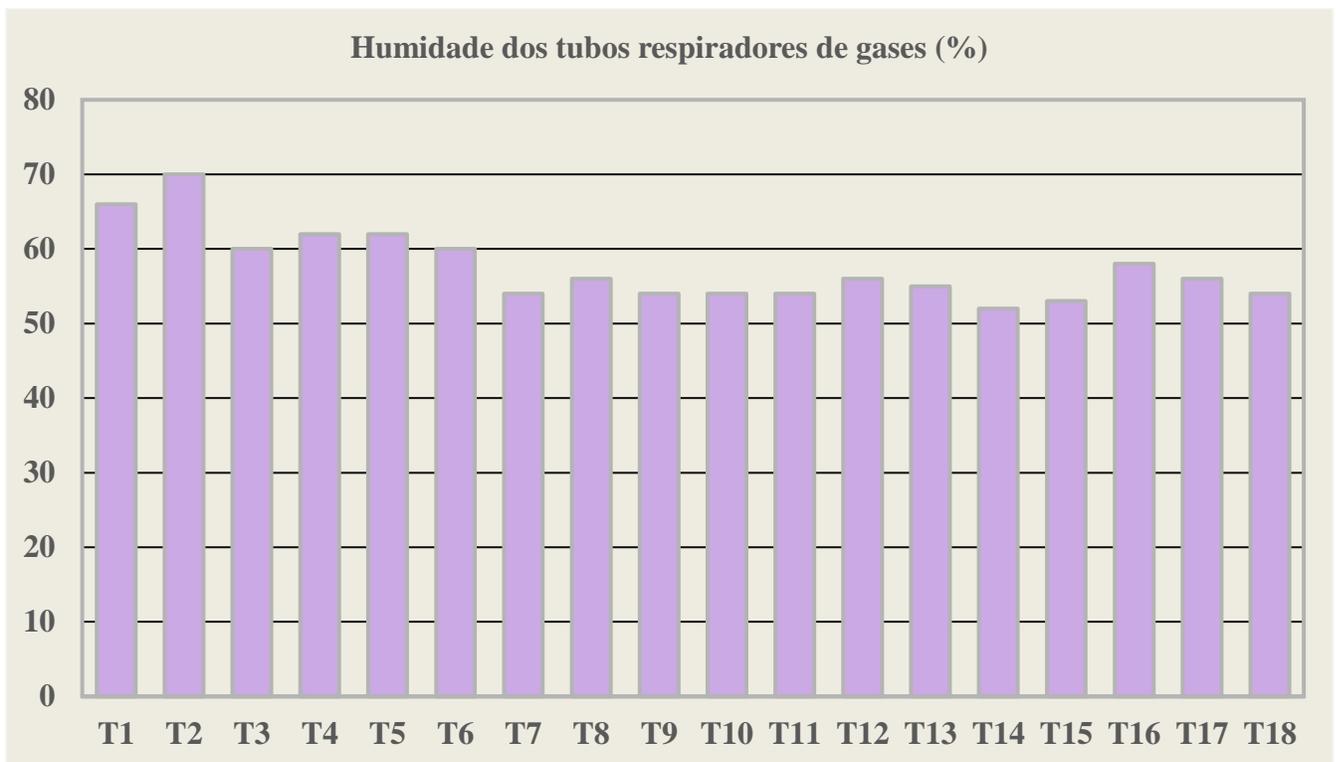
Figura 16: Variação da temperatura nos tubos ventiladores de gases.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

O gráfico mostra uma variação de temperatura na faixa de 20 °C a 25 °C. A temperatura mais alta foi observada no tubo ventilador número 13 com uma temperatura de 25 °C e localiza-se na segunda sequência de camadas de resíduo sólido urbano e as temperaturas mais baixas foram observadas nos tubos ventiladores 1 e 2 com temperatura de 20 °C. A média da temperatura nos tubos ventiladores de gases está em torno do 21,8 °C.

### b) Apresentação dos resultados de humidade nos tubos ventiladores de gases

A Figura 18 apresenta o gráfico da variação da humidade nos tubos ventiladores de gases.



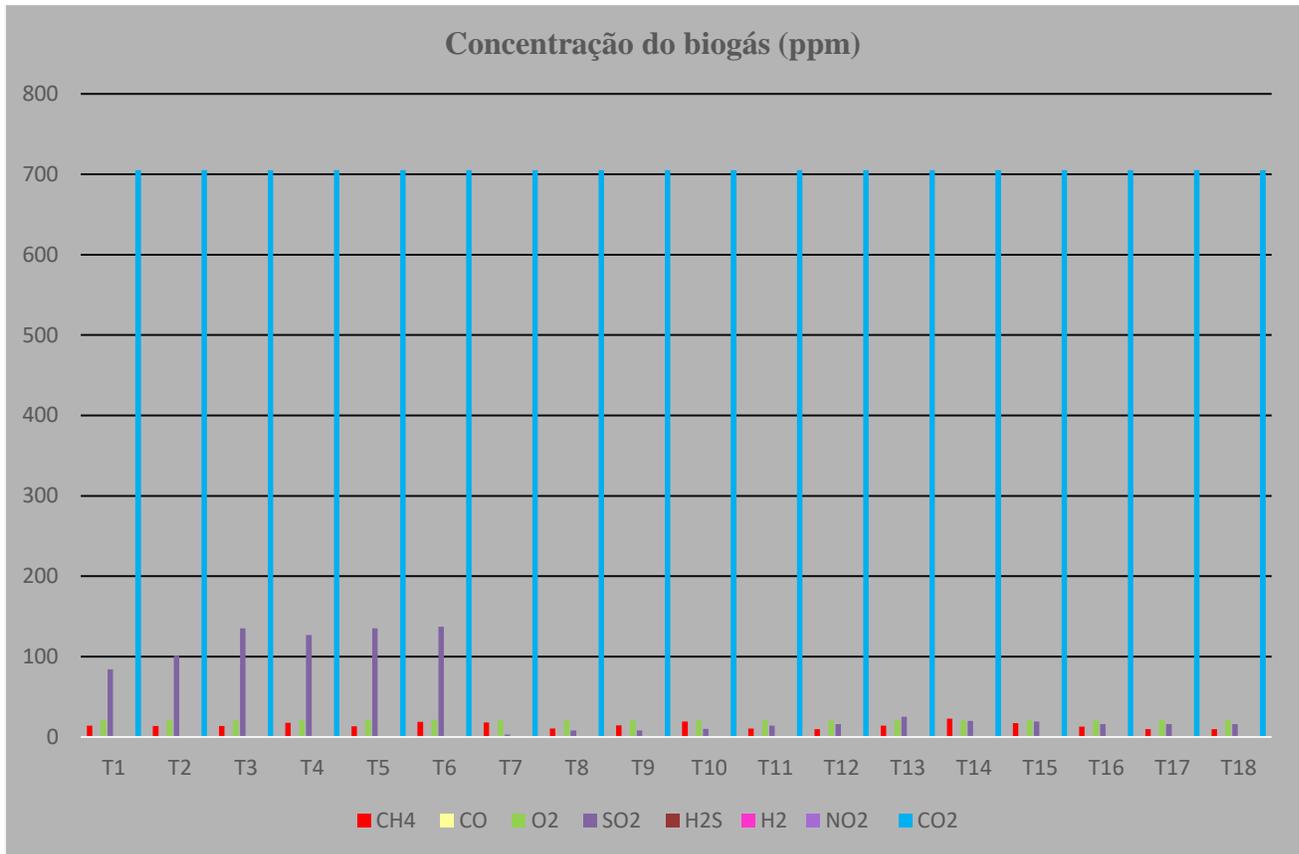
**Figura 17:** Variação da humidade nos tubos ventiladores de gases.

A humidade varia entre a faixa de 50% a 70%. O tubo ventilador número 2 apresenta o valor mais alto de humidade com valor de 70% de humidade e o tubo ventilador número 14 apresenta o teor mais baixo de humidade com valor de 52%; a média da humidade nos tubos ventiladores de gases é de 57,5%.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

c) Apresentação dos resultados da emissão de gases nos tubos ventiladores

O gráfico representado pela Figura 19, descreve a concentração em ppm dos gases que são emitidos para a atmosfera pela lixeira municipal de Hulene que são CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub>.



**Figura 18:** Quantificação dos gases emitidos pela lixeira municipal de Hulene.

O gráfico representado na Figura 19, mostra uma concentração constante e alta de dióxido de carbono comparando aos demais gases; a concentração deste gás emitido é de 705 ppm para todos os tubos ventiladores. As concentrações do gás metano são muito baixas comparando as concentrações de dióxido de carbono e, variam entre os valores de 9,69 e 22,67 ppm. Os tubos 12, 17 e 18 apresentam as concentrações mais baixas da emissão do gás metano e o tubo 14 apresenta a maior emissão do gás metano com uma concentração de 22,67 ppm. Esta emissão não é constante e, varia sem nenhum tipo de padrão (sem seguir as sequências de camadas de

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

resíduos sólidos urbanos). Este resultado mostra que a lixeira municipal de Hulene está a emitir muito dióxido de carbono e pouco metano.

O dióxido de enxofre é o gás que apresenta concentrações elevadas depois do dióxido de carbono. Observando-se que os primeiros tubos têm as maiores concentrações deste gás que variam entre os valores de 137 ppm e 84 ppm. Do tubo 7 ao 12, as concentrações deste gás baixam para 3 a 16 ppm e, do tubo 16 até o 18 a concentração varia de 16 a 25 ppm; a variação da emissão do gás dióxido de enxofre segue a sequência das camadas de resíduos sólidos urbanos.

No que se refere a emissão do monóxido de carbono observa-se a existência de concentrações traços nos tubos 4 a 6 com 13 ppm e do tubo 7 a 9 este valor baixa para 1 ppm; nos restantes tubos não foram observadas a emissões deste gás. A introdução do oxigénio é constante nos 18 tubos com uma concentração constante no valor de 20,9 ppm. Não se observou nenhum tipo de concentração ou emissão dos gases como o sulfeto de hidrogénio, hidrogénio e nitritos.

### 5.6. Apresentação do cálculo do fluxo caudal diário de lixiviado

A Tabela 6 Apresenta o resultado obtido do fluxo caudal de lixiviado diário que é recirculado para a bacia colectora.

**Tabela 6:** Resultado do cálculo do caudal de lixiviado diário recirculado para a bacia colectora.

Ensaio	Tempo (s)	Capacidade da garrafa (ml)	Fluxo do caudal de lixiviado			
			l/s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /d
1	103	500	0,0048	0.0000048	0.01728	0,4147
2	198	500	0,0025	0.0000025	0.009	0.216
3	242	500	0,0020	0.0000020	0.0072	0.1728
Média	181	-	0,031	0.0000031	0.1116	2.678

O resultado do cálculo do fluxo caudal de lixiviado foi de 0,116 m<sup>3</sup>/h de lixiviado recirculado até as bacias colectoras, o equivale a 2,678 m<sup>3</sup> por dia de lixiviado recirculado no pico da época seca.

## **CAPÍTULO VI**

### **6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são interpretados e discutidos os resultados apresentados no capítulo anterior sobre as análises microbiológicas, físico-químicas, bioquímicas e químicas das amostras de lixiviado. Apresenta uma relação dos resultados obtidos das análises realizadas no lixiviado com os resultados da concentração química do biogás emitido na lixeira municipal de Hulene. Por último será discutida a relação que existe entre o método Fukuoka e a proteção que gera sobre as águas subterrâneas que ocorrem na região da lixeira, nos bairros de Hulene B e Laulane através do cálculo diário do fluxo do caudal de lixiviado que é recirculado para a bacia colectora.

#### **6.1. Interpretação e discussão dos resultados das análises microbiológicas das amostras de lixiviado**

##### **a) Bactérias coliformes e coliformes fecais**

Valores elevados de bactérias coliformes e coliformes fecais como o da amostra P3, estão relacionados a composição dos resíduos sólidos orgânicos que contém produtos de higiene pessoal como fraldas, papéis de higiene, etc. A amostra P1 que representa o lixiviado da bacia colectora, além da contaminação directa pelo lixo higiénico, sofre também a contaminação indirecta por fezes de animais que pastam na lixeira.

Segundo Umar *et al.* (2011), em seus estudos sobre aterros sanitários semi-aeróbicos também encontrou valores altos de bacterias coliformes e coliformes fecais, semelhantes ao deste estudo e, relacionou-os a pouca eficiência do método Fukuoka na eliminação ou redução destas bactérias.

#### **6.2. Interpretação e discussão dos resultados das análises microbiológicas das amostras de lixiviado**

##### **a) Demanda bioquímica do oxigénio (DBO<sub>5</sub>) e demanda química do oxigénio (DQO)**

De acordo com Peixoto (2018), a DBO<sub>5</sub> diminui mais rápido em relação a DQO no lixiviado por causa da matéria orgânica que é de difícil biodegradação, por esta razão observa-se que a DQO é maior que a DBO<sub>5</sub> nas três amostras em estudo. A alta concentração de DBO<sub>5</sub> e DQO que se

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

observa para a amostra P1 pode estar relacionado a adição de resíduos sólidos urbanos que contêm muita matéria orgânica e; a introdução de matéria orgânica dentro da bacia colectora. Valores elevados de  $DBO_5$  são geralmente causados pelo lançamento de cargas orgânicas recentes, principalmente de esgotos, como é observado na lixeira municipal de Hulene (Dinis, 2008).

As amostras P2 e P3 apresentam baixa concentração de  $DBO_5$  e DQO. Resultados semelhantes aos deste estudo em aterros semi-aeróbicos, indicam que o método de recirculação de lixiviado favorece também a redução de substâncias orgânicas (Kin *et al.* 2014). Os compostos orgânicos que podem contribuir para o aumento da DQO são o  $Fe^{2+}$ , o  $Mn^{2+}$ , os sulfetos e os cloretos. As figuras 15 e 16, mostram que estes parâmetros estão em maior concentração no lixiviado das três amostras, favorecendo assim, a elevação da concentração de DQO (Ziyang *et al.*, 2009).

### **Relação $DBO_5$ / DQO (biodegradabilidade):**

As três amostras de lixiviado apresentam uma relação  $DBO_5$ /DQO de 0,2. Este resultado indica que estes efluentes são provenientes de um aterro sanitário antigo, sendo de difícil biodegradação, isto porque aterros sanitários novos apresentam valores acima de 0,5 da relação  $DBO_5$ /DQO (Junqueira, 2000).

De acordo com Kin *et al.* (2014), aterro semi-aeróbicos apresentam uma relação  $DBO_5$ /DQO baixa, porque contêm tipicamente ácidos húmicos e fúlvicos, os quais são pouco biodegradáveis e dão origem a cor escura do lixiviado (Castilho Jr., 2010).

Segundo Aziz & Hosseini (2012), lixiviados de um sistema semi-aeróbico tem contaminantes orgânicos ligeiramente inferiores quando comparados aos aterros anaeróbicos, referente a  $DBO_5$  e DQO e, estes contaminantes num sistema semi-aeróbico são mais fáceis de gerir. por esta razão observa-se concentrações de  $DBO_5$  e DQO menores comparando-se a aterros sanitários antigos e anaeróbicos que apresentam resultados muito elevados ultrapassando valores de 30000 mg/l para a  $DBO_5$  e valores de 70000 mg/l para a DQO.

**b) Matéria orgânica (oxidabilidade)**

As três amostras apresentam baixas concentrações de matéria orgânica isto porque os ácidos graxos voláteis são consumidos provocando a elevação do pH e a redução da DBO<sub>5</sub> (Adhikari & Khanal, 2015). A percentagem da matéria orgânica no lixiviado decresce quanto maior for o tempo de deposição no aterro sanitário, assim sendo, resultados como os encontrados neste trabalho são comuns para aterros velhos com biodecomposição da matéria orgânica avançada e estabilizada, como é o caso da lixeira municipal de Hulene que opera a mais de 40 anos. As taxas de decaimento da matéria orgânica ao longo do período de operação do aterro sanitário refletem a estabilização da matéria orgânica (Carvalho, 2005).

**c) Oxigénio dissolvido**

As três amostras de lixiviado apresentam alta concentração de oxigénio dissolvido, comparando aos resultados observados em outros aterros sanitários do tipo semi-aeróbicos. A amostra P1 apresenta uma concentração elevada de oxigénio dissolvido no lixiviado, o que não é esperado em aterro sanitário maduro ou velhos; isto porque em outros estudos este parâmetro varia na faixa de 0,09 a 3 mg/l. Os resultados encontrados neste estudo podem estar relacionados a composição e as características do lixiviado que dependem estreitamente de vários factores, como o tipo de resíduo, clima, conteúdo da matéria orgânica, estrutura hidrogeológica do aterro e condições operações diferentes das regiões onde estão instalados os aterros sanitários (Kin & Aziz, 2014).

De acordo com Matos (2008), existe maior consumo de oxigénio em amostras que ocorrem a redução de carbono orgânico total (TOC). Este resultado também pode ser validado pela redução do gás metano e aumento do gás carbónico que ocorre na lixeira municipal de Hulene. As amostras P2 e P3 registaram valores dentro da faixa anteriormente referida. Os níveis de oxigénio dissolvidos em águas residuais depende também das actividade físicas, químicas e bioquímicas (Siti & Aziz 2018).

### **6.3. Interpretação e discussão dos resultados das análises físico-químicas das amostras de lixiviado**

#### **a) Condutividade eléctrica (25 °C)**

As três amostras apresentam uma condutividade eléctrica superior a 100 µS indicando que o ambiente onde o lixiviado foi formado é muito compactado e, pelo facto da lixeira municipal de Hulene estar a operar a quatro décadas as camadas de resíduos sólidos urbanos estão muito compactadas explicando os resultados obtidos (Benda, 2008).

A alta concentração da condutividade eléctrica da amostra P1 deve-se pela existência de materiais inorgânicos dissolvidos no lixiviado, tais como sais, cloretos, metais e o sulfato que não foi convertido. Este resultado não é comum para lixiviado de aterros sanitários antigos, mas o longo período de deposição de lixiviado na bacia colectora provoca a sua contaminação indirecta e consequentemente o aumento da condutividade eléctrica (Hussain & Al-Ameen, 2019). A alta condutividade eléctrica da amostra P1 também pode ser explicada pela existência de condições gradualmente oxidativas que resulta na dissolução parcial dos precipitados e consequentemente, leva a um aumento da condutividade eléctrica após a sua redução (Lee *et al.*, 2023).

As amostras P2 e P3 apresentam baixos teores de condutividade eléctrica; em geral a amostra P3 devia apresentar uma concentração intermediária de condutividade eléctrica devido a mistura de lixiviado novo e antigo. A baixa concentração de condutividade eléctrica é causada pela lavagem a partir da recirculação do lixiviado de alguns iões, metais, cloretos e sulfato facilmente mobilizáveis, combinado com outros factores como a conversão de sulfato em sulfeto sob condições redutoras (Lee *et al.*, 2023).

#### **b) pH (25 °C)**

A amostra P1 apresenta um pH fortemente alcalino comum em lixiviados de aterros sanitários com mais de 10 anos de operação que tendem a ter um pH elevado acima de 8 sorenson porque a matéria orgânica está num estágio avançado de biodecomposição e se encontra na fase metanogênica, onde os ácidos predominantes são voláteis.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

Segundo Lôbo (2006), resultados semelhantes a este estudo estão relacionados ao alto valor de pH devido ao acúmulo de lixiviado na bacia colectora, como é o caso da lixeira municipal de Hulene. pH na faixa de 8 ou superior a 8 sorenson são influenciados pela presença de carbonatos e bicarbonatos (Benda, 2008).

A amostra P2 apresenta um pH levemente alcalino. Estes valores são típicos de lixiviados de aterros novos. Foram encontrados pH na faixa de 7,4 Sorenson para lixiviados de aterros que estão na fase metanogênica estável como é o caso da amostra P3, que é uma mistura de lixiviado antigo com lixiviado novo, devido a biodecomposição diária dos resíduos sólidos urbanos descartados de forma contínua na lixeira (Ferreira, 2010).

### 6.3.1. Outras análises físico-químicas

#### a) Alcalinidade total

O valor obtido para as três amostras é comum para o lixiviado num estágio avançado de biodecomposição e para a época seca. A elevada concentração da alcalinidade total na amostra P1 pode estar relacionada a maior concentração de bicarbonato de amônio e ao elevado pH do lixiviado. Elevadas concentrações de alcalinidade estão relacionadas a elevada concentração de N-amoniacal que se mistura com o hidrogénio do ácido carbónico e forma amoníaco e depois o bicarbonato (Ferreira, 2010).

As amostras P2 e P3 que apresentam baixas concentrações de alcalinidade total está relacionado a sua contínua mistura com lixiviado novo. Valores baixos de condutividade eléctrica em aterros sanitários semi-aeróbicos estão relacionados a fraca alcalinidade ao fim da fase da acidificação e início da fase metanogênica (Hoi *et al.*, 2021).

#### b) Sólidos totais dissolvidos

A amostra P1 apresenta alta concentração de sólidos totais dissolvidos que podem refletir a carga total de poluentes como consequência da biodegradação da matéria orgânica. A concentração máxima de sólidos dissolvidos totais é de 9257 mg/l e, para aterros sanitários jovens esta faixa varia entre 2500-14000 mg/l e; a amostra P1 ultrapassa este valor (Siti & Aziz, 2018).

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

Segundo Kin & Aziz (2014), resultados elevados de sólidos totais dissolvidos são comuns em lixiviados de aterros novos como é o caso da amostra P1. As amostras P2 e P3 apresentam baixa concentração de sólidos totais dissolvidos, sendo que a amostra P3 apresenta baixa concentração, menor que a mínima de 1800 mg/l descrita por (Siti & Aziz, 2018).

De acordo com Bilgili *et al.* (2006), a concentração de sólidos totais dissolvidos deve diminuir à medida que o lixiviado passa de acidogênico para metanogênico. Aterros antigos como o caso da lixeira municipal de Hulene tendem a ter valores baixos da concentração de sólidos totais dissolvidos, o que não se observa na lixeira, porém pode ser por causa da elevada carga orgânica que estes lixiviados têm (Pires, 2011).

### c) Cloretos (Cl<sup>-</sup>)

A amostra P1 apresenta alta concentração de cloretos, este resultado é causado pelo aumento do pH que favorece a diluição de cloretos no lixiviado e conseqüentemente promove o aumento da sua concentração no lixiviado (Bilgili *et al.*, 2006).

De acordo com Gomes (2007), valores que variam na faixa de 2000 a 6500 mg/l de cloretos são encontrados em lixiviado com alta solubilidade. Resultados semelhantes ao da amostra P2 também foram encontrados em aterros sanitários semi-aeróbicos (Hussein & Al-Ameen, 2019).

### d) Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

A concentração nitrato nas três amostras é baixa, menores que 1 mg/l. Resultados típicos de nitratos variam na faixa entre 5-10 mg/l e, foram registados em aterros semi-aeróbicos novos com menos de 2 anos, entretanto, os resultados obtidos neste estudo ainda não foram observados em nenhum outro estudo, porque em aterros sanitários do tipo semi-aeróbicos o lixiviado é rico em nitratos, diferente dos resultados obtidos que mostra um lixiviado pobre em nitrato (Aziz *et al.*, 2010). Tais resultados podem ser explicados pelo pH alcalino, não ideal para o processo de nitrificação, visto que o pH ideal para o processo de nitrificação é de 6,6 Sorenson, que pode influenciar na quantidade de nitrato no lixiviado (Aghamhamadi *et al.*, 2007).

**e) Sulfetos ( $S^{2-}$ )**

O lixiviado das amostras P1 e P2 apresentam baixas concentrações de íons sulfeto indicando maior concentração de sulfato dissolvido no lixiviado. Baixos valores de íons sulfeto não são comuns em aterros sanitários semi-aeróbicos, porque a entrada de oxigênio (ar) nas camadas de resíduo sólido urbano facilitam a redução de sulfato a sulfeto. Mas estes valores baixos da concentração de sulfeto podem estar relacionados a existência de microorganismos chamados de *Desulfovibrio Propionicus* que são capazes de crescer na presença de oxigênio e oxidar o sulfeto e enxofre elementar para sulfato ou tiosulfato; por outro lado, esta redução do sulfeto e aumento do sulfato pode estar relacionado a hidrólise (Long *et al.*, 2016).

A amostra P3 que apresenta altas concentrações de sulfetos o resultado obtido é explicado pela mistura de lixiviado antigo e velho sendo que o lixiviado novo é rico em sulfatos que sofre redução para sulfeto e esta redução está relacionada a transformação biológica e não a lavagem do lixiviado.

A toxicidade do sulfeto depende do pH do sistema, porque faixas de 6-8 de pH, o sulfeto existe como uma mistura de HS e  $H_2S$ ; e o sulfeto de hidrogênio não dissociado ( $H_2S$ ) torna-se a espécie de sulfeto dominante em pH inferior a 6. De acordo com o gráfico de pH, descrito no capítulo anterior, mostra uma faixa de pH de 7,33 a 9,08 para as três amostras de lixiviado, assim sendo, a mistura de sulfetos é mais rica em HS (Dabrowska, 2019).

**6.4. Interpretação e discussão dos resultados das análises químicas das amostras de lixiviado**

**a) Magnésio**

A ocorrência de alguns metais alcalinos como o magnésio que são microcomponentes inorgânicos no lixiviado dão indicações da estabilização do aterro sanitário (Paixão & Miguel, 2017). Estudos realizados em aterros semi-aeróbicos verificaram elevadas concentrações de magnésio idênticas a deste estudo. Em geral a concentração de metais alcalinos como o magnésio é baixa no lixiviado na fase metanogênica devido ao aumento do pH (Top *et al.*, 2019).

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

De acordo com Husseieny *et al.* (2022), Aterros maduros ou antigos com mais de 15 anos de operação apresentam concentrações de magnésio na faixa de 34-81 mg/l e um aterro com menos de 2 anos de operação apresenta uma faixa de 47-48 mg/l da concentração de magnésio. Esta faixa descrita para aterros com mais de 15 anos de operação enquadra-se nos valores encontrados neste estudo para as amostras P2 e P3. Valores elevados idênticos ao a amostra P1 também foram observados em aterros sanitários da Arabia Saudita.

Altos valores de magnésio na amostra de lixiviado recirculado podem estar relacionados a área onde está implementado o método Fukuoka dentro da lixeira municipal de Hulene, que é exactamente na área onde houve o desabamento das montanhas de resíduos sólidos urbanos que, levou a destruição de várias casas que estavam alocadas nesta área, acabando por deixar materiais de construção que são ricos em magnésio.

### **b) Metais pesados (Zn, Cd, Pb, Cu e Fe)**

Em geral a baixa concentração de metais pesados no lixiviado pode estar relacionado ao facto da lixeira municipal de Hulene não receber resíduo sólido industrial e hospitalar que são em geral ricos em metais pesados e outros elementos de alta toxicidade. Diariamente a lixeira recebe resíduos sólidos urbanos constituídos por matéria orgânica, plástico e papel em grandes quantidades que também são fontes de metais pesados em pequenas concentrações. Estes metais pesados são encontrados também em materiais domésticos do quotidiano da população dessa região; entre estes materiais estão as pilhas, as tintas, produtos de beleza, materiais metálicos, latas de conservas de alimentos etc. (Azman *et al.*, 2023)

Resultados elevados de ferro estão também relacionados a contaminação indirecta do lixiviado durante o transporte de materias contendo ferro ou pela queima destes materiais dentro da lixeira pelos "catadores de lixo" perto da bacia colectora. O valor obtido para o cádmio é justificado pelo empobrecimento do lixiviado em produtos que contém este metal (Son *et al.*, 2021; Nagashima *et al.*, 2009).

Segundo Chong *et al.* (2005) ; Husseieny *et al.* (2022); Edokpayi *et al.* (2018), relatam em seus estudos valores semelhantes a este estudo para as concentrações de zinco, chumbo e cobre. As concentrações de Zn, Pb e Cu no lixiviado são geralmente baixas em aterros sanitários antigos ou

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

aerados intermitentemente devido ao aumento do pH com a recirculação do lixiviado. A alta concentração de íões cloretos podem contribuir para a redução de metais pesados no lixiviado (Gomes, 2017).

### **6.5. Interpretação e discussão da temperatura e humidade nos tubos ventiladores de gases**

A temperatura medida na lixeira municipal de Hulene é ótima para a biodegradação da matéria orgânica porque se encontra acima da faixa dos 10° C e abaixo da faixa dos 40° C. O excesso de temperatura pode impedir a acção de enzimas que vão retardar a actividade microbiana e consequentemente a biodegradação da matéria orgânica. Quando a temperatura no interior das camadas de resíduos sólidos urbanos começa a reduzir a temperatura do ar externo e se iguala a temperatura ambiente. Estima-se que o calor de biodegradação é reduzido e as reacções de biodegradação da matéria orgânica são facilmente biodegradáveis e biodecompostos e, o aterro começa a se estabilizar (Coutinho, 2020).

A humidade registada no tubo 2, não é favorável para a biodecomposição da matéria orgânica, porque humidade superior a 65% faz com que a água ocupe os espaços vazios do meio poroso, impedindo a circulação do oxigénio e provoca desta forma o surgimento de mais áreas anaeróbicas, desfavorecendo a biodecomposição semi-aeróbica da matéria orgânica.

De acordo com Hussein *et al.* (2022), obteve resultados superiores a este estudo na faixa de 70% a 90%, a diferença na humidade se deve também a quantidade de precipitação anual da região. Nos aterros sanitários estudados na Malásia a precipitação média anual é geralmente 1800 mm, enquanto na região que abarca a lixeira municipal de Hulene a precipitação média anual é de 789,2 mm. Por outro lado, elevados teores de humidade superior a 40% dificultam a biodegradação dos resíduos sólidos urbanos e diminui a produção do gás metano na lixeira.

### **6.6. Interpretação e discussão do biogás emitido na lixeira municipal de Hulene**

#### **a) Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), sulfeto de hidrogénio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e hidrogénio ( $\text{H}_2$ )**

O  $\text{NO}_2$  é um gás produzido em aterro sanitário semi-aeróbico e, a sua emissão não foi registrada o que não é comum; a sua emissão depende muito da composição química dos resíduos sólidos urbanos que a lixeira recebe. Os óxidos de nitrogénio presentes nos resíduos sólidos urbanos são

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

solúveis no lixiviado e, por isso não foram quantificados como parte da composição do biogás, porque a carga orgânica da matéria orgânica e a qualidade da composição dele, influência muito na formação dos gases (Fernandes, 2019).

O gás  $H_2S$  é produzido em condições anaeróbicas e a lixeira municipal de Hulene está sob um sistema semi-aeróbico em que, ocorre a introdução de oxigênio (ar). A formação de  $H_2S$  pela conversão biológica anaeróbica de sulfatos por bactérias redutoras de sulfato também pode ocorrer na presença de oxigênio. Porém neste caso, em vez de produzir  $H_2S$ , a lixeira municipal de Hulene, reduz o sulfato a dióxido de enxofre (Matos, 2008).

A ausência  $H_2$  no aterro no dia da medição, pode ser explicada pelo facto das bactérias metanogênicas consumirem o  $H_2$  presente e, ou as bactérias acetogênicas e fermentativas Fernandes (2019).

### **b) Oxigênio ( $O_2$ )**

O resultado de  $O_2$  confirma que ocorre a entrada de oxigênio (ar) nas camadas de resíduos sólidos urbanos, onde decorre a biodecomposição semi-aeróbica da matéria orgânica, desfavorecendo assim, as bactérias anaeróbicas, produzindo mais dióxido de carbono e menos metano. No método Fukuoka as áreas aeróbicas são geralmente contínuas através do fornecimento de oxigênio pelos tubos ventiladores de gases. A concentração de  $O_2$  não varia muito em aterros sanitários semi-aeróbicos da Malásia que varia entre 18,2 e 21 ppm (Jeong *et al.*, 2015; Hussein *et al.*, 2022).

### **c) Compostos traços dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e monóxido de carbono (CO)**

A emissão do  $SO_2$  numa lixeira urbana é pouco comum, visto que a lixeira municipal de Hulene não recebe resíduo sólido industrial que é em geral muito mais rico em enxofre, uma vez que as indústrias são fontes antropogênicas de emissão de  $SO_2$ . A emissão de  $SO_2$  ocorre por causa da redução de sulfato em ambientes semi-aeróbicos que resulta na atenuação da concentração de sulfato e acúmulo de sulfeto e enxofre elementar (Hussein *et al.*, 2022).

Segundo Hussein *et al.* (2012), em seus estudos sobre a composição do biogás produzidos em aterros sanitários semi-aeróbicos encontrou valores de CO de 18 ppm; como observado neste

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

estudo os tubos ventiladores de gases do número 4 a 6 apresentam concentração de 13 ppm, estão relacionados aos valores altos deste gás a ocorrência de veios anaeróbicos nas camadas de resíduos sólidos urbanos e alta carga orgânica húmida.

### **d) Metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

As baixas concentrações do gás metano emitido na lixeira devem-se a biodecomposição da matéria orgânica a partir de mecanismos semi-aeróbicos através da introdução de ar (oxigénio) nas camadas de resíduos sólidos urbanos até a estabilização do aterro sanitário. A introdução de ar a tempo inteiro nas camadas de resíduos sólidos urbanos favorece a redução do gás metano nessas camadas, isto porque, ocorre a redução de ambientes anaeróbicos e a redução de bactérias metanogénicas (Carvalho, 2005; Hussein *et al.*, 2022).

De acordo com Lima (2017), o decréscimo no valor do fluxo de metano ocorre também devido a ocupação dos poros presentes no solo da camada de cobertura, por água de chuva. Aterros sanitários semi-aeróbicos emitem metade do metano produzindo em um aterro anaeróbico. As emissões do gás carbónico, estão relacionadas tanto a actividade biológica aeróbica quanto anaeróbica, assim em aterros sanitários semi-aeróbicos emite-se maior concentração de gás carbónico e menor concentração de gás metano (Jeong *et al.*, 2015).

### **Razão CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>**

A razão CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> num aterro sanitário é utilizado para indicar o meio (aeróbico, semi-aeróbico ou anaeróbico) em que as reacções químicas de biodegradação da matéria orgânica ocorrem. Aterros semi-aeróbicos tem a razão CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> < 2 e, esta razão foi obtida neste estudo, como mostra a tabela descrita no apêndice número 2 em anexo (Jica, 2017).

Segundo Jeong *et al.* (2015), que obteve uma razão de 1,08 e 1,48, descreveu que estes valores são comuns em aterros sanitários semi-aeróbicos estabilizados.

## **6.7. Interpretação e discussão do cálculo do fluxo do caudal diário do lixiviado a partir da bacia colectora**

O fluxo do caudal de lixiviado recirculado na lixeira municipal de Hulene para o pico da época seca é baixo, mas pode ser explicado pela baixa precipitação média anual da região e aos efeitos

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

sazonais na produção de lixiviado, sendo que o maior fluxo de caudal de lixiviado é registrado no período chuvoso; isto porque ocorre pouca dissolução do lixiviado pela água da chuva e pouco movimento migratório no interior das camadas de resíduos sólidos urbanos; outro factor que explica a pouca quantidade de lixiviados gerados é que em aterros aeróbicos ou semi-aeróbicos a produção de lixiviados diminui por causa da sua recirculação (Matos, 2008; Regattieri 2003).

Observou-se durante as visitas de campo que ocorre uma migração E-W do lixiviado (na parte de trás da lixeira onde estão instalados os tubos ventiladores de gases). Este movimento migratório do lixiviado atinge e contamina a água superficial da região de cotas mais baixas (codificada como P2), que acaba também por contaminar as águas subterrâneas. Isto porque na época seca o movimento que as plumas de lixiviado espessas seguem é vertical e atinge grandes profundidades causando a contaminação destas águas. Na entrada principal da lixeira, onde foi recolhida a amostra codificada como P3, observou-se também a migração das plumas de lixiviado que também contaminam as águas subterrâneas.

De acordo com Bernardo *et al.* (2022), existe uma migração vertical do lixiviado causada pela lavagem superficial por precipitação e, pela influência da instalação de tubos ventiladores de gases e lixiviado nas camadas de resíduos sólidos urbanos que polui e contamina a região de cotas mais baixas que, posteriormente migra e contamina as águas subterrâneas. A pluma de contaminação de lixiviado desaparece a aproximadamente 200 m da lixeira, o factor atenuante deste efeito é a litologia local que é constituída por sedimentos dunares do quaternário.

De acordo com os resultados obtidos neste estudo sobre a implementação do método Fukuoka na lixeira municipal de Hulene, observou-se que a técnica de recirculação do lixiviado é eficaz na redução do impacto ambiental causado pelo descarte incorrecto de resíduos sólidos urbanos na cidade de Maputo e principalmente nos bairros de Hulene B e Laulane que abarcam a lixeira. Com a recirculação do lixiviado para a bacia colectora ocorre o desvio de uma carga altamente tóxica e poluente das águas subterrâneas, ademais esta técnica reduz a quantidade de volume de lixiviado produzido na lixeira bem como a reduz a emissão do gás metano.

Os resultados das análises microbiológicas, bioquímicas, físico-químicas e químicas, mostram a existência de elementos tóxicos no lixiviado que em contacto com as águas subterrâneas da

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

região causam a sua contaminação e ao entrarem no trato digestivo dos seres humanos, causa várias doenças. Com a recirculação do lixiviado para a bacia colectora, esta carga poluente rica em bactérias coliformes, coliformes fecais, matéria orgânica, sulfetos, nitratos e metais pesados não migra até as águas subterrâneas, reduzindo assim o risco de contaminação.

## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 7.1. Conclusões

Avaliada a eficiência do método Fukuoka na recirculação do lixiviado produzido lixeira municipal de Hulene e a retenção dos seus poluentes na protecção das águas subterrâneas da região e, com base nos resultados obtidos durante este estudo conclui-se que:

- Os principais poluentes encontrados no lixiviado das três amostras são os poluentes microbiológico (as bactérias coliformes e os coliformes fecais), poluentes bioquímicos (a matéria orgânica), poluentes físico-químicos (os nitratos e os sulfetos) e os poluentes químicos (os metais pesados "Fe, Cd, Pb, Cu e Zn").
- A composição química do biogás mostrou que a lixeira emite mais o gás dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e menos o gás metano (CH<sub>4</sub>); quanto aos elementos traços mostrou maior emissão do monóxido de carbono (CO) e o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>).
- Por hora são recirculados para a bacia colectora cerca de 0,116 m<sup>3</sup> de lixiviado e por dia são recirculados 2,678 m<sup>3</sup> de lixiviado no pico da época seca.
- A redução do volume e dos componentes do lixiviado, assim como a redução da emissão do CH<sub>4</sub> no biogás a partir da técnica de recirculação do lixiviado reduz o contacto destes poluentes com as águas subterrâneas, através da sua retenção na bacia colectora, reduzindo também o impacto ambiental e a contaminação das águas subterrâneas da região de Hulene B e Laulane mostrando assim a eficiência do método Fukuoka.

#### 7.2. Recomendações

##### a) Futuras pesquisas

Seguindo as linhas de pesquisa do presente trabalho, recomenda-se que as futuras pesquisas procurem desenvolver em seus estudos os seguintes aspectos:

- Estudar técnicas de tratamento e reaproveitamento do lixiviado recirculado para a bacia colectora de modo que o lixiviado não transborde e inunde a lixeira e as áreas adjacentes para que se evite a contaminação das águas subterrâneas.

## Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

- Analisar a concentração de sulfatos, nitrogénio amoniacal, fosforo, manganês e do mercúrio no lixiviado fresco e recirculado para a bacia colectora para se conhecer melhor a composição química do lixiviado produzido na lixeira municipal de Hulene.
- Avaliar o movimento migratório de lixiviado dentro da lixeira e áreas adjacentes de modo a compreender o seu padrão de contaminação da água subterrânea.
- Analisar a composição microbiológica e química das águas subterrâneas dos bairros de Hulene B e Laulane de modo a identificar se a água está a ser contaminada pelo lixiviado produzido pela lixeira municipal de Hulene.

### **b) Conselho Municipal da Cidade de Maputo e o Ministério da Terra e Ambiente**

- A construção de barreiras protectivas ao redor da bacia colectora de lixiviado, para evitar que o lixiviado transborde e contamine o solo e, atingindo as águas subterrâneas; e para evitar o acesso livre dos moradores e as pessoas que frequentam a lixeira municipal de Hulene;
- Realizar o monitoramento semestral dos parâmetros referentes aos pH, DBO<sub>5</sub>, metais pesados como Fe e Mn e gases emitidos, a fim de controlar a eficiência do método Fukuoka;
- Melhorar a protecção dos tubos ventiladores de gases porque observou-se a presença de resíduos sólidos urbanos no seu interior em estado de biodegradação que pode causar no entupimento dos tubos, impedindo a libertação dos gases para a atmosfera e a entrada de ar nas camadas de resíduos sólidos urbanos, dificultando assim, o funcionamento ideal do método Fukuoka.

### 7.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aghamahomadi, Nasrim; Aziz, Hamidi A.; Isa, Mohamed H.; Zinatizadeh, Ali A. (2007). *Performance of a Powdered Activate Carbon (PAC) Augmented Activated Sludge Process Treating Semi-aerobic Leachate*. International Journal of Enviromental Reserch.
2. Andhikari Bikash & Khanal, Sanjay N. (2015). *Quantitative Study of Landfill Leachate Technology from Different Ages of Landfill Sites of Various Countries Including Nepal*. Journal of Environmental Science. Volume 9. Nepal
3. Azevedo, I. A. & Chasin, A. A. (2003). *Metais: Gerenciamento da Toxicidade*. Editora Atheneu. 554 p. São Paulo.
4. Azman, Nurul S.; Mahmud, Nazira; Hajar, F.; Asras, Mohd F. F.; Nordin, Noor F. H.; Khalid, Nurul S.; Sabri, Nurul A. (2023). *Prevalence of Antibiotic Resistance in E.Coli in Leachate*. Scince Direct.
5. Aziz, Shuokr Q.; Aziz, Hamidi A.; Yusoff, Mohd S.; Bachir, Mohammed J. K. (2010). *Leachate Characterization in Semi-aerobic and anaerobic Sanitary Landfills: a Comparative Study*. Journal of Envirommental Management.
6. Azzolini, J. C. (2002). *Contribuição da Poluição Física, Química e Bioquímica nas águas do rio do Peixe pelo afluente do rio do Tigre*. Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil.
7. Benda, Fabricia. (2008). *Favorabilidade de Áreas para Implantação de Aterros Controlados no Município de Campos dos Goytacazes/RJ Utilizando sistemas de Informação Geográfica*. Universidade Estadual do Norte Fluminense -UENF. Brasil.
8. Bernadino, Bernardo J. (2023). *Modelação dos impactos ambientais e de saúde humana na área envolvente a lixeira de Hulene-B Maputo, Moçambique*. Universidade de Aveiro. Universidade do Porto. Moçambique.
9. Bernardino, B.; Candeias, C.; Rocha, F. (2022). *Characterization of the Dynamics of Leachate Contamination Plumes in the Surroundings of the Hulene-B waste in Maputo*. Pedagogic university of Maputo. Enviromments. Maputo – Mozambique.
10. Bilgili, Sinam M.; Demir, Ahmet; Ozkaya, Bestamim. (2006). *Influence of Leachate Recirculatin on Aerobic and Anaerobic Decomposition of Solid Wastes*. Yildiz Technical University.

11. Bittar, D. B. (2008). *Determinação dos Metais Pesados Cd, Cu, Cr e Pb nas Águas do Rio Uberabinha e Propostas de Adsorção por Adsorventes Naturais*. Uberlândia.
12. Bocchiglieri, Miriam M. (2010). *O Lixiviado dos Aterros Sanitários em Estações de Tratamento dos Sistemas Públicos de Esgotos*. São Paulo.
13. Bohé, J. M. C. F. (2008). *Estudo da Evaporação de Lixiviado de Aterros Sanitários como Alternativa Tecnológica de Tratamento: Testes em Bancada*. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE.
14. Cambule, G. & Pereira, M. G. (2015). *Ambiente/Moçambique: Novos regulamentos de gestão de resíduos*. Atlas internacional platform. Flash informativo. Moçambique.
15. Campo, J. R. (2014). *Descarte de lixiviado de aterros sanitários em estações de esgoto: uma análise crítica*. Brasil.
16. Carvalho, A. L. (2001). *Contaminação Subsuperficial em Áreas de Disposição de Resíduos Urbanos – O caso do Antigo Lixão de Vicosá (MG)*. Universidade Federal de Vicosá. MG-Brasil.
17. Carvalho, F.; Ferrari, F.; Daniel, M. (2008). *Água e Ambientes Urbanos, Qualidade da Água em Rios e Lagos Urbanos*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil.
18. Castilho, E. C.; Maia, I. S.; Santos, H.; Machado, A. P.; Cibelle. Z. (2019). *Biodegradabilidade do Lixiviado de Aterro Sanitário Baseada em Parâmetros Colectivos não Específicos*. Universidade Santa Catarina. Brasil.
19. Célere, M.S.; Oliveira, A. S.; Trevilato, T. M. B.; Munõz, S. I. S. (2007). *Metais Presentes no Chorume Colectado no Aterro Sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil e a sua Relevância para a Saúde Pública*. Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto.
20. Chandamela, M. H. (2019). *Gestão de Resíduos Sólidos em Moçambique. OMR – Observatório do Meio Rural*. Destaque rural nº 76. Moçambique.
21. Chong, Theng L.; Matsufuji, Yasushi; Hassan, Mohd N. (2005). *Implantation of the Semi-aerobic Landfill System (Fukuoka Method) Indeveloping Coutries: A Malaysia Cost Analysis*. Elsevier.
22. Coutinho, Marcela L. (2020). *Revisão da Literatura: Fração Orgânica ds Resíduos Sólidos Urbanos, Impactos em Aterros Sanitários e Compostagem como Solução*. Universidade de Juiz de Fora. Brasil.

23. Diniz, L. C. C. (2016). *Avaliação do Impacto do Chorume Produzido pelo Aterro Sanitário da Cidade de Ponta Grossa na Qualidade das Águas da Bacia do rio Cará-cará*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta grossa. Brasil.
24. Dabrowska; Dominika; Rykala. (2021). *A review of Lysimeter Experiments Carried out on Municipal Landfill Waste*. Wajciech. Toxics.
25. Ezaki, S. (2004). *Iões de Metais Pesados (Pb, Cu, Cr e Ni) Associados a Solos de Cobertura de Resíduos Sólidos em dois Aterros Sanitário da Região Metropolitana de São Paulo – SP*. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociencias. São Paulo. Brasil.
26. Edokpayi, Joshua N.; Durowoji, Olatunde S.; Odiya, John O. (2018). *Assessment of Heavy Metals in Landfill Leachate: A Case Study of Thohoyandow Landfill Limpopo Province, South Africa*. South Africa.
27. Ferreira, A. G. (2010). *Estudos dos Lixiviados das Reações do Aterro Sanitário de São Carlos – SP por meio da Caracterização Físico-química*. Universidade de São Paulo. Brasil.
28. Ferreira, G. A. (2015). *Ozonização Catalítica do Chorume do Aterro Sanitário de Cachoeira Paulista – SP Utilizando Rejeito Industrial de Borra de Fosfato como Reagente em Processo Batelada*. Universidade de São Paulo. Lorena. Brasil.
29. Fernando, A. (2013). *Diagnóstico sobre o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município da Maxixe, Inhambane/Moçambique*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG. Brasil.
30. Furtado, S. G. (2014). *Análise do sistema de tratamento de efluentes gasosos de uma central de valorização energética de resíduos sólidos urbanos*. Instituto superior de engenharia de Lisboa. Portugal.
31. Geus, J. A. M.; Lima, I. A. (1997). *Análise de Coliformes Totais e Fecais: Um Comparativo entre Técnicas Oficiais VRBA e Petrifilm EC Aplicados em uma Indústria de Carnes*. Brasil.
32. Gomes, M. M. M. (2015). *Estudo da Qualidade da Água de Consumo Humano. Validação de Métodos a Pequena Escala*. Universidade da Beira Interior. Covilha.
33. Gotardo, Olívia C. (2016). *Avaliação da Influência do Tempo de Aterramento dos Resíduos Domiciliares com a Vazão e a Composição dos Gases Gerados no Aterro Sanitário de Rio Claro – SP*. Rio Claro.

34. GTK, Consortium. (2006). *Noticia explicativa (Vol. 3)*. Maputo:Ministério dos Recursos Minerais. Direcção Nacional de Geologia.
35. Hassan, Najmaldim E. & Umer, Mustafa I. (2022). *Eurasian Chemical Communications Impacts of Greenhouse Gas Emissions on Ambient Air Quality in Kwashe Municipal Solid Waste Landfill in Kurdistan Region, Iraq*. University of Zakho Kurdistan. Iraq.
36. Helene, L. P.I. (2019). *Dinâmica da Geração e Fluxo de Chorume em Aterro Sanitário de Pequeno Porte a partir do Monitoramento Geofísico*. Universidade Estadual Paulista. Rio claro, São Paulo. Brasil.
37. Herinques, S. A. S. (2019). *Implementação e validação de métodos de ensino em águas residuais*. Instituto Politécnico de Tomar. Escola Superior de Tecnologia de Tomar. Tomar.
38. Hirata, C. V. R. (2002). *Contaminação da Água Subterrânea por Nitrato no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo, Brasil*. Universidade de São Paulo. Revista nº16. Brasil.
39. Hoai, Son Tran; Lam, Huong N.; Viet, Nga T. T.; Hoang, Giang, N.; Kawamoto, Ken. (2021). *Characterizing Seasonal Variation in Landfill Leachate Pollution Index (LPI) at Nam Son Solid Waste Landfill, Vietnam*. Faculty of Environmental Engineering. Vietnam.
40. Hosseini, Mohammad & Aziz, Hamidi A. (2012). *Solid Waste Disposal by Semi-aerobic Sanitary Landfill: Towards Achieving a Sustainable Development (Penang Experience)*.
41. Hussain, Entessar & Al-ameen, Jathwa. (2019). *Effect of Leachate Recirculation on Biological Stability of Municipal Solid Waste Under Semi-arid Conditions*. Al-Qadisiyal Journal for Engeneering Sciences.
42. Hussieny, Maged A.; Morsey, Mohamed S.; Ahmed, Mostafa; Elagroud, Sherien; Abdelrazik, Mohamed H. (2022). *Municipal Solid Waste and Leachate Characterization in the Cairo Metropolitan Area*. Resources. Egipto.
43. Inácio, C. T. (2010). *Dinâmica de Gases e Emissões de Metano em Leiras de Compostagem*. Universidade do Rio de Janeiro. Brasil.
44. Jeong, Sangjae; Nam, Anwoo; Mukyi, Seung; Kim, Jae Y. (2015). *Field Assessment of Semi-aerobic Condition and the Methane Correction Factor for the Semi-aerobic Landfills Provided by IPCC Guidelines*. Sciencedirect.

45. Kamaruddin, Mohamad A.; Yusoff, Mohd S.; Aziz, Hamidi A.; Hung, Yung-Tse. (2014). *Sustainable Treatment of Landfill Leachate*. Review Article.
46. Kin, Ng Kar; Aziz, Hamidi A.; Mojiri, Amin. (2014). *Initial Characterization of Semi-aerobic Landfill Leachate Based on its Biodegradation*. University Sains Malaysia. International Journal of Scientific Research.
47. Langa, Jose M. Do R. C. (2014). *Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos em Moçambique, responsabilidade de quem?*. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades. V.02. n. 10. ISSN 2318-8472.
48. Lee, H.; Coulon, F.; Beriro, D. J.; Wagland, S. T. (2023). *Increasing Recovery Opportunities of Metal(loid)s from Municipal Solid Waste via Landfill Leachate Recirculation*. Waste Management.
49. Lima, Ana M. M. (2017). *Emissão de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>) e Óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) em Aterros Sanitários no Município de Cuiabá*. Cuiabá. Mato Grosso.
50. Lima, J. S. (2003). *Avaliação da Contaminação do Lençol Freático do Lixão Município de São Pedro da Aldeida – RJ*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Brasil.
51. Lins, M. C. M. (2005). *Avaliação Microbiológica e Fitotóxica do Chorume da Estação de Tratamento do Aterro da Muribeca – PE*. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
52. Lôbo E. M. P S. (2006). *Estudo Comparativo das Características dos Líquidos Percolados Gerados no Aterro Metropolitano – PB e no Aterro da Muribaca – PE*. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
53. Long, Yuyang; Fang, Yuan; Shen, Dongsheng; Feng, Huajun; Chen, Ting. (2016). *Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S) Emission Control by Aerobic Sulfate Reduction in Landfill*. Scientific Reports.
54. Lunardi, K. (2012). *Avaliação da Presença de Metais Pesados nas Águas do Arroio Barracão no Município de Guapore – RS*. Centro Universitário Univantes. Univantes.
55. Macruz, P. D. (2015). *Avaliação do Tratamento do Chorume de Aterro Sanitário por Processo de Coagulação/Floculação como Coagulante Tanino e Policloreto de Alumínio (PAC)*. Universidade tecnológica Federal do Paraná. Campo Morão brasil.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

56. Maia, I. S.; Restrepo, J.B.; Castilho, B.C.; Franco, D. (2015). *Avaliação do Tratamento Biológico de Lixiviado de Aterro Sanitário em Escala Real na Região sul do Brasil*. Artigo científico. Brasil.
57. Maringonda, A. Jr. & Lopes, D. D. (2004). *Caracterização Físico-químicas de Chorume do Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos de Rolândia – PR*. ICTR 2004 – Congresso Brasileiro de Ciências e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Costão do santinho – Florianópolis. Brasil.
58. Martins, E. H.; Cabral, A. R.; Schirmer, W. (2020). *Monitoramento de Emissões Fugitivas a partir da Camada de Cobertura de Aterro Sanitário*. Revista Uningá. Review ISSN 2178-2571 – ciências exactas, da terra e engenharias. Brasil.
59. Matias, A. E. B. (2010). *Desenvolvimento e Caracterização de Sensores Quimicamente Modificados para Análise de Sulfetos*. Universidade Federal de Goiás. Goiânia.
60. Matos, Ana R. V. (2008). *Contribuição para o Estudo da Ifluência da Recirculação de Lixiviados no Comportamento de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*. Universidade Nova de Lisboa. Portugal.
61. Muguio, Miguel R.; Moiane, André F.; Matule, Euclides D.; Magaia, Luís A. (2022). *Mapeamento de Plumas de Contaminação ao Redor da Lixeira de Hulene, Através de Métodos Geoelétricos*. 9º Congresso Luso-moçambicano de Engenharia. VI Congresso de Engenharia de Moçambique, Maputo.
62. Matsinhe, F. O. (2012). *Estudo Etnográfico sobre os Catadores de Lixo da Lixeira Pública de Hulene*. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo – Moçambique.
63. Milanez, T. V.; Souza, A.; Bernardo, P. E. M. (2015). *Nitrato e Nitrito em Água Mineral Envasada Comercializada na Cidade de São Paulo*. Núcleo de águas e embalagens – centro de contaminantes. Instituto Adolfo Lutz. Brasil.
64. Monteiro, V. E. D. (2003). *Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca*. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
65. Morais, J. L. (2005). *Estudo da Potencialidade de Processos Oxidativos Avançados, Isolados e Integrados com Processos Biológicos Tradicionais, para o Tratamento de Chorume de Aterro Sanitário*. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Brasil.

66. Moravia, W. G. (2010). *Avaliação do Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário através do Processo Avançado Conjugada com Sistema de Secção por Membranas*. Belo Horizonte. Brasil.
67. Muchimbane, A. B. D. A. (2010). *Estudo dos Indicadores de Contaminação das Águas Subterrâneas por Sistemas de Saneamento “in situ” – Distrito Urbano 4, Cidade de Maputo, Moçambique*. IGC/ Universidade de São Paulo. Brasil.
68. Nagashima, Lucila A.; Junir, Carlos B.; Fujimura, Amanda S.; Recanello, Taluana D. (2010). *Characterization of Sludge Generated from the Treatment of Sanitary Landfill Leachate with Tammin – based Coagulant*. Research Gate.
69. Nishiwaki, A. A. M. (2016). *Análise da Biodegradação de Lixiviado de Resíduo Sólidos em Solo de Camada de Cobertura de Aterro Sanitário*. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife –PE. Brasil.
70. Paixão, Jorge L. F. & Miguel, Miriam. (2017). *Long-Term Characterization of Landfill Leachate Impacts of the Tropical Climate on its Composition*. Journal of Environmental Sciences. Campinas. Brazil.
71. Peixoto, André L. C.; Salazar, F. S.; Barboza, J. C. S.; Filho, Hécio. (2018). *Characterization of Controlled Landfill Leachate from the City of Guaratingueta – SP, Brazil*. Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science.
72. Pinto, M. C. F. (2007). *Manual, Mediação in loco: Temperatura, pH, Condutividade Elétrica e Oxigênio Dissolvido*. Serviço geológico do Brasil – CPRM. Brasil.
73. Pires, Lais G. & Villaca, Miguel G. (2011). *Alteração dos Níveis de Condutividade e STD nos Carregos Salvaterra e São Mateus em Função da Descarga de Chorume do Aterro Controlado e Sanitário Salvaterra*. Juiz de Fora.
74. Pohland, F. G.; Harper, S. R. (1985). *Summary of Leachate and Gas Production from Landfills*. Georgia Institute of Technology. SGEGIT.
75. Regattieri, Carlos R. (2003). *Estudo da Utilização da Energia do Biogás na Incineração Simultânea de Duas Fontes Poluentes – Gasosa e Líquida*. Universidade de São Paulo. São Carlos.
76. Ribeiro, Helena & Buque, Lino. (2014). *Legislação e Quadro Legal da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos em Moçambique*. São Paulo.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

77. Richardson, R.; Peres, José A. D. S.; Wanderley, José C. C.; Coreia, Lindoga M.; Peres, Maria D. H. D. (2006). *Pesquisa Social-Métodos e técnicas*. 5ª Edição; São Paulo: Editora Atlas.
78. Santos, A. A. (2008). *Qualidade das Águas Superficiais e subterrâneas na área de Influência do Aterro Sanitário de Cuiabá – MT*. Universidade Federal de Mato Grosso. Brasil.
79. Siti, Farhana N. & Aziz, Hamidi A. (2018). *Characteristic of Leachate at Alor Pongseu Landfill Site, Perak, Malaysia: A Comparative Study*. University Sains Malaysia.
80. Song, Sang-Hoon; Kim, Ram-Hui; Kim, Sang-Min; Lee, Nam-Hoon; Park, Jin-KYU. (2023). *Effect of Landfill In-situ Aeration With Movel Air Amplifier: A Case Study*. Envirom-Research.
81. Tamele Jr, Lucas; Juizo, Dinis; Mussá, Fátima; Muteto, Paulino. (2014). *Avaliação da Qualidade das Águas Subterrâneas de Grande Maputo*. 14º Silusba. Universidade Eduardo Mondlane.
82. Tavares, B. F. D. (2011). *Tratamento de Chorume: Análise dos Efluentes da Evaporação Forçada*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil.
83. Top, Selin; Akkaya, Gulizar K.; Demir Ahmet; Yildiz, Senol; Balahorli, Vahit; Bilgili, Mehmet S. (2019). *Investigation of Leachate Characteristics in Field-Scale Landfill Test Cells*. University of Tehram.
84. Tvedten, I.; Mngueleze, L.; Vate, A. (2015). *Resumo de Política IV. Gestão dos Resíduos Sólidos em Maputo, Moçambique*. CMI BRIEF. Volume 14 – nº4. Moçambique.
85. Uamusse, A. J. (2015). *Estudo da Qualidade de Água dos Poços e Furos para fins Domésticos no Distrito de Chigubo, Província de Gaza*. Universidade Eduardo Mondlane. Moçambique.
86. Umar, Muhammad; Aziz, Hamid A.; Yusoff, Mohds. (2011). *Assessing the Chloine Disinfection of Landfill Leachate and Optimization by Response Surface Methodology (RSM)*. ScienceDirect.
87. Ziyang, L.; Youcai, Z.; Tão, Y.; Yu, S.; Huili, C.; Nam Wen, Z.; Renhua, H. (2009). *Natural Attenuation and Characterization of Contaminants Composition in Landfill Leachate Under Different Disposing Ages*. SCI Total Environ.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

88. Zuccari, M. L.; Graner, C. A. F.; Leopoldo, P. R. (2005). *Determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO) em Águas e Efluentes por Método de Colorimetria Alternativo*. Vol. 20. n° 4.

# APÊNDICES

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

**Apêndice 1: Resultados das análises microbiológicas, bioquímicas, físico-químicas e químicas das amostras de chorume**

**Tabela 1:** Resultados das análises microbiológicas das amostras três de lixiviado.

Parâmetros microbiológicos	Unidade	Limites admissíveis*		Tipos de efluentes		
		Mínimo	Máximo	P1	P2	P3
Coliformes fecais	UFC/100 ml	-	Ausente	6900	5000	13000
Bactérias coliformes	UFC/100 ml	-	Ausente	33000	5500	110000

\* Limites admissíveis para qualidade da água subterrânea e superficial destinada ao consumo humano.

**Tabela 2:** Resultados das análises bioquímicas das amostras três de lixiviado.

Parâmetros bioquímicos	Unidade	Limites admissíveis*		Tipos de efluentes		
		Mínimo	Máximo	P1	P2	P3
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO <sub>5</sub> )	mg/l			1525,00	75,000	93,000
Demanda química de oxigênio (DQO)	mg/l			7625,00	374,00	463,00
Matéria orgânica (oxidabilidade)	mg/l	-	2,5-3	19,840	7,040	3,840
Oxigênio dissolvido	mg/l			5,40	2,20	2,60

\* Limites admissíveis para qualidade da água subterrânea e superficial destinada ao consumo humano.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

**Tabela 3:** Resultados das análises físico-químico das amostras três de lixiviado.

Parâmetros físico-químico	Unidade s	Limites admissíveis*		Tipos de efluentes		
		Mínimo	Máximo	P1	P2	P3
Condutividade elétrica	μS/cm ou μhmo/cm	50	2000	30000,0	3060,0	1015,0
pH (25°)	Sorensen	6,5	8,5	9,08	7,82	7,33
Alcalinidade total	mg/l	-	-	9900	944,46	376,20
Sólidos totais dissolvidos	mg/l	-	1000	16500,0	1590,0	533,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/l	-	50	0,09	0,05	0,04
Cloretos (Cl)	mg/l	-	250	2870	494,8	197,9
Sulfuretos	mg/l	-	0,05	0,800	1,200	5,600

\* Limites admissíveis para qualidade da água subterrânea e superficial destinada ao consumo humano.

**Tabela 4:** Resultados das análises químicas das amostras três de lixiviado.

Parâmetros químicos	Unidade s	Limites admissíveis*		Tipos de efluentes		
		Mínimo	Máximo	P1	P2	P3
<b>Metais alcalinos terrosos</b>						
Magnésio (Mg)	mg/l	-	50	1440	67,900	31,260
<b>Metais pesados</b>						
Zinco (Zn)	mg/l	-	3	1,019	0,416	0,259
Cádmio (Cd)	mg/l	-	0,003	<0,001 (LQ)	<0,001 (LQ)	<0,001 (LQ)
Chumbo (Pb)	mg/l	-	0,01	0,218	0,121	0,102
Cobre (Cu)	mg/l	-	2	0,434	0,141	0,112
Ferro (Fe)	mg/l	-	0,3	44,74	1,099	3,363

\* Limites admissíveis para qualidade da água subterrânea e superficial destinada ao consumo humano.

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

**Apêndice 2: Resultados dos gases medidos nos 18 tubos ventiladores de gás emitidos pela Lixeira Municipal de Hulene**

Tipos de gases	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5	Tubo 6	Tubo 7	Tubo 8	Tubo 9
CH <sub>4</sub> (% Vol.)	1,75	1,63	1,57	2	1,96	2,14	2,41	1,41	1,96
CH <sub>4</sub> (ppm)	14,09	13,7	13,73	17,42	13,23	18,89	18,02	10,51	14,57
CO <sub>2</sub> (ppm)	705	705	705	705	705	705	705	705	705
CH <sub>4</sub> / CO <sub>2</sub>	0,0199	0,0194	0,0194	0,0247	0,0187	0,0267	0,0255	0,0149	0,0206
CO (ppm)	0	0	0	13	13	13	1	1	1
O <sub>2</sub> (ppm)	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>2</sub> (ppm)	84	101	135	127	135	137	3	8	8
H <sub>2</sub> S (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Temperatura °C	20	20	22	21	21	21	22	21	22
Humidade %	66	70	60	62	62	60	54	56	54
<b>Coordenadas dos pontos de medição de biogás</b>									
Latitude	25°54' 04''	25° 54' 03''	25° 54' 02''	25° 54' 01''	25° 54' 00''	25° 53' 59''	25° 54' 04''	25° 54' 03''	25° 54' 02''
Longitude	32°35' 43''	32° 35' 43''	32° 35' 43''	32° 35' 43''	32° 35' 43''	32° 35' 43''	32° 35' 44''	32° 35' 44''	32° 35' 44''

Avaliação da eficiência do Método Fukuoka Implementado na Lixeira Municipal de Hulene na Retenção dos Agentes Poluentes das Águas Subterrâneas

Tipos de gases	Tubo 10	Tubo 11	Tubo 12	Tubo 13	Tubo 14	Tubo 15	Tubo 16	Tubo 17	Tubo 18
CH <sub>4</sub> (% Vol.)	2,56	1,40	1,29	1,84	2,95	2,27	1,72	1,29	1,29
CH <sub>4</sub> (ppm)	19,33	10,5	9,69	14,07	22,67	17,3	12,98	9,69	9,69
CO <sub>2</sub> (ppm)	705	705	705	705	705	705	705	705	705
CH <sub>4</sub> / CO <sub>2</sub>	0,0274	0,0148	0,0137	0,0199	0,0321	0,0245	0,01841	0,0137	0,0137
CO (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub> (ppm)	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>2</sub> (ppm)	10	14	16	25	20	19	16	16	16
H <sub>2</sub> S (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Temperatura ° C	23	23	23	25	22	22	23	21	22
Humidade %	54	54	56	55	52	53	58	56	54
<b>Coordenadas dos pontos de medição de biogás</b>									
Latitude	25°54' 01''	25° 54' 00''	25° 53' 59''	25° 54' 04''	25° 54' 03''	25° 54' 02''	25° 54' 01''	25° 54' 04''	25° 53' 59''
Longitude	32°35' 44''	32° 35' 44''	32° 35' 44''	32° 35' 45''	32° 35' 45''	32° 35' 45''	32° 35' 45''	32° 35' 45''	32° 35' 45''