

**INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS MACEIÓ
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DOUGLAS GONÇALVES DE MOURA
VITÓRIA CIBELLY RUFINO PEREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE MACEIÓ E ANÁLISE
COMPARATIVA DAS TÉCNICAS *DOWNHILL* E *UPHILL* DE DISPOSIÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS EMPREGADAS NO ATERRO**

**Maceió
2023**

**DOUGLAS GONÇALVES DE MOURA
VITÓRIA CIBELLY RUFINO PEREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE MACEIÓ E ANÁLISE
COMPARATIVA DAS TÉCNICAS *DOWNHILL* E *UPHILL* DE DISPOSIÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS EMPREGADAS NO ATERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Alagoas, Campus Maceió, como requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Taíse Monique de Oliveira Carvalho.

**Maceió
2023**



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Maceió
Biblioteca Benevides Monte

628.44
M929c

Moura, Douglas Gonçalves de.

Caracterização do aterro sanitário de Maceió e análise comparativa das técnicas downhill e uphill de disposição de resíduos sólidos empregadas no aterro / Douglas Gonçalves de Moura, Vitória Cibelly Rufino Pereira. - Maceió, 2023.
85 f. : il.

Orientação: Prof^ª. Dr^ª Taíse Monique de Oliveira Carvalho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Alagoas Campus Maceió. Maceió, 2023.

Arquivo no formato digital em PDF do trabalho acadêmico.

1. Centro de tratamento de resíduos. 2. Gestão de resíduos sólidos. 3. Meio ambiente.
I. Pereira, Vitória Cibelly Rufino. I. Título.

DOUGLAS GONÇALVES DE MOURA
VITÓRIA CIBELLY RUFINO PEREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Alagoas, Campus Maceió, como requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 27 de Setembro de 2023.

Orientadora:

Dra. Taíse Monique de Oliveira Carvalho - IFAL / Campus Maceió

Banca examinadora:

Ma. Celene Alves da Silva – IFAL / Campus MACEIÓ

Ma. Tainara Ramos da Rocha Lins de Brito Rodrigues – IFAL / Campus MACEIÓ

Ma. Danubia Teixeira Silva – IFAL / Campus PALMEIRA DOS ÍNDIOS

Maceió

2023

Dedicamos este trabalho aos casais Francisco Pereira da Silva e Maria Cicera Rufino Pereira, e José Severino Jorge de Moura e Cremilda Gonçalves de Moura, nossos pais, que nunca mediram esforços em nos proporcionar o melhor nesta vida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, porque sem Ele nada se iniciaria, nem continuaria, muito menos se concluiria. Sua graça e infinito amor que nos alcançou em cada etapa desta caminhada.

Agradecemos também aos nossos pais: Francisco Pereira da Silva, Maria Cicera Rufino Pereira, José Severino Jorge de Moura e Cremilda Gonçalves de Moura, nossos maiores incentivadores, que sempre fazem o máximo para nos proporcionar a melhor educação, nos apoiando e motivando em cada fase da nossas vidas. Não podemos deixar de mencionar aqui os nossos irmãos, noivo e amigos, por todo acolhimento, diálogo de confiança e torcida.

A professora Dra. Taíse Monique de Oliveira Carvalho, pela orientação, disponibilidade e todos os ensinamentos concedidos.

Ao Engenheiro Civil Rodrigo do Carmo Rodrigues gestor geral da empresa Orizon no centro de tratamento de resíduos sólidos de Maceió. Sem falar em toda a equipe da Alta Geotecnia Ambiental, por todas as informações e dados disponibilizados para a realização deste trabalho.

Agradecemos também a todos os docentes, tanto da coordenação de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Alagoas, como também aos professores de outras coordenações, do campus Maceió, que contribuíram de forma direta ou indireta para a nossa formação.

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

Artigo 225 da Constituição Federal de
1988.

PEREIRA, Vitória Cibelly Rufino. MOURA, Douglas Gonçalves de. **CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE MACEIÓ E ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS *DOWNHILL* E *UPHILL* DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EMPREGADAS NO ATERRO**. 85 f. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Campus Maceió, Instituto Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo caracterizar o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) da cidade de Maceió, assim como avaliar a eficiência das técnicas *uphill* e *downhill* de disposição de resíduos, empregadas em períodos diferentes nos aterros sanitários de Maceió, de João Pessoa e de Jaboatão dos Guararapes. Para tanto, foi realizada uma visita técnica no CTR de Maceió, fora feito uma revisão bibliográfica a respeito de Aterros Sanitários e as técnicas de disposição de resíduos sólidos urbanos, e fez-se por fim uma análise comparativa entre a massa específica nos CTR estudados e os métodos de disposição de resíduos utilizados. As técnicas de disposição de resíduos *uphill* e *downhill* diferem entre si em relação à cota de despejo dos resíduos bem como ao sentido de compactação. Com base nos resultados obtidos, considerando as variáveis estudadas, notou-se que a técnica utilizada pouco influencia a massa específica final dos resíduos já compactados nos CTR's analisados.

Palavras-chave: meio ambiente; disposição de resíduos; gestão de resíduos sólidos; centro de tratamento de resíduos.

PEREIRA, Vitória Cibelly Rufino. MOURA, Douglas Gonçalves de. **CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE MACEIÓ E ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS *DOWNHILL* E *UPHILL* DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EMPREGADAS NO ATERRO**. 85 f. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Campus Maceió, Instituto Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

ABSTRACT

This work aims to characterize the Waste Treatment Center (WTC) in the city of Maceió, as well as evaluate the efficiency of uphill and downhill waste disposal techniques, used at different periods in the landfills of Maceió, João Pessoa, and Jaboatão dos Guararapes. To achieve this, a technical visit was conducted at the Maceió WTC, a literature review was conducted on Sanitary Landfills and urban solid waste disposal techniques, and finally, a comparative analysis was carried out between the specific mass in the studied WTC's and the waste disposal methods used. Uphill and downhill waste disposal techniques differ with respect to the waste disposal height and the direction of compaction. Based on the results obtained, considering the variables studied, it was observed that the technique used has little influence on the final specific mass of the waste already compacted in the analyzed WTC's.

Key words: environment; waste disposal; solid waste management; waste treatment center.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da destinação final dos resíduos sólidos no Brasil.....	16
Figura 2 - Gestão ideal de resíduos sólidos preconizada pelo PNRS.....	21
Figura 3 - Participação das regiões na geração de RSU (%) em 2022.....	22
Figura 4 - Geração de RSU no Brasil e regiões - comparativo 2021 e 2022.....	22
Figura 5 - Corte de uma seção de um aterro sanitário.....	30
Figura 6 - Método de compactação downhill.....	33
Figura 7 - Método de compactação uphill.....	33
Figura 8 - Fluxograma.....	36
Figura 9 - Equação da massa específica.....	37
Figura 10 - Equação da média aritmética.....	38
Figura 11 - Equação do desvio padrão.....	39
Figura 12 - Mapa Satélite do Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió.....	40
Figura 13 - Mapa Satélite do Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió - Direção Norte.....	41
Figura 14 - Mapa Satélite do Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió - Direção Sul.....	41
Figura 15 - Placas de grama aplicadas sobre taludes compactados no CTR de Maceió.....	42
Figura 16 - Placas de grama aplicadas sobre taludes compactados no CTR de Maceió.....	43
Figura 17 - Célula fase 2 no CTR de Maceió.....	43
Figura 18 - Queima de gás no CTR de Maceió.....	44
Figura 19 - Estação de Tratamento de Chorume no CTR de Maceió.....	45

Figura 20 - Piscina de chorume na estação de tratamento de chorume do CTR de Maceió.....	46
Figura 21 - Lagoa pré-aerada na estação de tratamento de chorume do CTR de Maceió.....	46
Figura 22 - Piscina de efluente tratado na estação de tratamento de chorume do CTR de Maceió.....	47
Figura 23 - Rio da Alegria no CTR de Maceió.....	47
Figura 24 - Instrumento geotécnico e placa de recalque no CTR de Maceió.....	48
Figura 25 - Equipamentos utilizados na compactação de resíduos no CTR de Maceió.....	49
Figura 26 - Praça de tratamento de resíduos no CTR de Maceió.....	49
Figura 27 - Downhill no CTR de Maceió.....	50
Figura 28 - Gaiola de espera para controle de pressão do chorume no CTR de Maceió.....	51
Figura 29 - Média Mensal Massa Específica (t/m ³) - João Pessoa.....	55
Figura 30 - Massa Específica (t/m ³) - João Pessoa.....	56
Figura 31 - Média Mensal por Técnica (t/m ³) - João Pessoa.....	56
Figura 32 - Precipitação Mensal de 2021 a 2023 (mm) - João Pessoa....	59
Figura 33 - Média Mensal Massa Específica (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes.....	62
Figura 34 - Média Mensal Massa Específica (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes.....	63
Figura 35 - Precipitação Mensal de 2017 a 2023 (mm) - Jaboatão dos Guararapes.....	64
Figura 36 - Média Mensal por Técnica (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes	66
Figura 37 - Média Mensal Massa Específica (t/m ³) - Maceió.....	69
Figura 38 - Massa Específica (t/m ³) - Maceió.....	69
Figura 39 - Média Mensal por Técnica (t/m ³) - Maceió.....	72

Figura 40 - Precipitação Mensal de 2019 a 2023 (mm) - Maceió.....	73
--	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa Específica de 2021 a 2023 (t/m ³) - João Pessoa.....	48
Tabela 2 - Média da Massa Específica (t/m ³) - João Pessoa.....	48
Tabela 3 - Desvio Padrão da Massa Específica (t/m ³) - João Pessoa.....	50
Tabela 4 - Médias Mensais (t/m ³) - João Pessoa.....	52
Tabela 5 - Médias Mensais por Técnica (t/m ³) - João Pessoa.....	52
Tabela 6 - Comparativo de Médias - João Pessoa.....	52
Tabela 7 - Precipitação Mensal de 2021 a 2023 (mm) - João Pessoa.....	54
Tabela 8 - Massa Específica de 2021 a 2023 (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes.....	55
Tabela 9 - Média da Massa Específica (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes.....	56
Tabela 10 - Desvio Padrão da Massa Específica (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes.....	58
Tabela 11 - Médias Mensais (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes	59
Tabela 12 - Médias Mensais por Técnica (t/m ³) - Jaboatão dos Guararapes.....	59
Tabela 13 - Comparativo de Médias - Jaboatão dos Guararapes.....	60
Tabela 14 - Precipitação Mensal de 2017 a 2023 (mm) - Jaboatão dos Guararapes	60
Tabela 15 - Massa Específica de 2019 a 2023 (t/m ³) - Maceió.....	62
Tabela 16 - Médias Mensais (t/m ³) - Maceió.....	63
Tabela 17 - Médias Mensais por Técnica (t/m ³) - Maceió.....	65
Tabela 18 - Média da Massa Específica (t/m ³) - Maceió.....	65
Tabela 19 - Desvio Padrão da Massa Específica (t/m ³) - Maceió.....	66
Tabela 20 - Comparativo de Médias - Maceió.....	67
Tabela 21 - Precipitação Mensal de 2019 a 2023 (mm) - Maceió.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PIGIRS	Planos Intermunicipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de vinila
ROI	<i>Return on Investment</i>
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEMARH-AL	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	Resíduos Sólidos Urbanos.....	20
3.1.1	Classificação dos resíduos sólidos.....	23
3.1.2	Impactos ambientais e sociais causados pela má gestão dos RSU.....	24
3.2	Geração e Gestão de RSU no Município de Maceió, Alagoas.....	25
3.2.1	Plano estadual de resíduos sólidos do Estado de Alagoas.....	26
3.3	Aterro Sanitário.....	27
3.3.1	Definição.....	27
3.3.2	Principais tecnologias utilizadas na operação de aterros sanitários, quanto à disposição e compactação dos resíduos.....	30
3.3.2.1	Downhill e Uphill.....	32
4	METODOLOGIA	36
5	RESULTADO E DISCUSSÕES	40
5.1	Caracterização do CTR de Maceió.....	40
5.2	Análise da influência do tipo de compactação na massa específica.....	51
5.2.1	Considerações prévias à análise.....	51
5.2.2	CTR João Pessoa - Paraíba.....	52
5.2.3	CTR Jaboatão dos Guararapes - Pernambuco.....	60
5.2.4	CTR Maceió - Alagoas.....	67
5.2.5	Considerações.....	74
6	CONCLUSÃO	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
6.2	Trabalhos futuros.....	77
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXO	83

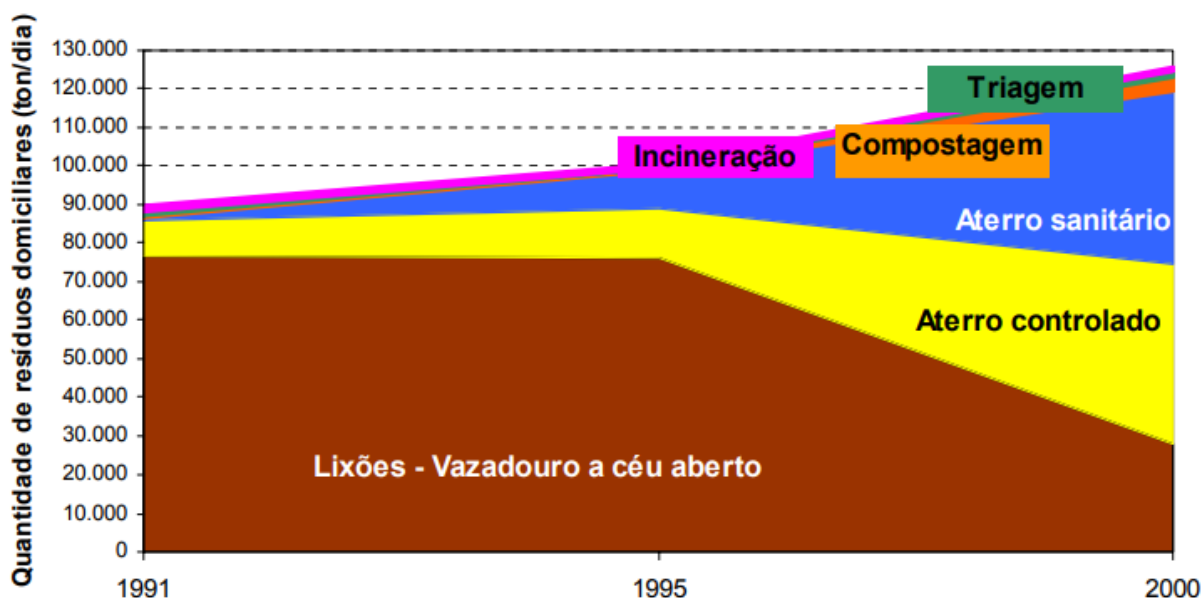
1 INTRODUÇÃO

De acordo com os dados da *International Solid Waste Association (ISWA)* (2019), até 2050, está prevista uma geração mundial de lixo que chegará a 3,4 bilhões de toneladas por ano, o que motiva a realização de estudos e políticas públicas para que haja uma melhor gestão e destinação de tais resíduos.

O aterro sanitário é uma área projetada e construída para receber os resíduos produzidos pela cidade, que visa minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública através do confinamento dos resíduos, sendo a técnica de disposição de resíduos em aterros sanitários regulamentada por normas e leis ambientais, devendo estas serem realizadas de forma adequada para garantir a proteção do meio ambiente, da saúde pública e do pleno funcionamento eficaz do aterro no que tange a gestão de resíduos sólidos (BARBOSA e CAMPOS, 2015).

No Brasil, a evolução do sistema de destino final dos resíduos sólidos urbanos ocorreu a partir da década de 1990 devido ao aumento excessivo da geração de lixo, na Figura 1 é possível observar essa evolução até o final da década de 90 ao notar que a destinação dos resíduos sólidos ficou cada vez mais presente, segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) (2000).

Figura 1 - Evolução da destinação final dos resíduos sólidos no Brasil.



Fonte: PNSB (Pesquisa nacional de saneamento básico).

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua Norma Brasileira (NBR) 8419 de 1992, um aterro sanitário deve realizar um ciclo

completo de tratamento dos resíduos sólidos, considerando os líquidos e gases provenientes da decomposição dos mesmos. Para tanto, um aterro tem que dispor de sistemas de tratamento do chorume e lixiviado, coleta e tratamento dos gases, além de sistema de impermeabilização e drenagem eficientes.

No Brasil, a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) a partir da Lei nº 12.305/2010 foi um importante marco para o processo de gerenciamento dos resíduos sólidos, conseqüentemente estabelecendo diversas diretrizes e responsabilidades. A lei estabelece metas ambiciosas e importantes a fim de preservar o meio ambiente e a saúde pública, com o fim dos lixões e dos aterros controlados.

Nesse contexto, a Engenharia Civil tem um papel crucial na busca de soluções para os problemas também relacionados à disposição de resíduos sólidos e manejo do solo. É fundamental que sejam desenvolvidas tecnologias e técnicas eficientes e seguras para a gestão dos resíduos, garantindo que os aterros sanitários cumpram seu papel na cadeia de gestão de resíduos sólidos, contribuindo para a preservação do meio ambiente e para o desenvolvimento sustentável (ISWA, 2021).

O problema da disposição de resíduos sólidos é um desafio enfrentado por muitas cidades brasileiras, incluindo Maceió - AL. A gestão adequada dos resíduos é crucial para evitar impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública, bem como a técnica de disposição utilizada pode impactar diretamente na eficiência e capacidade do aterro.

Atualmente, o aterro sanitário de Maceió é a principal forma de disposição final dos resíduos sólidos da cidade, conforme relatórios apresentados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas/SEMARH-AL. Entre 2010 a 2022, na gestão da V2 ambiental, o aterro sanitário de Maceió utilizava a técnica de *uphill*, que consiste em dispor os resíduos na região mais baixa da célula e sua compactação ocorre de baixo para cima. Mas, a partir de 16 de dezembro de 2022, segundo o relatório da Orizon Engenharia Ambiental, gestora do aterro atuante no ano de 2023, houve a mudança para a técnica de *downhill*, onde o resíduo é disposto na parte superior da célula e compactado de cima para baixo, sendo este método adotado por outras unidades administrada pela empresa.

Nesse contexto, este trabalho se dispõe a caracterizar o Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió e a fazer uma análise comparativa das duas técnicas de disposição/compactação de resíduos sólidos, com foco na avaliação do grau de compactação, utilizando os dados dos aterros sanitários de Maceió, em Alagoas, e de dois aterros que já empregaram e empregam tais técnicas e que possuem características de resíduos e clima semelhantes ao de Maceió, o de João Pessoa, na Paraíba, e o de Jaboatão dos Guararapes, em Pernambuco.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem dois objetivos principais:

- Fazer uma análise comparativa entre as técnicas *downhill* e *uphill* de disposição de resíduos, com foco nas massas específicas obtidas através destas técnicas;
- Caracterizar o Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar as práticas operacionais e aspectos de gestão que contribuem para o correto gerenciamento dos resíduos;
- Explorar as técnicas de disposição de resíduos conhecidas como *uphill* e *downhill*, apresentando uma análise de seus princípios, benefícios e desafios associados;
- Investigar a possível influência dos períodos de elevada precipitação pluviométrica na característica de massa específica dos resíduos já compactados nos CTR's estudados.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos incluem todos os materiais sólidos e semi-sólidos que o possuidor não considera com valor suficiente para conservá-lo (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). Nesta definição, o autor coloca o resíduo como um bem inservível aos olhos de um referencial, o possuidor, e ao mesmo tempo uma matéria prima para outras pessoas.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) define resíduos sólidos como sendo:

“Resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalação de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem viável o seu lançamento na rede pública de esgotos e corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente viáveis face à melhor tecnologia disponível.”

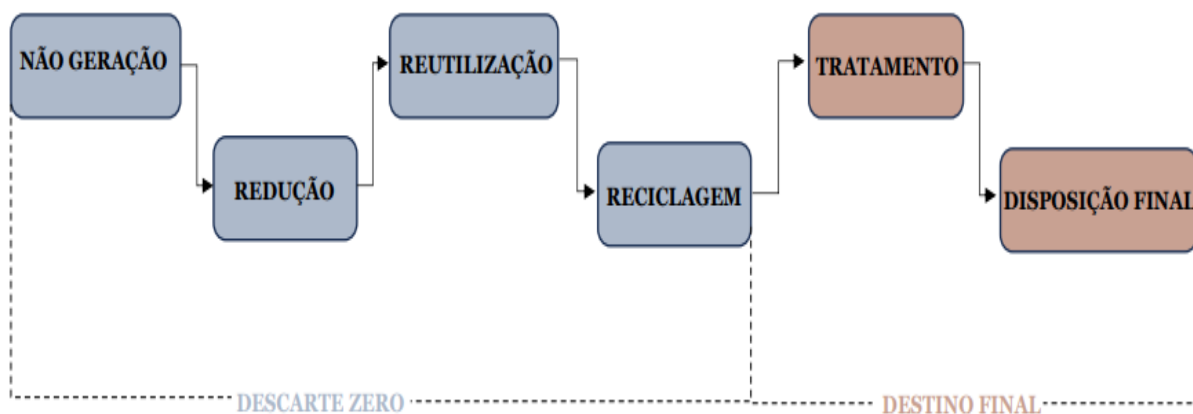
Segundo a definição estabelecida pela norma técnica brasileira, é evidente a diversidade e complexidade dos resíduos sólidos urbanos. No Brasil, é responsabilidade de todos os cidadãos promover o descarte adequado do RSU, contudo, é mérito do poder municipal a disposição final dos mesmos.

Pela nova visão da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei 12.305/2010, os resíduos sólidos são materiais passíveis de aproveitamento, enquanto que os rejeitos são materiais que devem ser enviados para destinação final ambientalmente adequada. A Lei 12.305/2010 no inciso XVI do artigo 3º, define os resíduos sólidos como:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos Estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Assim, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Alagoas estabelece uma ordem de prioridade na gestão dos resíduos sólidos, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Gestão ideal de resíduos sólidos preconizada pelo PNRS.

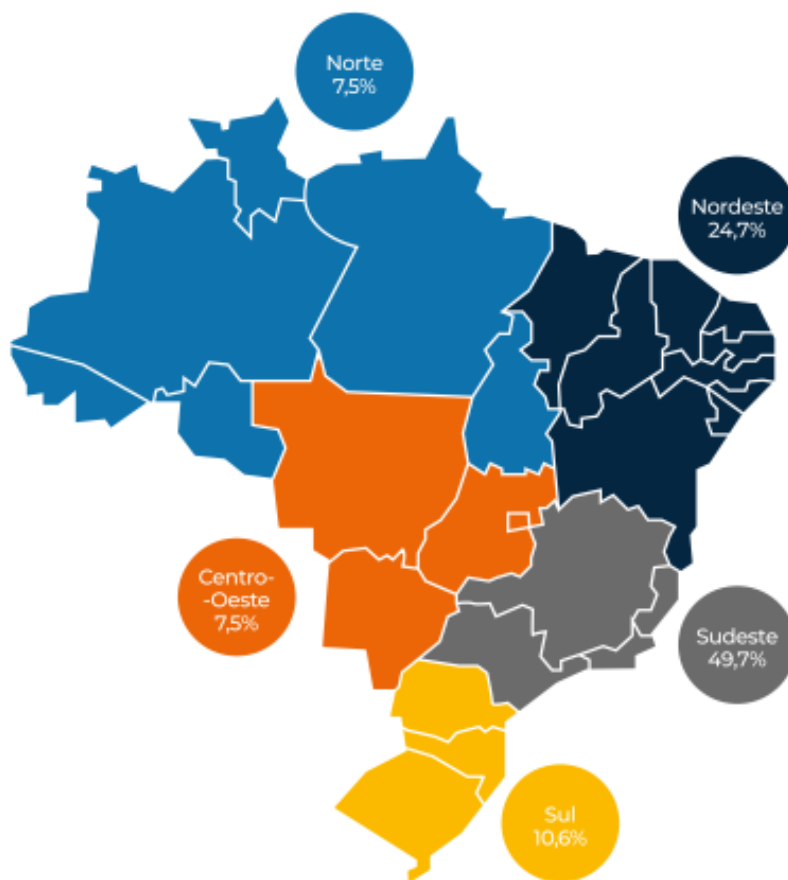


Fonte: Ministério do Meio Ambiente - MMA (2014). Modificado por AUTORES.

De acordo com um “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2022” realizado pela ABRELPE - Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, após uma pandemia vivenciada globalmente, o Brasil em particular, com o retorno das atividades da sociedade, apresentou de 2021 para 2022 um regresso no montante de RSU produzidos no país. Isso se deu devido às novas dinâmicas sociais, com a retomada da geração de resíduos nas empresas, escolas e escritórios, além da menor utilização dos serviços de delivery, com relação ao período de isolamento social.

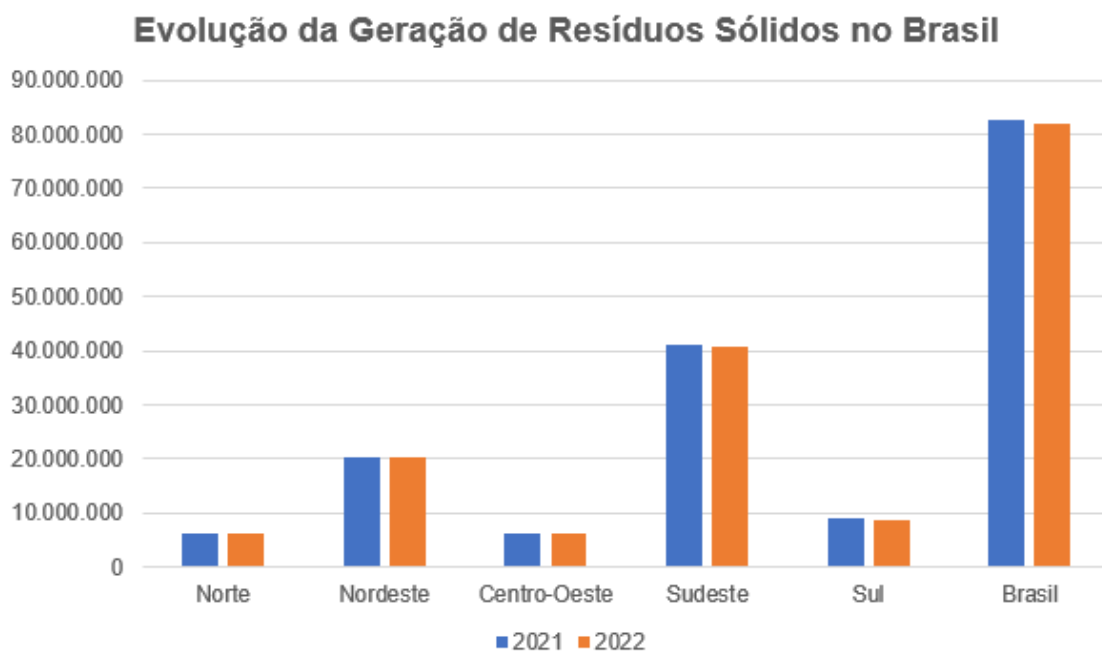
Mesmo com essa evolução de práticas, o Brasil em 2022 ainda apresentou um destaque de produção de cerca de 224 mil toneladas diárias de RSU. A Figura 3 ilustra em percentual a distribuição de produção de resíduos para cada região do Brasil, além disso segundo dados publicados pela ABRELPE, pode ser avaliada a evolução de geração de resíduos entre os anos de 2021 e 2022, em cada região do país pela Figura 4.

Figura 3 - Participação das regiões na geração de RSU (%) em 2022.



Fonte: Abrelpe, 2022.

Figura 4 - Geração de RSU no Brasil e regiões - comparativo 2021 e 2022.



Fonte: Abrelpe, 2022.

Uma grande parcela da população brasileira não tem condições mínimas de saneamento básico, onde estes resíduos sólidos são descartados sem nenhum tratamento. Isso tem causado diversos impactos ambientais locais, expondo a saúde e qualidade de vida das pessoas, uma vez que, disposição adequada de RSU emite gases de efeito estufa (ICLEI, 2009, p. 7).

Segundo o estudo realizado pela International Solid Waste Association (ISWA) chamado de “O futuro do setor de gestão de resíduos”, estima-se que, no cenário vigente de produção de bens de consumo, a geração de resíduos sólidos urbanos aumentará em todo o mundo, passando de 2 bilhões de toneladas/ano em 2016 para 3,4 bilhões de toneladas em 2050. Sem falar que o sistema de gestão de resíduos sólidos é um direito humano global, por isso o estudo destaca os principais desafios que devem ser melhorados até 2030, sendo eles:

- Baixa cobertura de coleta;
- Falta de destinação adequada para todos os resíduos gerados;
- Poluição causada por práticas inadequadas (descarte irregular, lixões, queima a céu aberto, etc.);
- Baixa demanda por matérias-primas secundárias;
- Substâncias nocivas/perigosas na composição dos materiais;
- Falta de financiamento/recursos mínimos necessários.

3.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

A classificação dos resíduos sólidos é um processo fundamental para o gerenciamento adequado desses materiais, pois permite identificar suas características e definir as melhores formas de armazenamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final. A NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) é a norma técnica que estabelece a classificação dos resíduos sólidos no Brasil.

De acordo com a norma, os resíduos sólidos são classificados em três classes, a saber:

- Classe I – Perigosos;
- Classe II – Não Perigosos, sendo esta dividida em duas, que são:
 - Classe II A – Não Inertes;
 - Classe II B – Inertes
- Classe III – Radioativos.

A classe de um resíduo é determinada com base em sua composição química, física e biológica, bem como em suas propriedades de periculosidade, toxicidade, inflamabilidade, reatividade e outras características relevantes para a gestão adequada desses materiais.

Os resíduos da Classe I referem-se àqueles que apresentam risco significativo para a saúde pública e o meio ambiente, devido a suas propriedades de periculosidade, toxicidade, inflamabilidade, reatividade ou outras características que os tornam nocivos. Esses resíduos devem ser armazenados, coletados, transportados, tratados e dispostos finalmente de acordo com procedimentos específicos e rigorosos, a fim de minimizar os riscos à saúde e ao meio ambiente.

Os resíduos da Classe II dizem respeito àqueles que não apresentam risco significativo para a saúde pública e o meio ambiente, mas ainda assim exigem cuidados especiais em sua gestão. Esses resíduos podem ser subdivididos em duas subclasses: a Classe II A – Não Inertes (Podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água) e a Classe II B – Inertes (Pela NBR 10.006 os seus constituintes solubilizados não ultrapassam as concentrações preconizadas pelos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.)

A Classe III inclui os resíduos que apresentam radioatividade acima dos limites estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), exigindo cuidados especiais em sua gestão. Esses resíduos devem ser armazenados, coletados, transportados, tratados e dispostos finalmente em instalações específicas, de acordo com normas e procedimentos específicos.

A classificação dos resíduos sólidos é fundamental para a gestão adequada desses materiais, permitindo identificar suas características e definir as melhores formas de armazenamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final. É importante, portanto, que os geradores de resíduos, bem como os responsáveis pela sua gestão, estejam familiarizados com os critérios de classificação estabelecidos pela norma técnica NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

3.1.2 Impactos ambientais e sociais causados pela má gestão dos RSU

Segundo o artigo “Impactos da má gestão dos resíduos sólidos” publicados pela Vertown, empresa especializada em gestão de resíduos, um dos impactos ambientais evidentes da má gestão dos resíduos sólidos é a poluição do solo e das

águas. Quando o lixo é jogado em locais inadequados, como terrenos baldios ou rios, os resíduos podem se decompor e liberar substâncias tóxicas, contaminando o solo e as águas subterrâneas. Além disso, a decomposição do lixo pode gerar gases tóxicos, como o metano, que contribuem para o aquecimento global e para a degradação da camada de ozônio.

Para Cunha (2006), autor do artigo “A INTERPRETAÇÃO GEOGRÁFICA DA LOCALIZAÇÃO DOS LIXÕES MUNICIPAIS”, a má gestão dos resíduos sólidos também pode ter impactos sociais significativos, e em muitos casos, os lixões e os depósitos irregulares de lixo são localizados próximos a comunidades mais pobres, que acabam sofrendo com os efeitos da poluição e do mau cheiro. Além disso, a presença de lixões pode atrair animais nocivos, como ratos e mosquitos, que podem transmitir doenças.

Diante desses impactos negativos, vê-se a necessidade de buscar soluções para a gestão adequada dos resíduos sólidos, sendo o uso de aterros sanitários a solução mais adequada, pois são locais especialmente projetados para receber e armazenar o lixo de forma segura e controlada. Os aterros sanitários contam com sistemas de impermeabilização, drenagem e coleta de gases, que minimizam os impactos ambientais e sociais causados pelo lixo.

3.2 Geração e Gestão de RSU no Município de Maceió, Alagoas

O município de Maceió, capital do estado de Alagoas, enfrenta desafios significativos em relação à geração e gestão de resíduos sólidos. A capital maceioense, segundo Filho et al. (2017) produzia, em 2017, cerca de 1.700 toneladas de resíduos por dia e contava com uma população de 943.109 habitantes. Esse volume de resíduos possível de ser maior atualmente, devido ao aumento da população para 957.916 de habitantes de acordo com o censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2022. Além disso, os resíduos são coletados pelo serviço público de limpeza urbana que segundo Lei Complementar ao Código Municipal de Limpeza Urbana do município (MACEIÓ, 2007) é de competência da Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió – SLUM, e destinado, atualmente, ao Centro de Tratamento de Resíduos Maceió, localizado no bairro de Benedito Bentes, a cerca de 20 km do centro da capital. O aterro sanitário também recebe resíduos de outros municípios da região metropolitana de Maceió.

3.2.1 Plano estadual de resíduos sólidos do Estado de Alagoas

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) é um mecanismo da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), onde é realizado o planejamento estadual para elaboração de ações relacionadas ao setor de resíduos sólidos, por meio deste é que os estados têm acesso aos recursos destinados a empreendimentos e serviços relacionados à gestão de resíduos sólidos, concedido pela União.

O PERS deve incluir todo o território do estado e deverá ser elaborado para um horizonte de 20 anos com revisões a cada 4 anos, atendendo ao conteúdo mínimo definido pelo Art. 17 da Lei Federal 12.305, de 2 de agosto de 2010. Assim, as atividades previstas para a criação do Plano Estadual foram divididas em cinco metas:

1. Projeto de mobilização social e divulgação;
2. Panorama dos resíduos sólidos no estado de Alagoas;
3. Estudo de prospecção e escolha de cenário de referência;
4. Diretrizes e estratégias do PERS;
5. Divulgação e finalização do plano estadual de resíduos sólidos do estado de Alagoas.

O PERS-AL realiza estudos dos panoramas dos resíduos sólidos no estado de Alagoas, como também os impactos ambientais e fatos evidenciados devido a disposição inadequada dos mesmos. Que dão base para discussão e realização de metas, projetos e atividades, que constituirão o Plano Estadual.

Ele é um complemento aos planos preliminares já elaborados pelo estado por meio da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH/AL), composto pelo Plano Estadual de Regionalização da Gestão dos Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas e o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos dos Municípios Alagoanos Inseridos na Bacia do Rio São Francisco.

Atualmente, no PERS-AL há um comitê diretor que foi criado para acompanhar, mobilizar e apoiar, na execução dos Planos Estaduais de Resíduos Sólidos e dos Planos Intermunicipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PIGIRS), para as sete regiões definidas no Plano Estadual de Regionalização da Gestão dos Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas. Além disso, os comitês têm por finalidade:

- Validar o PERS e o PIGIRS;
- Avaliar periodicamente e monitorar o trabalho produzido;
- Deliberar sobre as estratégias e mecanismos que assegurem a implementação do PERS e do PIGIRS;
- Participar e auxiliar nos trabalhos e ações de Mobilização Social e Divulgação no âmbito municipal;
- Auxiliar a empresa Floram (responsável pela elaboração dos Planos) nos trabalhos de levantamento de informações para a realização do diagnóstico municipal.

3.3 Aterro Sanitário

3.3.1 Definição

O aterro sanitário é uma instalação destinada à disposição final dos resíduos sólidos urbanos. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na definição dada pela NBR 8419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), aterro sanitário é:

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.”

O aterro sanitário é uma das formas adequadas mais utilizadas de disposição final de resíduos sólidos, que tem como base técnicas de impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária das células de resíduos, coleta e tratamento do chorume e gases gerados. Para um adequado funcionamento do aterro sanitário devem ser feitos planos de monitoramento ambiental e geotécnico, além da instalação de sistemas de drenagem de águas pluviais (CORREA e LANÇA, 2008).

Conforme NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) se estabelece critérios necessários para a escolha da área onde será implantado aterro de resíduos não perigosos, esses critérios são:

- Camada de solo natural homogêneo com coeficiente de permeabilidade $k < 10^{-6}$ cm/s e zona não saturada com espessura superior a 3m;
- Topografia: 1% < declividade < 30%;
- Recursos hídricos: distância > 200m;
- Geologia e tipo de solo: situação ideal, com um solo permeável. Distância aceitável de 1,5m da base do aterro ao nível máximo do lençol freático;
- Vias de acesso: em boas condições para uso na construção e utilização do aterro;
- Distância mínima a núcleos populacionais: 500m;
- O aterro não deve ser executado em áreas com riscos de inundação em períodos de recorrência de 100 anos.

Além disso, o aterro sanitário deve possuir, preferencialmente, uma vida útil superior a 10 anos, prevendo-se ainda o seu monitoramento por alguns anos após o seu fechamento. Vale destacar que para a apresentação de projetos de aterros sanitários é necessário atender as exigências estabelecidas pela NBR 8419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

No processo de decomposição dos resíduos sólidos, ocorre a liberação de gases e líquidos (chorume ou percolato) muito poluentes, o que leva um projeto de aterro sanitário a exigir cuidados como impermeabilização do solo, implantação de sistemas de drenagem eficazes, entre outros, evitando uma possível contaminação da água, do solo e do ar.

Cerca de 40% a 60% dos gases formados em aterros sanitários é composto de gás Metano. Sua emissão é dirigida pelo CONAMA na resolução nº 382 de 2006, pois estes gases devem ser tratados para não causar danos ao meio ambiente, nem à saúde humana. Em geral esse tratamento se dá através da instalação de drenos, onde ocorre a queima do gás, havendo estudos que visam a implementação de geração energética com base no biogás produzidos, como citado por Maciel et al. (2009) na tese de doutorado cujo objetivo principal fora:

“[...] a avaliação do potencial de geração de biogás e a análise da produção de energia, a partir do desenvolvimento e implantação de uma célula experimental com

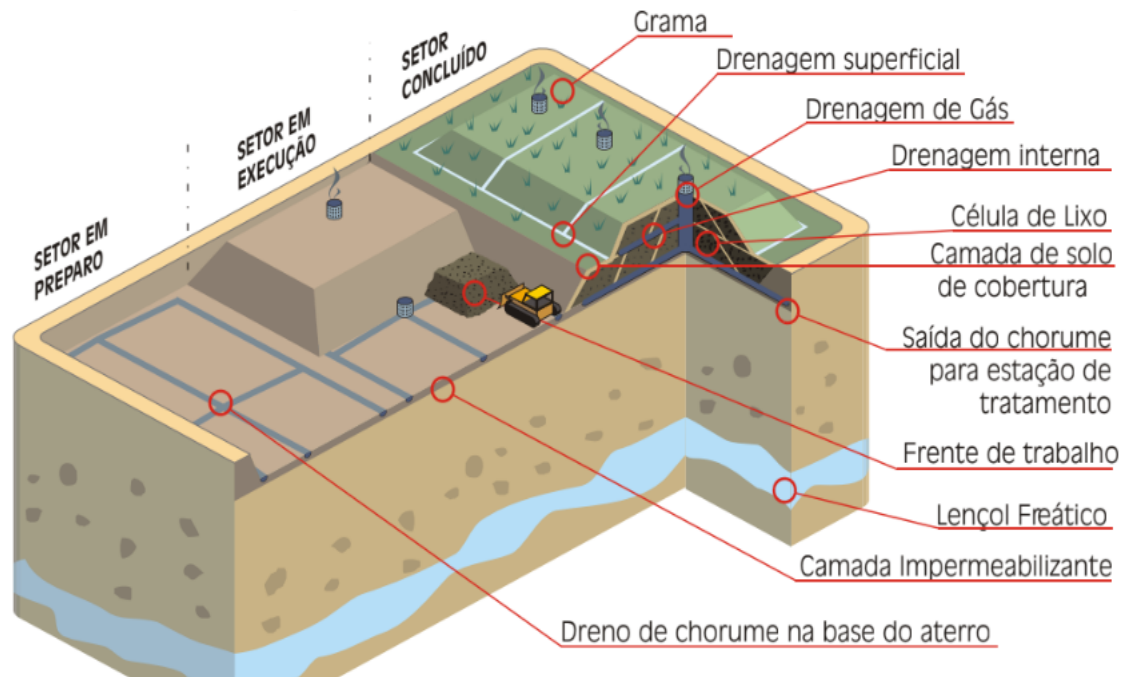
36.659 t de resíduos sólidos urbanos e uma usina piloto com capacidade de gerar 20 kW.”

Já o chorume, também conhecido como lixiviado é um líquido formado pela umidade natural e água presente na matéria orgânica dos resíduos, além disso água de infiltração na camada e a degradação biológica da matéria orgânica ao longo do tempo somam ao volume lixiviado produzidos pelo aterro sanitário. O lixiviado deve, portanto, ser tratado no próprio aterro sanitário antes de ser lançado nos corpos hídricos, de acordo com as exigências da NBR 8419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

Os aterros sanitários são caracterizados pela disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos em células impermeabilizadas, que recebem uma camada de material drenante, como pedras ou areia, para auxiliar no direcionamento dos líquidos gerados pela decomposição dos resíduos, como ilustrado na Figura 5. Sobre essa camada, são depositados os resíduos sólidos, que são compactados para ocupar o menor espaço possível. A cada camada de resíduos depositada, é colocada uma nova camada de material de cobertura, como terra, para evitar a proliferação de vetores e maus odores.

Além disso, é importante ressaltar que um aterro sanitário deve contar com uma série de equipamentos para monitorar e controlar o impacto ambiental, como sistemas de drenagem, impermeabilização, captação de gases, entre outros, sendo os aterros sanitários uma solução eficiente e segura para a disposição final de resíduos sólidos, desde que construídos e operados de maneira adequada (CONDER- Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia).

Figura 5 - Corte de uma seção de um aterro sanitário.



Fonte: Manual de operação de aterros sanitários - CONDER.

A rotina operacional de todo aterro deve ser obedecida, que geralmente é definida por receber caminhões previamente cadastrados, identificar os transportadores, registrar e verificar a procedência, pesar e registrar toda a operação. Na balança é realizada a caracterização dos resíduos quanto a qualidade, origem e quantidade (Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia - CONDER).

O despejo do resíduo no aterro sanitário deve ser feito na presença do fiscal para o controle do tipo de resíduo, esses fiscais juntamente com o coordenador de funcionamento do aterro (Engenheiro Civil/Sanitarista) tem a responsabilidade de fazer o monitoramento CTR, para avaliar a eficiência do aterro em relação a sua operação e controle ambiental (CONDER- Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia).

3.3.2 Principais tecnologias utilizadas na operação de aterros sanitários, quanto à disposição e compactação dos resíduos

Considerando que o objetivo principal de um aterro sanitário é proporcionar um local seguro e controlado para o descarte de resíduos, minimizando os impactos ambientais e promovendo a sustentabilidade. Tem-se como uma das etapas mais

importantes no processo de disposição de resíduos em aterros sanitários a compactação, sendo dito por Marques (2001) que:

“A compactação dos resíduos apresenta-se como fator de elevada importância nas operações de aterros sanitários, visto que maiores densidades implicam, por um lado, volumes adicionais de disposição e conseqüentemente maior vida útil para os aterros, e por outro, maiores resistências, melhorando assim a estabilidade dos maciços [...] No tocante à estabilidade de aterros sanitários, JENEIVAN et al. (1996) mostram que o aumento da rigidez dos resíduos, traduzida, por exemplo, pela maior compactação dos mesmos, conduz a maiores fatores de segurança, ou de outra forma, possibilita com igual segurança operar aterros com alturas mais elevadas. DE VITO7 (apud OWEIS & KHERA, 1986) recomenda a aplicação gradual de equipamentos de compactação (pesos operacionais e número de passadas), para obtenção da máxima eficiência do processo, em termos da antecipação dos recalques esperados [...]”

A compactação adequada é essencial para maximizar o espaço disponível no aterro, minimizando a necessidade de novas áreas para deposição de resíduos. Para isso, as duas formas de compactação utilizadas atualmente são a compactação estática e a compactação dinâmica.

A compactação estática é a técnica mais comum e simples de compactação de resíduos em aterros sanitários. Ela envolve o uso de equipamentos de compactação, como tratores ou rolos compressores, para comprimir os resíduos em camadas. Por outro lado, a compactação dinâmica é uma abordagem mais avançada que emprega equipamentos de compactação específicos, como compactadores de pneus ou cilindros vibratórios, que aplicam pressão adicional nas camadas de resíduos. Além disso, é importante destacar que existe o controle de compactação, que se refere tanto ao número de passagens do maquinário sobre os resíduos quanto à espessura média dos resíduos sobre os quais o maquinário atua, estando o aterro responsável por este procedimento.

Outra tecnologia importante na disposição de resíduos em aterros sanitários é a técnica de cobertura diária. Após a deposição dos resíduos, a área é coberta com camadas de terra para minimizar os odores, reduzir a proliferação de vetores e ajudar a estabilizar a massa de resíduos. A técnica de cobertura diária é essencial para garantir a operação segura e sustentável do aterro sanitário.

A escolha desse solo de cobertura depende do tipo de cobertura a ser realizada sobre o RSU, podendo ser inertes, derivadas de resíduos e artificiais. Para cobertura diária e intermediária deve ser usado areia permeável e porosa, considerando que são de fácil espalhamento e compactação, além de auxiliar na decomposição dos resíduos. Já para a cobertura final o solo deve resistir à erosão pelas chuvas, ter baixa permeabilidade e suportar o crescimento de plantas, como é o caso do solo argiloso.

Nesse processo de compactação, os solos de cobertura devem ser compactados uniformemente para formar uma baixa barreira de permeabilidade no topo e nas encostas do aterro. De acordo com um relatório publicado pela *Western Mindanao State University*, chamado "*Improving Landfill Operation*", em seu capítulo 5, a cobertura final da célula do aterro sanitário deve ter inclinação de 2 a 3% para que a chuva não acumule, e nas encostas laterais devem ter um gradiente de 20 a 30°.

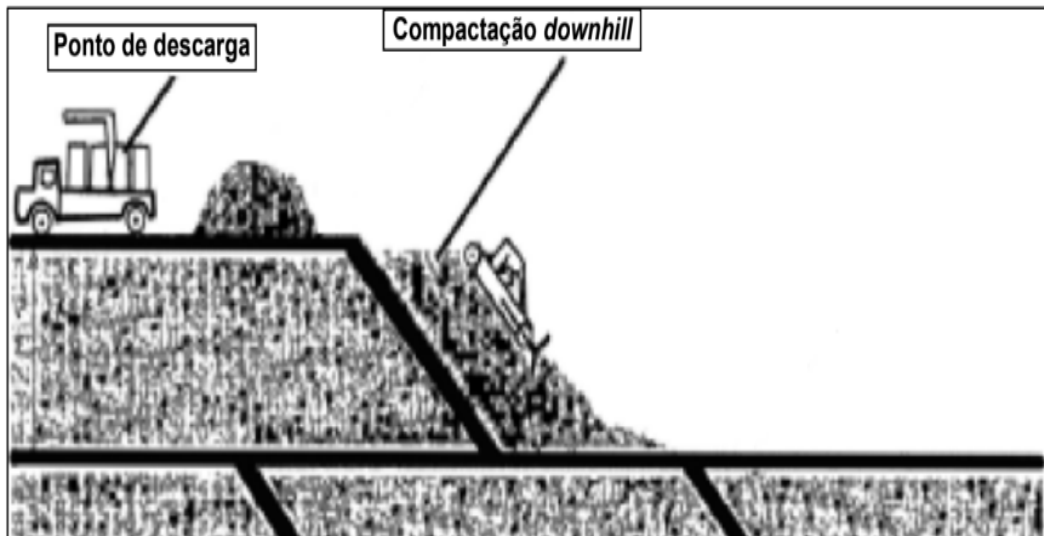
Quanto aos métodos de compactação, de acordo com ISWA (2019), não existe método estritamente melhor que o outro, considerando que cada unidade de aterragem apresenta características individualizadas, que vão desde a tipologia dos resíduos recebidos, até a geometria do local de operação. Mesmo assim, é importante avaliar as particularidades de cada método de compactação para se definir qual trará maiores benefícios para a atual situação do aterro sanitário.

3.3.2.1 *Downhill e Uphill*

A ISWA (International Solid Waste Association) define dois dos principais métodos de compactação de resíduos *uphill* e *downhill*, cada um apresentando as abordagens distintas que serão descritas a seguir.

Para a aplicação do método *downhill* os resíduos são descarregados na parte superior da célula de disposição. Esses resíduos são então gradualmente empurrados de cima para baixo, à medida que o maquinário de compactação avança descendo a célula. A compactação dos resíduos ocorre enquanto o maquinário se move, exercendo pressão sobre os resíduos e, assim, reduzindo seu volume. O resultado final é uma célula de disposição final onde os resíduos estão comprimidos e estabilizados, como mostra a Figura 6.

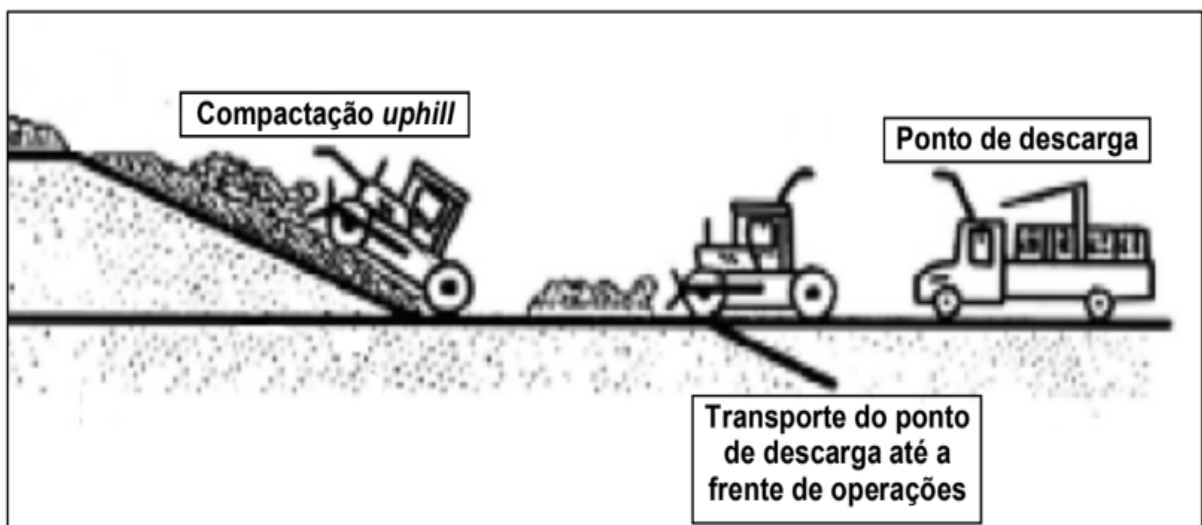
Figura 6 - Método de compactação *downhill*.



Fonte: Alta Geotecnia Ambiental - Nota Técnica.

Por outro lado, o método *uphill* apresenta uma abordagem inversa. Este envolve o posicionamento do ponto de descarga na parte mais baixa da célula de disposição. Esse ponto de descarga é estrategicamente localizado para permitir que os resíduos sejam empurrados até a frente das operações. Uma vez na frente das operações, os resíduos são então espalhados na área designada para a disposição final. Nesse cenário, o maquinário de compactação atua sobre a célula, subindo morro acima, aplicando pressão conforme maquinário utilizado para compactar os resíduos de forma eficaz, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Método de compactação *uphill*.



Fonte: Alta Geotecnia Ambiental - Nota Técnica.

Vale ressaltar, de acordo com a “Nota Técnica – Métodos de compactação e camada de cobertura.” feita pela Orizon que não existe uma única abordagem de compactação que seja superior a todas as outras em todos os cenários. Cada aterro sanitário apresenta características específicas. Portanto, a escolha entre os métodos de compactação deve ser baseada em uma análise criteriosa das diversas variáveis envolvidas.

Nesse contexto, ainda de acordo com a Nota, o método *uphill* se destaca com um conjunto diversificado de características que podem orientar a tomada de decisão em cenários específicos. Este método oferece a vantagem de conferir um controle mais apurado sobre o tamanho da frente de operações, facilitar a manutenção da compactação dos resíduos, minimizar o acúmulo de detritos, reduzir a extensão das vias de acesso dos caminhões até a zona de descarga, entre outros benefícios. Contudo, como desvantagem ele demanda um maior consumo de combustível, uma vez que os tratores necessitam constantemente empurrar os resíduos para cima. Além disso, o maquinário tende a afundar de maneira mais pronunciada nos resíduos, acelerando o desgaste dos equipamentos e aumentando o risco de deslizamentos em períodos chuvosos. Não menos importante, a utilização do método *uphill* por fim resulta em custos mais elevados de operação e manutenção.

Por sua vez, o método *downhill* também possui suas próprias vantagens e desvantagens a serem consideradas. Este método se destaca pela redução de custos operacionais e pelo menor desgaste dos equipamentos, já que a gravidade é aproveitada como aliada. Além disso, ele contribui para diminuir o risco de superaquecimento dos tratores, impulsiona a produtividade e reduz as probabilidades de deslizamentos durante períodos chuvosos. Entretanto, é de suma importância ponderar que os resíduos podem se dispersar de maneira mais descomplicada, potencialmente rolando ou caindo livremente da borda do maquinário de compactação. Isso, por sua vez, pode resultar em áreas menos estáveis e com menor nível de compactação.

No aspecto prático, é viável implementar estratégias para lidar com os desafios intrínsecos a cada método. Como exemplo, no caso do *downhill*, é possível empregar rampas com inclinações menores, o que pode contornar as dificuldades relacionadas à compactação. Similarmente, no método *uphill*, medidas podem ser tomadas para minimizar os riscos de deslizamentos durante períodos chuvosos.

Em síntese, a decisão entre optar pelo método *uphill* ou *downhill* para a compactação de resíduos sólidos não é uma escolha de caráter unidimensional. As peculiaridades inerentes a cada método, devem ser submetidas a uma avaliação, levando em consideração as variáveis apontadas. No entanto, vale ressaltar que, dependendo das condições geométricas, climáticas e adversas presentes em um aterro sanitário, ambos os métodos podem ser empregados de maneira combinada e intercalada. Essa abordagem híbrida permite a otimização das vantagens oferecidas por cada método, ao mesmo tempo em que atenua as desvantagens inerentes a cada um.

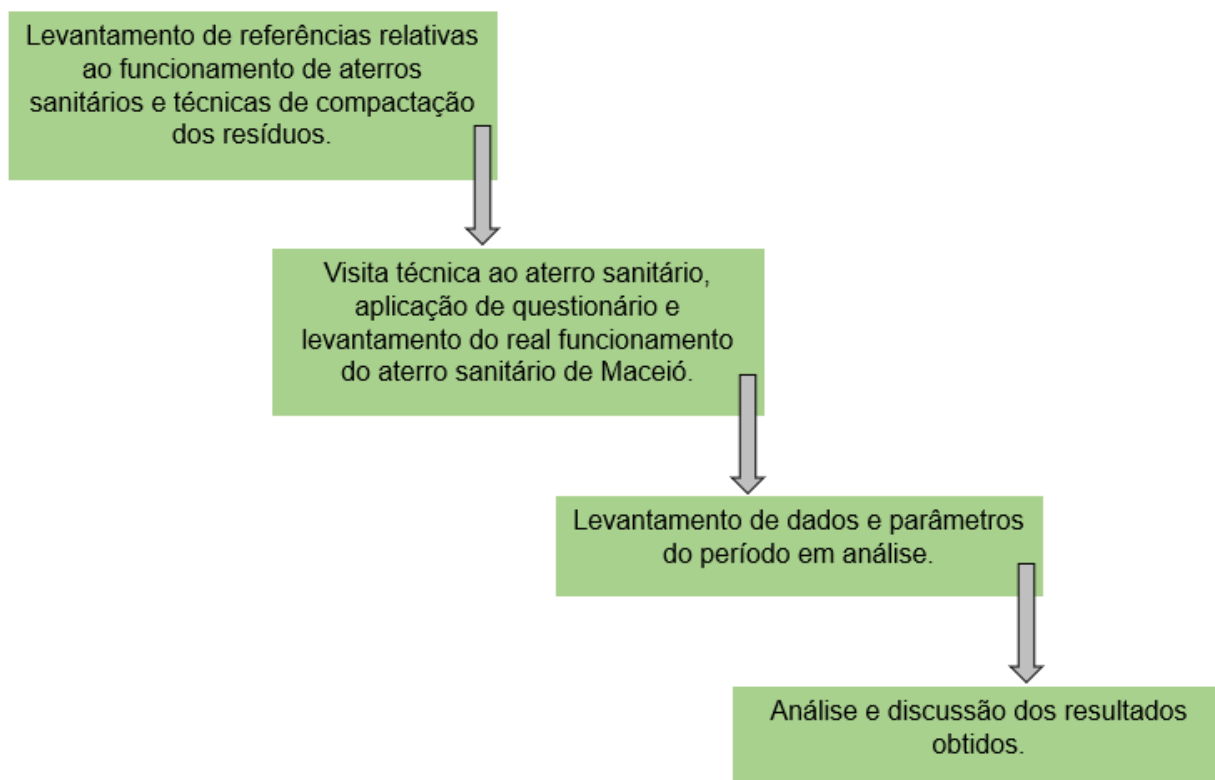
Ao adotar uma estratégia flexível que integra os pontos fortes do método *uphill* e *downhill*, é possível adaptar-se de maneira inteligente às circunstâncias variáveis que o aterro enfrenta. Portanto, a decisão sobre qual método empregar não deve ser vista como uma escolha excludente, mas sim como uma oportunidade de criar sinergias e otimizar o desempenho operacional do aterro sanitário, considerando um cenário multifacetado de desafios e possibilidades.

4 METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em duas etapas: caracterização do aterro sanitário do Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió e avaliação da eficiência das técnicas de compactação de resíduos.

Para atingir os objetivos, o plano metodológico desenvolvido incluiu revisão bibliográfica com o levantamento das características do CTR de Maceió, através de visita técnica, e análise de dados coletados referentes a massa específica dos CTRs de Maceió, João Pessoa e Jaboatão do Guararapes, como é apresentado no Fluxograma na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma.



Fonte: Autores, 2023.

Para a construção da revisão bibliográfica, foi realizada pesquisa de artigos científicos e diversos materiais sobre aterro sanitário, seu funcionamento, técnicas e estratégias de compactação dos resíduos sólidos em diferentes aterros.

Ainda durante estes levantamentos, foram realizadas visitas técnicas ao aterro sanitário de Maceió, a fim de avaliar seu funcionamento, verificar sua operação e coletar dados. Essa análise envolveu a avaliação da estrutura do aterro,

da equipe responsável pela gestão dos resíduos, dos equipamentos utilizados e dos processos adotados.

Visando realizar uma investigação das estratégias de compactação dos resíduos sólidos, no aterro sanitário de Maceió, em comparação com os de Jaboatão dos Guararapes e João Pessoa, este estudo foi baseado em dados da massa e volume dos resíduos mensais tratados no CTR que foram disponibilizados pela Orizon VR e Alta Geotecnia Ambiental, coletados dos três aterros, de forma a realizar uma análise comparativa das técnicas *uphill* e *downhill* considerando a massa específica total.

Com base nas informações relacionadas à gestão dos resíduos sólidos em aterros sanitários, é relevante a obtenção de dados precisos e confiáveis relativos à massa dos resíduos que são destinados mensalmente a esses locais. Este processo de aferição de massa é realizado por meio da utilização de balanças rodoviárias, as quais efetuam a pesagem dos veículos no momento de sua entrada e saída do aterro sanitário, permitindo, assim, a determinação do peso líquido dos resíduos transportados e que adentram o aterro.

Além disso, é fundamental destacar que a determinação do volume dos resíduos já compactados no interior do aterro é realizada por meio de técnicas de medição topográfica, as quais são aplicadas tanto antes da disposição dos resíduos como após a efetiva disposição e compactação dos mesmos. Essa abordagem metodológica visa a quantificação do volume dos resíduos pós compactação, possibilitando, conseqüentemente, a obtenção da massa específica dos resíduos in loco. Esta grandeza é determinada mediante a relação entre a massa dos resíduos e o volume dos resíduos após o processo de compactação, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Equação da massa específica.

$$\mu = \frac{M}{V}$$

μ = massa específica

M = massa dos resíduos

V = volume dos resíduos

Fonte: Autores, 2023.

No contexto desta pesquisa, as informações obtidas a partir da metodologia supracitada foram organizadas em tabelas. Essas tabelas, que serão apresentadas e discutidas no próximo tópico, apresentam as massas específicas mensais dos

resíduos já compactados em cada um dos três aterros localizados na região Nordeste do Brasil. Importante enfatizar que, dada a heterogeneidade dos aterros e suas particularidades operacionais, cada um deles dispõe de dados referentes a diferentes períodos de monitoramento, aspecto que será considerado na análise dos resultados obtidos.

Com o intuito de sintetizar e compreender as variações da massa específica ao longo do período de disponibilidade de dados em cada aterro, optou-se pela aplicação da média aritmética, ilustrada na Figura 10. Essa abordagem estatística resultou na criação de uma nova tabela que se propõe a calcular não apenas a média geral da massa específica ao longo de todo o período observado em cada aterro, mas também as médias relativas a períodos específicos nos quais as técnicas *uphill* e *downhill* estiveram em vigor.

Figura 10 - Equação da média aritmética.

$$\chi = \frac{\Sigma x}{n}$$

χ = média do conjunto de amostras

Σx = somatório das amostras

n = número de dados da amostra

Fonte: Autores, 2023.

Prosseguindo na metodologia empregada, com base nas médias obtidas, procedeu-se à determinação do desvio padrão dos dados. O desvio padrão é uma medida estatística que quantifica a dispersão ou variabilidade dos valores em um conjunto de dados, ele foi calculado de acordo com a Figura 11. Em outras palavras, ele indica o quanto os dados se afastam da média. No contexto da análise de dados, o desvio padrão desempenha um papel fundamental, pois auxilia na compreensão da consistência ou variabilidade das observações. Quanto maior o desvio padrão, maior a dispersão dos dados, indicando uma maior variabilidade nos valores. Por outro lado, um desvio padrão menor sugere que os dados são mais homogêneos e próximos da média.

Figura 11 - Equação do desvio padrão.

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum(\chi_i - \chi)^2}{n}}$$

Dp = desvio padrão entre as massas específicas

χ_i = valor individual das massas específicas

χ = média do conjunto de amostras

n = número de dados da amostra

Fonte: Autores, 2023.

Assim, a análise do desvio padrão para a média geral e para cada técnica específica (uphill e downhill) possibilitará uma avaliação mais precisa da estabilidade e da uniformidade das massas específicas ao longo dos diferentes períodos de observação, contribuindo para uma análise mais robusta e significativa dos resultados obtidos nesta pesquisa.

Com a massa específica, média e desvio padrão obtidos, procedeu-se à análise desses dados, buscando identificar possíveis relações e padrões de comportamento relacionados à técnica utilizada na disposição de resíduos sólidos e seu potencial impacto na massa específica. No entanto, com o objetivo de mitigar erros e correlações espúrias, considerando a influência das condições climáticas, foram coletados dados meteorológicos de precipitação de estações meteorológicas localizadas o mais próximo possível de cada um dos três aterros estudados. É importante ressaltar que esses dados foram fornecidos por diferentes instituições, uma para cada aterro, devido à localização geográfica distinta de cada um deles em cidades diferentes do nordeste do Brasil.

Com base nos dados meteorológicos coletados, construiu-se uma tabela que apresenta a precipitação mensal total ao longo do período de estudo. Além disso, por meio da elaboração de gráficos que visualmente representam os dados de precipitação e massa específica, realizou-se uma análise mais aprofundada para verificar a possível influência do método de disposição de resíduos na massa específica dos aterros. Essa abordagem permitirá uma investigação mais abrangente das relações entre as variáveis em questão, contribuindo para a compreensão dos fatores que podem afetar a massa específica dos resíduos sólidos nos aterros sanitários na região do nordeste do Brasil.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do CTR de Maceió

A promulgação da Lei nº 12.305/2010, que criou a “Política nacional de resíduos sólidos”, PNRS, juntamente com o Decreto nº 7.404/2010, resultou na desativação do antigo lixão, situado no bairro da Cruz das Almas, e instalou a Central de Tratamento de Resíduos – CTR, no bairro Benedito Bentes, município de Maceió. Com as coordenadas geográficas: Latitude: -9.561214° ($09^{\circ}33'40.37''S$) e Longitude: -35.697483° ($35^{\circ}41'50.94''W$).

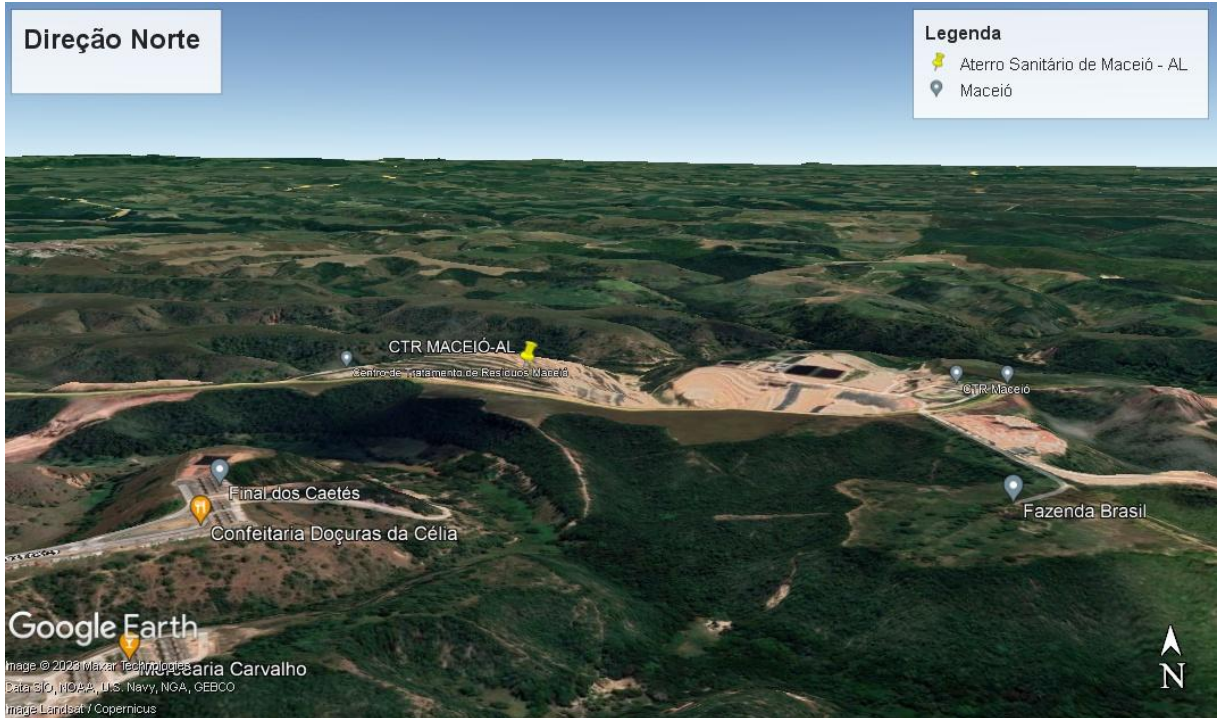
O início do seu funcionamento ocorreu no dia 30 de abril de 2010 com concessão de 20 anos, em uma área de 140 hectares, como mostra a Figura 12 e as diferentes posições de visualização do CTR de Maceió, por meio das Figuras 13 e 14, bem como o Anexo A que se refere à planta atualizada (2023) do Aterro Sanitário e o mapeamento do tipo de resíduo.

Figura 12 - Mapa Satélite do Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió.



Fonte: (Google Earth Pro, 2023) CTR Maceió, AL. Coordenadas $09^{\circ}33'40.37''S$ e $35^{\circ}41' 50.94''W$.

Figura 13 - Mapa Satélite do Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió - Direção Norte.



Fonte: (Google Earth Pro, 2023) CTR Maceió, AL. Coordenadas 09°33'40.37"S e 35°41'50.94"W.

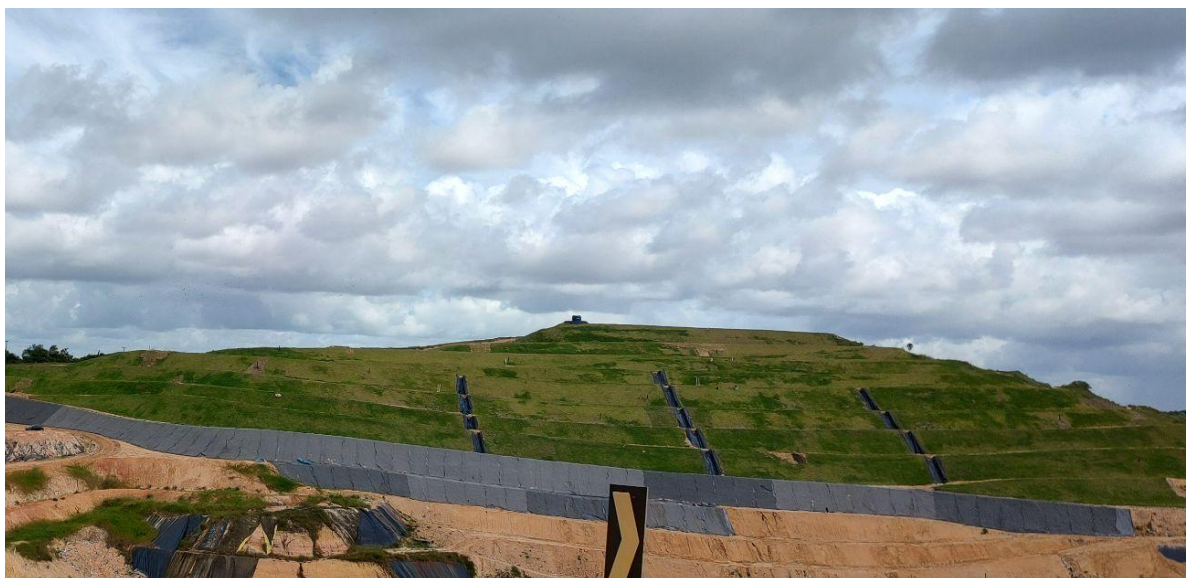
Figura 14 - Mapa Satélite do Centro de Tratamento de Resíduos de Maceió - Direção Sul.



Fonte: (Google Earth Pro, 2023) CTR Maceió, AL. Coordenadas 09°33'40.37"S e 35°41'50.94"W.

Atualmente, o aterro sanitário de Maceió é operado pela empresa Orizon Engenharia Ambiental, que assumiu em 16 de dezembro de 2022, e tem investido na modernização dos processos e monitoramento da planta, sendo uma de suas primeiras medidas ao assumir a gestão do CTR a renovação do maquinário. Outro ponto tratado foi a proteção dos taludes por grama, antes expostos, em seu estado final de compactação, como mostrou as Figuras 15 e 16. Segundo a gestão atual da Orizon em Maceió, desde janeiro de 2023, já foram implantados 30 mil metros quadrados de grama no CTR Maceió. A grama reduz a infiltração de água pluvial no talude, além de melhorar o aspecto visual do aterro. Outra proposta da Orizon é colocar, nos locais onde houver uma implantação em menos de 2 anos, manta de PEAD (mantas plásticas - polietileno de alta densidade), para auxiliar na impermeabilização de forma temporária.

Figura 15 - Placas de grama aplicadas sobre taludes compactados no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Figura 16 - Placas de grama aplicadas sobre taludes compactados no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Sobre a estrutura atual do aterro, ele conta com uma área de disposição chamada de Fase 1 (com cota de 75m a 80m com relação ao nível do mar) já encerrada. Já as Fases 3B e 4 (exclusivas para o tratamento de resíduos 2A) estão em operação, mas com previsão de finalização em cerca de 2 anos. Logo, está sendo utilizada uma malha plástica e um geotêxtil (RT07) por cima para diminuir processos erosivos no talude e a infiltração de água, como pode ser observado na Figura 17. Além disso, essas fases, que são compostas por várias células, podem ser observadas no Anexo B, bem como o tipo da geomembrana e suas respectivas áreas de aplicação.

Figura 17 - Fase 3B no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

O CTR de Maceió não faz o aproveitamento nem o tratamento do gás, somente queima, como mostra a figura 18. Mas, segundo a gestão, há uma previsão de implantação, ainda no segundo semestre de 2023, de uma planta de biogás que fará a captação dos gases gerados pela decomposição da matéria orgânica e seu aproveitamento com a geração de energia através da queima. A estimativa do volume de gás que será coletado é de 3500m³/h.

Figura 18 - Queima de gás no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

No que se refere a captação de águas pluviais, a empresa fez a regularização dos canais de captação, sendo colocada geomembrana nos canais provisórios, pois são áreas que terão prováveis mudanças de cota. Já em canais permanentes, são utilizados colchões renos em forma de trapézio, com gabião ou pedra rachão.

O CTR de Maceió conta com uma estação de tratamento de chorume, como mostra a Figura 19, que funciona com tratamento físico-químico e osmose. Quando há uma grande produção de chorume, este é destinado para o tratamento externo em empresa terceirizada, levando em consideração que a estação de tratamento do aterro não foi projetada para tratar toda demanda de chorume que o aterro produz atualmente. Na célula de tratamento do chorume, são feitas análises do material bruto e tratado, segundo a CONAMA 430 que estabelece o padrão de qualidade de tratamento do chorume.

Figura 19 - Estação de Tratamento de Chorume no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Quando bombeado, o chorume vai para a piscina de processo aeróbico (onde ocorre a degradação por bactérias e há uma redução no DBO), o objetivo é remover a matéria orgânica dissolvida e em suspensão, e transformá-la em sólidos sedimentáveis (flocos biológicos) e gases, como mostra a Figura 20. Basicamente, o tratamento biológico reproduz os fenômenos que ocorrem na natureza, mas em menor tempo.

Em seguida, o efluente vai para a lagoa pré-aerada, como mostra a Figura 21 onde haverá novamente a redução de DBO, sem adição de substância química, o processo todo é realizado por aeradores colocados no fundo da piscina, que injetam oxigênio através de mangotes. Conforme as discussões realizadas durante a visita técnica, observou-se que a lagoa apresenta concentrações de DBO de aproximadamente 4000 mg/L a 5000 mg/L. Quando o chorume é introduzido na unidade de pré-aeração, suas concentrações de DBO situam-se em torno de 1500 mg/L a 1000 mg/L. Posteriormente, ao ser transferido para o tanque de tratamento, as concentrações de DBO são reduzidas para valores na faixa de 300 mg/L a 200 mg/L.

Nesse tanque de tratamento, são introduzidas soluções químicas, como coagulante ou pó de cloreto, a fim de promover a remoção de partículas sólidas

presentes no chorume. O chorume tratado resultante é, então, direcionado para acumulação na piscina de efluente tratado, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 20 - Piscina de chorume na estação de tratamento de chorume do CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Figura 21 - Lagoa pré-aerada na estação de tratamento de chorume do CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Para comportar um volume maior de chorume está sendo feita uma piscina de chorume, com o propósito de comportar 1000m³ de chorume. O aterro possui outorga para o lançamento de até 300m³/dia de chorume tratado no rio da Alegria, que passa próximo ao aterro, como mostra a Figura 23.

Figura 22 - Piscina de efluente tratado na estação de tratamento de chorume do CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Figura 23 - Rio da Alegria no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Quanto ao monitoramento geotécnico, este é feito através de piezômetros e placas de recalque, como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Instrumento geotécnico e placa de recalque no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

O funcionamento do aterro sanitário se dá por meio da disposição final dos resíduos sólidos em células que são revestidas por uma manta impermeável para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Os resíduos são dispostos em camadas, com posterior compactação e cobertura de 30cm com solo para evitar a proliferação de vetores de doenças e mau cheiro.

O aterro iniciou nas cotas de 20 a 30m em relação ao nível do mar e atualmente tem células com cerca de 75m de cota. Seu funcionamento se dá 24h por dia, por isso eles não utilizam camada de cobertura temporária ao longo do dia, mas operam por faixa, onde ocorre a cobertura com solo na finalização de cada faixa. Além disso, não há um tempo determinado para finalização da faixa, pois depende da variação da captação de resíduos.

Nesse processo de compactação dos resíduos são utilizados tratores e rolo de compactação, como se vê na Figura 25. Apesar da Orizon trabalhar com uma praça (área de trabalho) pequena e organizada, como mostra a Figura 26, ainda

conta com excessivos vetores (Urubu, garça, carcará, pombo e entre outros), uma herança das empresas passadas que trabalhavam com uma praça muito grande e sem cobertura que ao longo dos anos fez com que a fauna da região crescesse e se acostumasse com o ambiente para coleta de alimentos.

Figura 25 - Equipamentos utilizados na compactação de resíduos no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Figura 26 - Praça de tratamento de resíduos no CTR de Maceió.

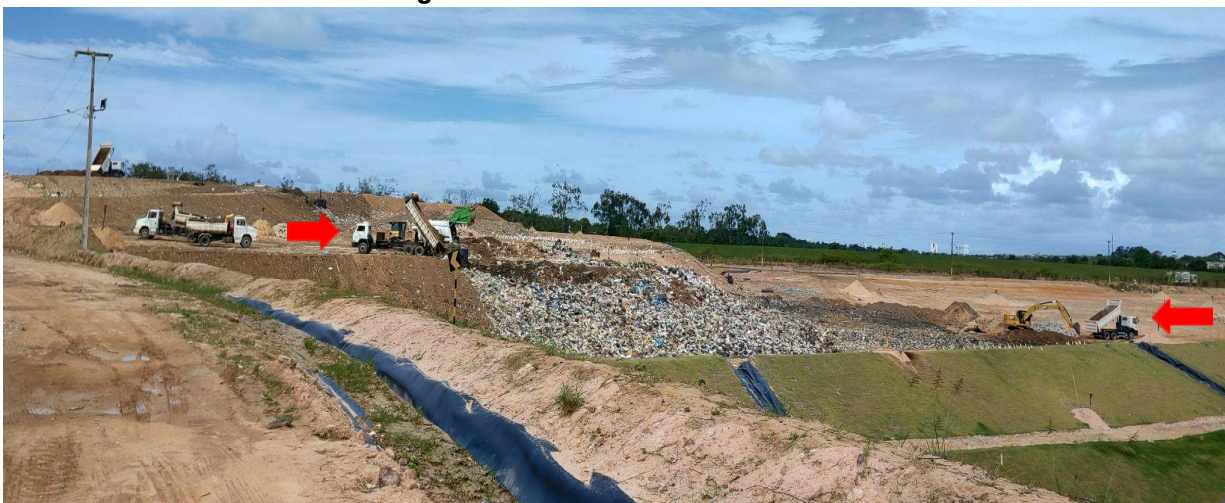


Fonte: Autores (2023).

A técnica de disposição de resíduos utilizada, atualmente, no CTR Maceió é o *downhill*, onde é necessário que haja um trator por praça, na parte mais baixa, fazendo a remoção das camadas do solo de cobertura temporária das faixas para o lançamento de uma nova camada de resíduos. Já em cima, onde é lançado o

resíduo, ficam tratores e o rolo compactador, que passa constantemente, ao longo da descarga dos caminhões de lixo. Além disso, a cada nível, como é necessário coletar o chorume produzido, são feitas valas e colocadas britas de forma a permitir a movimentação e o direcionamento para a coleta do chorume do interior do aterro. Já no ponto de localização do tubo, é feita uma gaiola com tela de aço e brita. Todo esse processo pode ser visualizado na Figura 27 e na Figura 28 que remetem a Fase 3B (Operação atual). A previsão da vida útil desta etapa é até Julho de 2023, em seguida a gestão do aterro prevê a expansão Fase 4 com vida útil até setembro de 2031, como pode ser visualizado no Anexo C.

Figura 27 - Downhill no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

Figura 28 - Gaiola de espera para controle de pressão do chorume no CTR de Maceió.



Fonte: Autores (2023).

5.2 Análise da influência do tipo de compactação na massa específica

5.2.1 Considerações prévias à análise

A análise de dados é um passo crucial na investigação das técnicas de disposição de resíduos em aterros sanitários, visto que proporciona percepções fundamentais para compreender a eficiência e as variações das abordagens adotadas. Este tópico tem como objetivo apresentar uma análise dos dados coletados de três Centros de Tratamento de Resíduos (CTR) situados no Nordeste do Brasil: CTR de João Pessoa na Paraíba, CTR de Jaboatão dos Guararapes em Pernambuco e CTR de Maceió em Alagoas. Tais dados foram disponibilizados pela Orizon, responsável pela gestão dos referidos CTRs.

É de suma importância ressaltar que os dados coletados englobam o período da pandemia de COVID-19, que foi oficialmente reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 11 de março de 2020. A pandemia trouxe consigo impactos profundos nos padrões de produção, consumo e comportamento da população global, e o Brasil não escapou dessas transformações. As mudanças nos

hábitos de consumo e nos modelos de produção tiveram um efeito direto nas características dos resíduos gerados, o que por sua vez pode ter influenciado os dados de densidade de resíduos compactados sob análise.

Nesse contexto, o presente estudo se depara com o desafio de avaliar a densidade de resíduos compactados em CTRs durante um período de mudanças significativas nos padrões de consumo e produção. A análise desses dados permitirá investigar se as técnicas de disposição de resíduos adotadas nos CTRs têm influência direta e significativa na densidade final dos resíduos compactados.

Em relação aos dados meteorológicos coletados, é fundamental destacar que esses dados consistem nas precipitações totais mensais, destinadas a serem comparadas com a massa específica média mensal de cada CTR estudado. Para a coleta desses dados climáticos, foram considerados os postos pluviométricos mais próximos aos CTR's, sendo os dados associados a esses postos fornecidos por instituições específicas através de suas respectivas plataformas digitais.

Para a cidade de João Pessoa, o posto pluviométrico analisado corresponde à estação CEDRES, cujos dados foram disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas. Esta estação está localizada aproximadamente na longitude 34°56'58" Oeste e latitude 7°13'01" Sul.

Já em Jaboatão dos Guararapes, o posto mais próximo ao CTR estudado foi o posto Jaboatão dos Guararapes (Bar. Duas Unas), e os dados correspondentes foram fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Climas. A localização aproximada deste posto é de longitude 35°2'19.609" Oeste e latitude 8°5'31.429" Sul.

Por fim, em relação a Maceió, o posto pluviométrico mais próximo ao CTR estudado foi o posto Maceió - B. Bentes 1, e os dados associados foram disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. A localização aproximada deste posto é de longitude 35°43'37.4" Oeste e latitude 9°33'06.7" Sul.

5.2.2 CTR João Pessoa - Paraíba

O presente tópico tem como objetivo realizar uma análise detalhada dos dados coletados no Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de João Pessoa - Paraíba que foram disponibilizados pela Orizon, com foco nas duas técnicas distintas de disposição de resíduos utilizados ao longo do período analisado.

Conforme apresentado na Tabela 1, o CTR de João Pessoa fez uso da técnica *uphill* como método de disposição de resíduos de janeiro a agosto de 2021. Posteriormente, a técnica foi substituída pela técnica *downhill*, que tem sido utilizada desde setembro de 2021. A troca de técnicas de disposição e compactação representou uma mudança na operação do aterro, onde cada uma dessas abordagens apresenta particularidades em relação à disposição e à distribuição dos resíduos, o que pode ter efeitos distintos sobre a eficiência da compactação.

Tabela 1: Massa específica dos resíduos nos períodos levantados - Aterro Sanitário de João Pessoa

Massa Específica de 2021 a 2023 (t/m ³) - João Pessoa												
ANOS	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2021	1,07	0,98	1,23	0,92	1,25	0,87	1,19	1,05	1	1,07	1,19	1
2022	1,16	1,05	1,07	1,38	1,49	1,35	1,14	1,14	1,09	1,24	1,16	1,25
2023	1,29	1,06										

 *uphill*

 *downhill*

Fonte: Autores (2023).

Durante os meses de setembro a dezembro de 2021, não há dados disponíveis sobre a técnica *uphill*, uma vez que esta foi descontinuada em agosto de 2021. Isso cria um cenário desafiador, pois inviabiliza a possibilidade de comparar diretamente os mesmos meses em anos consecutivos. Em contrapartida, para os demais meses do período analisado, é possível realizar uma comparação mensal, por ano, entre as duas técnicas, permitindo uma análise mais abrangente de seu desempenho e eficiência.

Com base na Tabela 2, foi calculada a média da massa específica de todo o período disponível, que resultou em 1,14 t/m³, valor este que servirá como referência para analisar as médias totais de cada técnica considerando todo o período em que estas estavam em execução. Observa-se que a média total para o período em que a técnica *uphill* estava sendo utilizada foi de 1,07 t/m³, enquanto a técnica *downhill* registrou uma média de 1,17 t/m³ em todo o período em que a técnica esteve em vigor. Verifica-se, assim, uma diferença na média de 0,10 t/m³ entre as duas técnicas. Essa discrepância resulta em 103,9 kg/m³ a mais de resíduos sendo

dispostos no mesmo espaço quando se utiliza a técnica *downhill* em comparação com a técnica *uphill*.

Tabela 2: Média da Massa Específica (t/m³) - João Pessoa

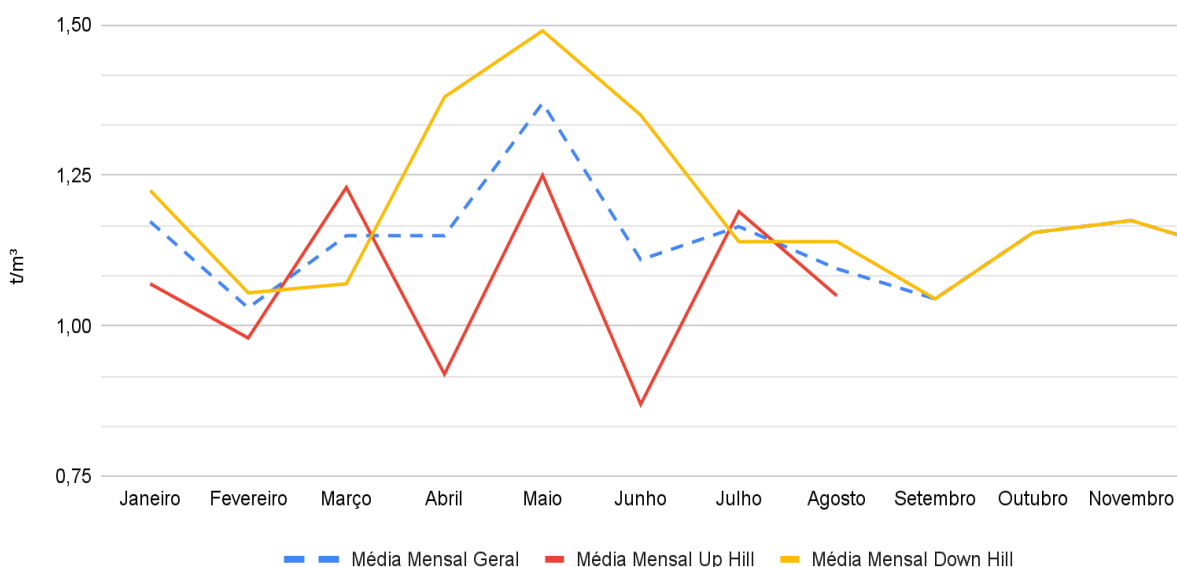
Média da Massa Específica (t/m ³) - João Pessoa	
Média de Todo o Período (t/m ³):	1,14
Média <i>uphill</i> (t/m ³):	1,07
Média <i>downhill</i> (t/m ³):	1,17

Fonte: Autores (2023).

Contudo, é importante destacar que, apesar da diferença nas médias gerais, são notadas algumas variações dentro de cada técnica ao longo dos meses analisados. Por exemplo, entre maio e junho de 2021, foi constatada uma diferença de 1,25 t/m³ para 0,87 t/m³, indicando uma variação significativa na densidade de compactação dentro da técnica *uphill*. No mesmo período em 2022, houve novamente uma queda na densidade em junho quando comparada a maio, porém com densidades maiores que em 2021, sendo maio com 1,49 t/m³ e junho com 1,35 t/m³, é possível portanto que essas quedas na massa específica estejam relacionadas com o período chuvoso na região, além disso os resíduos com um teor de umidade maior apresenta uma maior dificuldade na compactação, pois para que esta ocorra é necessário expulsar a água que antes ocupava o volume de vazios internamente aos resíduos.

Além disso, observa-se que, durante todo o período em que a técnica *downhill* foi adotada, a densidade de compactação dos resíduos se manteve sempre acima de 1 t/m³, diferentemente do período em que a técnica *uphill* foi utilizada. Nos meses de fevereiro, abril e junho do período *uphill*, a densidade ficou abaixo de 1 t/m³, como pode ser facilmente identificado pela Figura 29. Essa diferença nas medidas de densidade entre as técnicas pode ser atribuída às características de cada abordagem e à forma como os resíduos são dispostos no aterro. Ainda assim, conforme corroborado pela Tabela 3, tem-se um desvio padrão pequeno, mostrando uma tendência de estabilidade na densidade de compactação dos resíduos em torno da média geral para ambas as técnicas analisadas.

Figura 29: Média Mensal Massa Específica (t/m³) - João Pessoa



Fonte: Autores (2023).

Tabela 3: Desvio Padrão da Massa Específica (t/m³) - João Pessoa

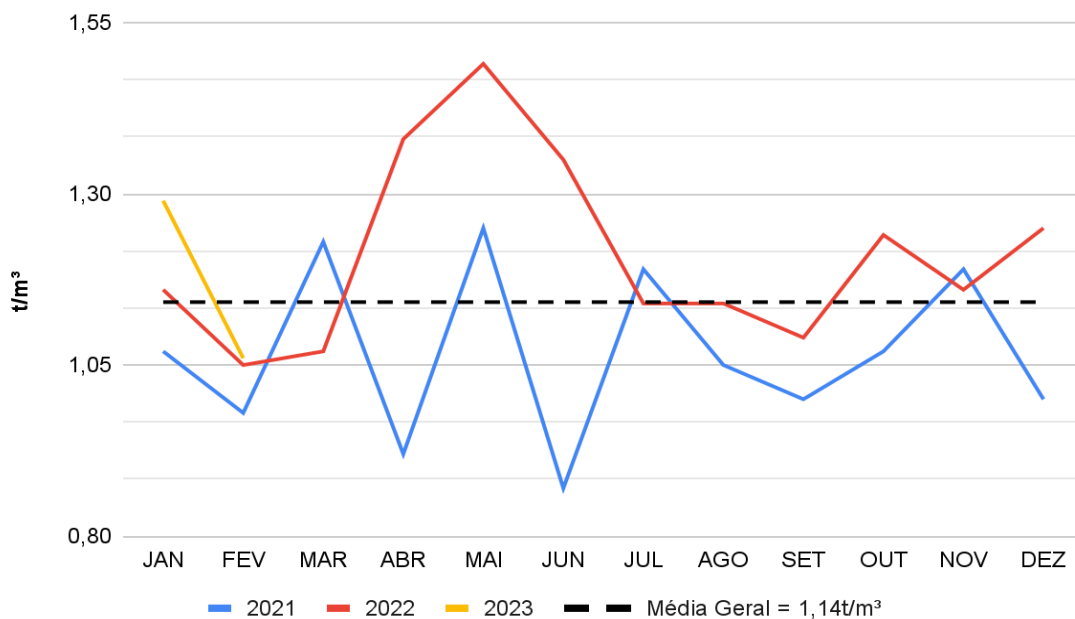
Desvio Padrão da Massa Específica (t/m³) - João Pessoa	
Desvio Padrão de Todo o Período (t/m³):	0,14
Desvio Padrão uphill (t/m³):	0,13
Desvio Padrão downhill (t/m³):	0,13

Fonte: Autores (2023).

A análise visual das Figuras 30 e 31 revelam variações interessantes na densidade dos resíduos compactados, principalmente entre os meses de março a julho. Então, levantou-se a hipótese de que tais variações poderiam estar relacionadas ao aumento das chuvas nessa época do ano, porém, ao serem observados os dados referentes à precipitação mensal total nesta época (Figura 32), não observou-se uma correlação entre a precipitação e a variação da massa específica dos resíduos, porém vale destacar que o comportamento do maquinário na praça de trabalho pode se alterar por conta das chuvas, uma vez que com o solo alagado pode-se tornar mais complicada a movimentação e compactação dos resíduos sólidos. Em 2021, por exemplo, foi observada uma considerável flutuação na densidade durante esses meses, com valores variando de 1,23 t/m³ em março a

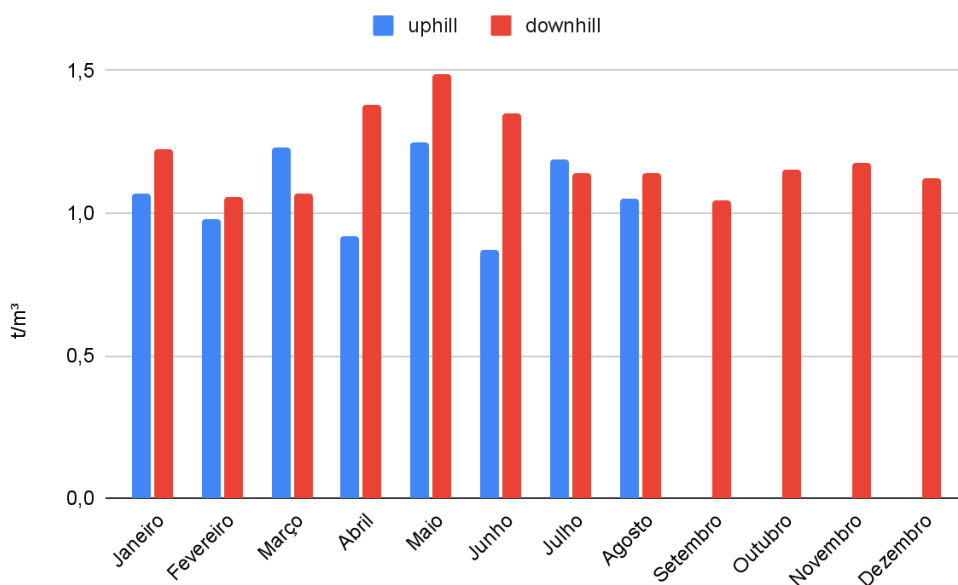
0,87 t/m³ em junho. Em contraste, em 2022, a densidade apresentou uma tendência relativamente estável, com valores de 1,38 t/m³, 1,49 t/m³ e 1,35 t/m³ nos meses de abril, maio e junho, respectivamente.

Figura 30: Massa Específica (t/m³) - João Pessoa



Fonte: Autores (2023).

Figura 31: Média Mensal por Técnica (t/m³) - João Pessoa



Fonte: Autores (2023).

As Tabelas 4 e 5 apresentam as médias mensais de forma geral e por método, respectivamente. É importante destacar que nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, não há informações disponíveis sobre a técnica *uphill* no CTR de João Pessoa, resultando na ausência de médias mensais anuais nesse período. Além disso, a Figura 30 proporciona uma compreensão visual do comportamento médio mensal ao longo dos anos analisados, ilustrando como a densidade dos resíduos compactados variou. Esses achados corroboram com as informações previamente discutidas, ressaltando um período de considerável oscilação entre março e julho, enquanto observam-se variações menos pronunciadas nos demais meses.

Tabela 4: Médias Mensais (t/m³) - João Pessoa

Médias Mensais (t/m ³) - João Pessoa												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2021 a 2023	1,17	1,03	1,15	1,15	1,37	1,11	1,17	1,10	1,05	1,16	1,18	1,13

Fonte: Autores (2023).

Tabela 5: Médias Mensais por Técnica (t/m³) - João Pessoa

Médias Mensais por Técnica (t/m ³) - João Pessoa												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<i>uphill</i> jan/21 a ago/21	1,07	0,98	1,23	0,92	1,25	0,87	1,19	1,05	-	-	-	-
<i>downhill</i> set/21 a fev/23	1,23	1,06	1,07	1,38	1,49	1,35	1,14	1,14	1,05	1,16	1,18	1,13

Fonte: Autores (2023).

Com base nas médias mensais anuais, foi possível elaborar a Tabela 6, a qual analisa o percentual de variação entre as técnicas, o percentual de variação em relação à média com a utilização do Método *uphill* e o percentual de variação em relação à média com a utilização do Método *downhill*.

Tabela 6: Comparativo de Médias - João Pessoa

Médias Comparativo de Médias - João Pessoa						
Mês	Média uphill (t/m ³)	Média downhill (t/m ³)	Média Mensal (t/m ³)	% de variação entre as técnicas	% de variação em relação à média - Método uphill	% de variação em relação à média - Método downhill
Janeiro	1,07	1,23	1,17	0,14	0,10	0,04
Fevereiro	0,98	1,06	1,03	0,08	0,05	0,02
Março	1,23	1,07	1,15	-0,13	-0,07	-0,07
Abril	0,92	1,38	1,15	0,50	0,25	0,17
Maio	1,25	1,49	1,37	0,19	0,10	0,08
Junho	0,87	1,35	1,11	0,55	0,28	0,18
Julho	1,19	1,14	1,17	-0,04	-0,02	-0,02
Agosto	1,05	1,14	1,10	0,09	0,04	0,04
Setembro	-	1,05	1,05	-	-	0,00
Outubro	-	1,16	1,16	-	-	0,00
Novembro	-	1,18	1,18	-	-	0,00
Dezembro	-	1,13	1,13	-	-	0,00

Fonte: Autores (2023).

Observa-se que os meses que apresentam maior variação percentual média entre as técnicas são abril e junho, com um aumento de 50% e 55,17% respectivamente. Além disso, nesses mesmos meses, ocorre uma variação percentual em relação à média para cada método quando comparados aos demais meses. Para o Método *uphill*, verifica-se que o percentual de variação em relação à média foi de 25% em abril e 27,59% em junho. Da mesma forma, considerando o Método *downhill*, os percentuais de variação em relação à média para esses meses foram de 16,67% e 17,78% respectivamente.

É possível também notar que os meses de julho e fevereiro apresentaram as menores variações percentuais médias entre as técnicas, registrando -4,20% e 7,65% respectivamente. Esses dados ressaltam a complexidade das variações sazonais nos resultados obtidos por meio das diferentes técnicas de disposição de resíduos, evidenciando a necessidade de considerar múltiplos fatores, como condições climáticas e operacionais, para uma análise completa e precisa.

Ao considerar os dados obtidos através da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs) (Figura 32), que disponibiliza informações sobre a precipitação mensal representados na Tabela 7, é possível identificar que os

meses compreendidos entre março e julho se destacam por apresentarem os índices mais elevados de precipitação ao longo do ano.

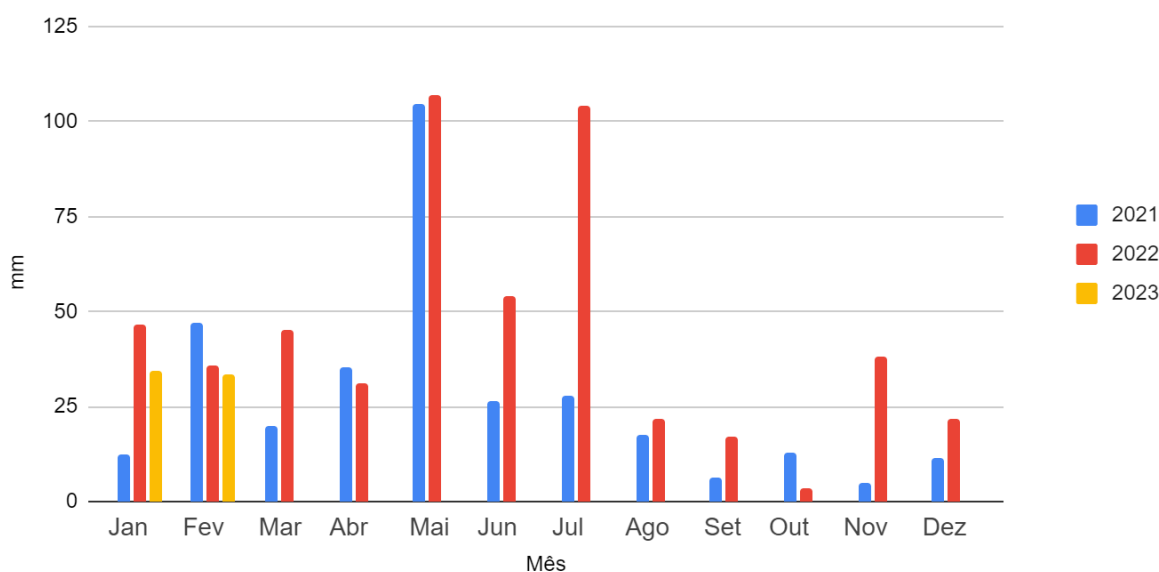
Tabela 7: Precipitação Mensal Total de 2021 a 2023 (mm) - João Pessoa

Precipitação Mensal de 2021 a 2023 (mm) - João Pessoa												
ANOS	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2021	12,2	47	19,8	35,5	104,8	26,3	27,80	17,50	6,4	13	4,8	11,7
2022	46,5	36	45	31	107,1	54,2	104,40	22,00	17	3,3	38	22
2023	34,4	33,4										

- UP HILL
- DOWN HILL

Fonte: Autores (2023).

Figura 32: Precipitação Mensal Total de 2021 a 2023 (mm) - João Pessoa



Fonte: Autores (2023).

Ao comparar esses dados climáticos com a Figura 29, que representa a densidade de compactação dos resíduos em relação ao período em que uma a técnica *downhill* é adotada, é possível perceber um padrão interessante. Nos meses de maio a julho, nos quais ocorrem as maiores precipitações anuais, observa-se um aumento na densidade de compactação dos resíduos durante a técnica *downhill*.

Entretanto, vale destacar uma limitação importante na interpretação desses dados. No que se refere à técnica *downhill*, os registros disponíveis abrangem

apenas o ano de 2022, especificamente durante os meses entre março e agosto. A ausência de informações de outros anos para o mesmo período torna complexa a elaboração de uma média mensal consolidada e confiável para análise. Apesar dessa restrição, a situação levanta a hipótese de que a técnica *downhill* pode apresentar maior eficiência na compactação dos resíduos em condições de solo mais úmido dado que no período chuvoso, ao se fazer uso da técnica *downhill*, a massa específica para o período apresentou-se maior que nos mesmos períodos quando se usando da técnica *uphill*, como aquelas observadas durante os meses de maior precipitação.

É importante salientar que a influência das condições climáticas na eficiência das técnicas de compactação é um aspecto complexo, influenciado por múltiplos fatores. Além das chuvas, outros elementos, como a composição dos resíduos, a capacidade de drenagem do solo, as práticas de manejo adotadas e até a cobertura de solo podem impactar os resultados observados.

5.2.3 CTR Jaboatão dos Guararapes - Pernambuco

Neste tópico, será abordada a análise dos dados provenientes do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) localizado em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco.

É relevante destacar, com base na Tabela 8, os períodos nos quais essas técnicas foram empregadas: a técnica *uphill* abrangeu o intervalo de julho de 2017 a junho de 2021, enquanto a técnica *downhill* foi implementada de julho de 2021 a fevereiro de 2023.

Tabela 8: Massa Específica de 2021 a 2023 (t/m³) - Jaboaão dos Guararapes

Massa Específica de 2021 a 2023 (t/m³) - Jaboaão dos Guararapes												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2017							1,48	0,98	1,02	1,03	1,01	1,23
2018	1,2	1,32	1,26	1,08	1,24	1,32	1,22	0,99	1,43	0,95	0,73	1,04
2019	1,48	1,06	1,02	1,03	1,14	1,3	1,53	1,09	1,04	1,33	1,2672	1,4
2020	1,5	1,51	1,3	1,26	1,28	1,05	1,3	1,16	1,19	1,17	1,21	1,27
2021	1,52	1,41	1,42	1,75	1,32	1,38	1,52	1,35	1,41	1,23	1,43	1,16
2022	1,18	1,17	1,17	1,4	0,85	0,91	1,24	1,41	1,1	1,27	1,18	1,28
2023	1,27	1,31										

■ uphill
■ downhill

Fonte: Autores (2023).

A partir dos dados da Tabela 9, foi calculada a densidade média geral dos resíduos, que ficou em torno de 1,24 (t/m³).

Tabela 9: Média da Massa Específica (t/m³) - Jaboaão dos Guararapes

Média da Massa Específica (t/m³) - Jaboaão dos Guararapes	
Média de Todo o Período (t/m³):	1,24
Média uphill (t/m³):	1,23
Média downhill (t/m³):	1,24

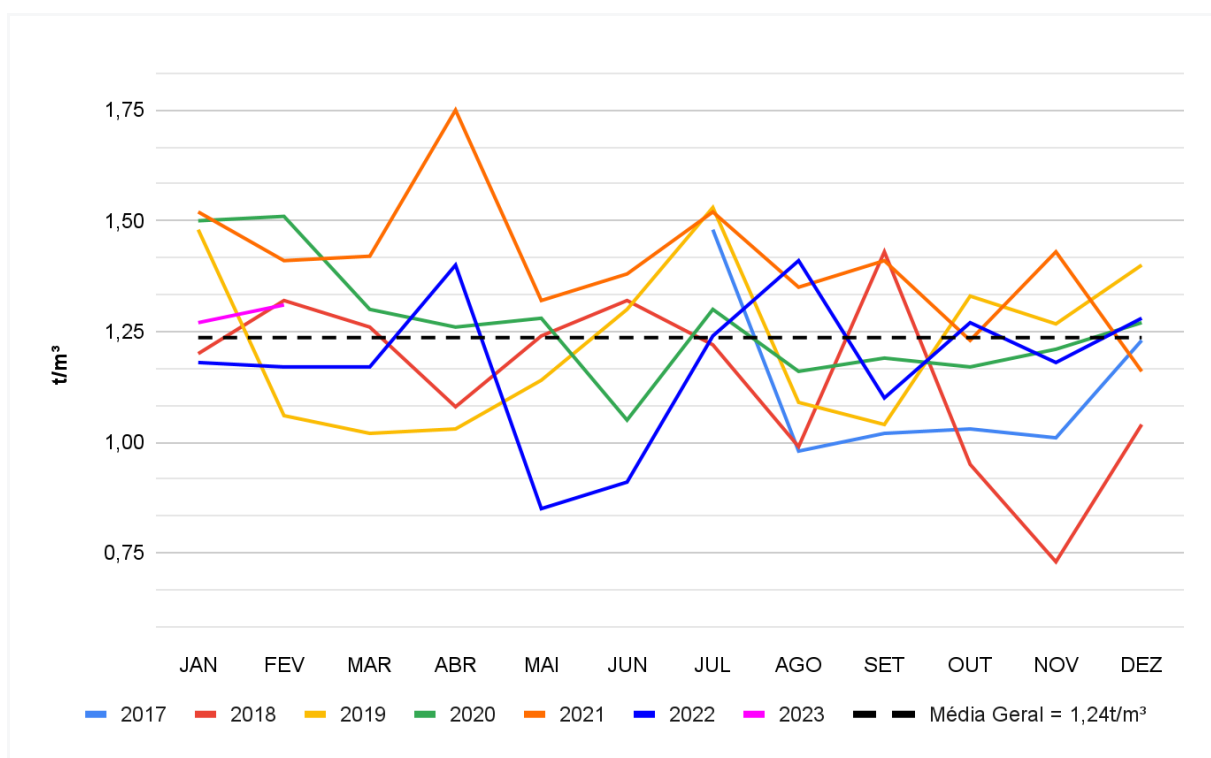
Fonte: Autores (2023).

Observa-se que durante o período em que a técnica *uphill* estava em vigor, a média total de densidade de compactação foi registrada em 1,23 t/m³. Por outro lado, a técnica *downhill* apresentou uma média de 1,24 t/m³. A diferença entre essas médias, que equivale a 0,018 t/m³ se traduz em uma redução de 18,40 kg/m³ de resíduos depositados no mesmo espaço quando se opta pelo uso da técnica *downhill*, em comparação com a técnica *uphill*.

Entretanto, apesar das diferenças nas médias gerais, as análises revelaram variações que podem ou não ser atribuídas a cada técnica ao longo dos meses examinados. Essas flutuações, que podem ser visualizadas na Figura 33, demonstram a importância de se realizar análises mensais. Por exemplo, entre

agosto e setembro de 2018, houve uma alteração de 0,88 t/m³ para 1,43 t/m³ na densidade de compactação dentro da técnica *uphill*. No mês seguinte, em outubro, ocorreu uma redução expressiva na densidade para 0,95 t/m³. Essa mesma variabilidade é observada na técnica *downhill*, destacando-se o período entre abril e maio de 2022, no qual a densidade de resíduos compactados caiu de 1,4 t/m³ para 0,85 t/m³. Logo, considerando as diversificadas características dos resíduos gerados e as condições ambientais mensais, a densidade de compactação pode ser sensivelmente afetada e apresentar oscilações, indicando variações acentuadas na eficácia de compactação dos resíduos ao longo dos meses.

Figura 33: Média Mensal Massa Específica (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes



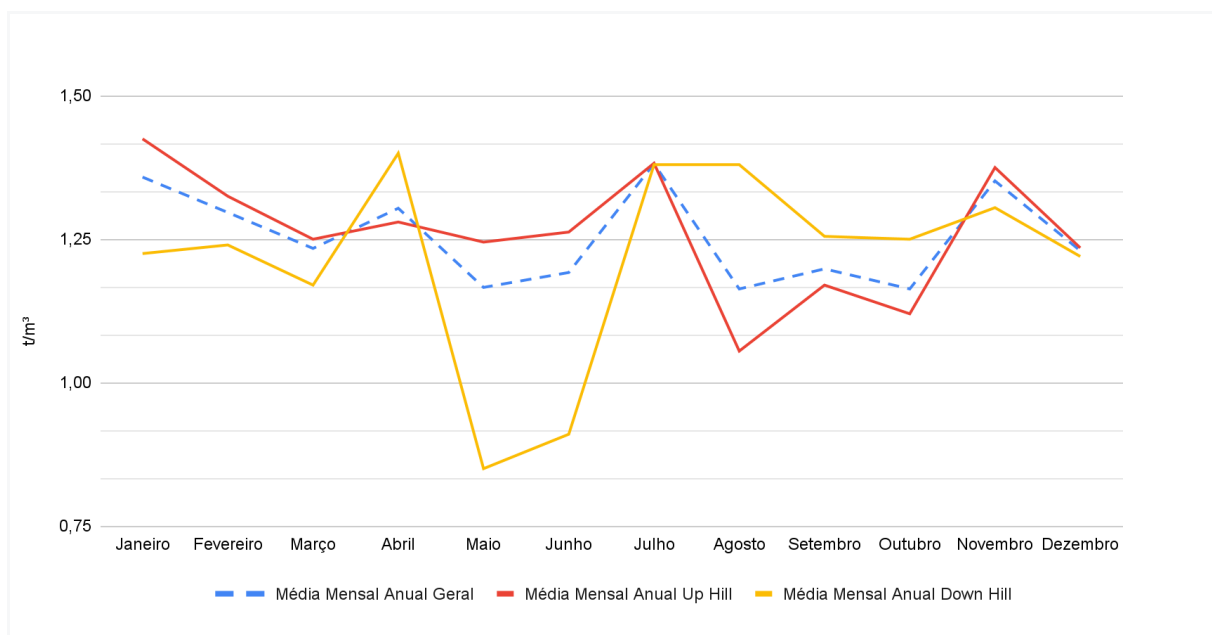
Fonte: Autores (2023).

Além disso, é interessante notar que, diferentemente do CTR de João Pessoa, a densidade de compactação dos resíduos se manteve majoritariamente acima de 1 t/m³ ao longo dos 68 meses analisados. Mesmo em seis meses excepcionais em que a densidade ficou abaixo de 1 t/m³, a proximidade a esse valor foi evidente. Porém, cada localidade possui particularidades distintas, o que pode culminar em resultados notavelmente diversos, a destacar, por exemplo,

características diferentes de relevo que culminam em regimes diferentes de precipitação local no aterro.

A Figura 34 evidencia uma estabilidade na densidade de compactação dos resíduos ao longo do período analisado, que se expressa verdadeiramente na forma de um desvio padrão baixo, conforme mostrado na Tabela 10. No entanto, destaca-se que determinados pontos se afastam consideravelmente da média, suscitando reflexões. Entre esses pontos, merecem destaque os meses de novembro de 2018, abril de 2021 e maio de 2022, que apresentaram densidades de 0,73 t/m³, 1,75 t/m³ e 0,85 t/m³, respectivamente. À esses meses diversos fatores podem ter contribuído para tal variação com relação à média, desde algum erro de medição topográfica a mudança sazonal nos hábitos de consumo na população e condições climáticas que possam ter dificultado a compactação.

Figura 34: Média Mensal Massa Específica (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes



Fonte: Autores (2023).

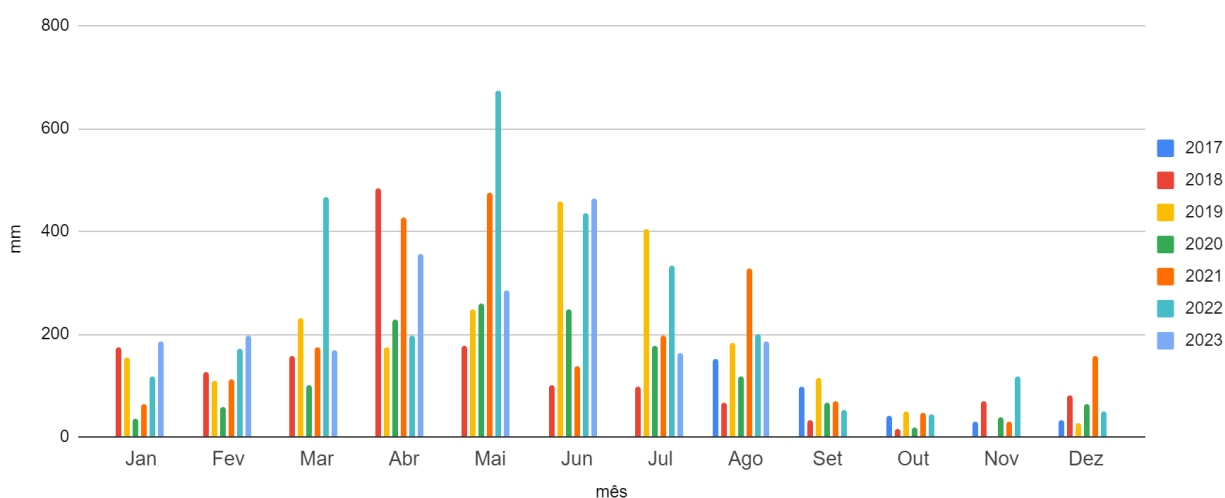
Tabela 10: Desvio Padrão da Massa Específica (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes

Desvio Padrão da Massa Específica (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes	
Desvio Padrão de Todo o Período (t/m³):	0,18
Desvio Padrão uphill (t/m³):	0,19
Desvio Padrão downhill (t/m³):	0,16

Fonte: Autores (2023).

É pertinente ressaltar que a tentativa de estabelecer uma correlação direta entre as médias mensais, e o período chuvoso em Jaboatão dos Guararapes revelou um cenário complexo. Nota-se que, segundo os dados fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC), apresentados na Tabela 14, os meses caracterizados por precipitações pluviométricas elevadas compreendem o período entre abril e julho. No entanto, ao se comparar essa informação com os dados mensais analisados referentes à massa específica dos resíduos, não se apresenta uma relação direta de influência perceptível.

Figura 35: Precipitação Mensal Total de 2017 a 2023 (mm) - Jaboatão dos Guararapes



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da APAC(2023).

Tabela 11: Médias Mensais (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes

Médias Mensais (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2017 a 2023	1,36	1,30	1,23	1,30	1,17	1,19	1,38	1,16	1,20	1,16	1,35	1,23

Fonte: Autores (2023).

Tabela 12: Médias Mensais por Técnica (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes

Médias Mensais por Técnica (t/m³) - Jaboatão dos Guararapes												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
uphill jul/17 a jun/21	1,43	1,33	1,25	1,28	1,25	1,26	1,38	1,06	1,17	1,12	1,38	1,24
downhill jul/21 a fev/23	1,23	1,24	1,17	1,40	0,85	0,91	1,38	1,38	1,26	1,25	1,31	1,22

Fonte: Autores (2023).

Tabela 13: Comparativo de Médias - Jabotão dos Guararapes


Médias Comparativo de Médias - Jabotão dos Guararapes						
Mês	Média uphill (t/m ³)	Média downhill (t/m ³)	Média Mensal (t/m ³)	% de variação entre as técnicas	% de variação em relação à média - Método uphill	% de variação em relação à média - Método downhill
Janeiro	1,43	1,23	1,36	-0,14	-0,05	0,11
Fevereiro	1,33	1,24	1,30	-0,06	-0,02	0,05
Março	1,25	1,17	1,23	-0,06	-0,01	0,05
Abril	1,28	1,40	1,30	0,09	0,02	-0,07
Mai	1,25	0,85	1,17	-0,32	-0,06	0,37
Junho	1,26	0,91	1,19	-0,28	-0,06	0,31
Julho	1,38	1,38	1,38	0,00	0,00	0,00
Agosto	1,06	1,38	1,16	0,31	0,10	-0,16
Setembro	1,17	1,26	1,20	0,07	0,02	-0,05
Outubro	1,12	1,25	1,16	0,12	0,04	-0,07
Novembro	1,38	1,31	1,35	-0,05	-0,02	0,04
Dezembro	1,24	1,22	1,23	-0,01	0,00	0,01

Fonte: Autores (2023).

Tabela 14: Precipitação Mensal Total de 2017 a 2023 (mm) - Jabotão dos Guararapes

Precipitação Mensal de 2017 a 2023 (mm) - Jabotão dos Guararapes												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2017								150,8	98,4	41	29,7	32,2
2018	174,7	126,3	157,2	484,7	178,3	99,8	98,3	67,7	32,8	15,2	68,1	81,3
2019	153,5	109,6	231,9	174,3	247,4	458,8	403,6	183,2	115,6	49,7	0,7	27,3
2020	36,3	57,9	100,1	227,6	259,4	248	177,4	118,8	67	17,2	39,4	64,5
2021	64,9	112	174,2	427,1	476	138,3	198,6	328,8	70,8	46,9	30,5	158,7
2022	117,5	170,7	466,7	197,5	675	436	333,5	200,6	51,3	44,9	119,1	50,4
2023	186,2	196,4	169,2	356,8	284	462,8	163,2	187,1				

 uphill

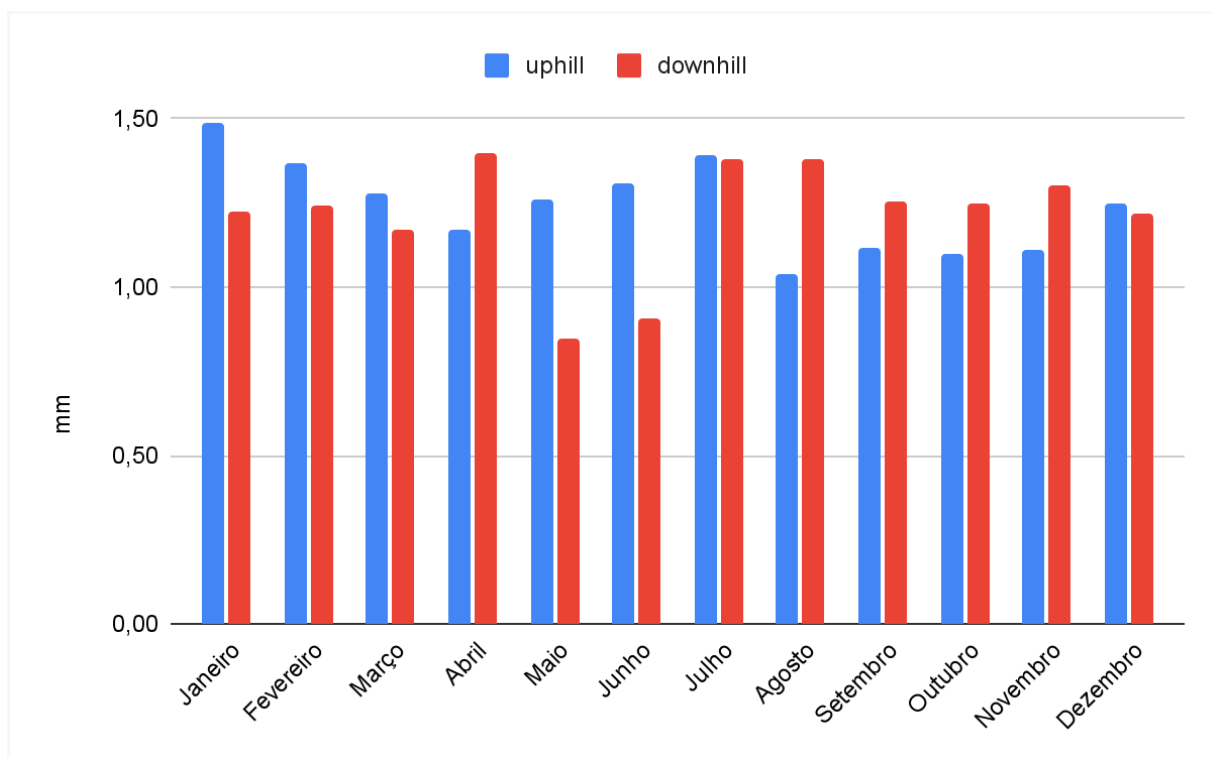
 downhill

Fonte: Autores (2023).

Por conseguinte, ao examinar a Figura 36, evidencia-se uma instabilidade da densidade de compactação dos resíduos, independentemente da transição entre os métodos adotados, sejam eles o *uphill* ou *downhill*. Não percebe-se uma relação

visível notável quanto ao método adotado e se este apresenta uma densidade maior ou menor quando comparado ao outro método, pois em alguns meses o método *uphill* apresenta densidades maiores e em outros meses o método *downhill* se sobressai, revelando um cenário de relativa uniformidade.

Figura 36: Média Mensal por Técnica (t/m³) - Jabotão dos Guararapes



Fonte: Autores (2023).

No entanto, ocorreram exceções a essa tendência. Durante os meses de maio e junho durante o método *downhill*, as médias mensais de densidade de compactação apresentaram uma pequena distância da média geral. Não obstante, é válido mencionar, que esses meses, considerando a técnica *downhill*, contam apenas com dados correspondentes ao ano de 2022, conforme mostrado na tabela 8, onde ocorreu registro de chuvas intensas localmente acarretando na quebra de equipamentos e dificuldade em colocar o maquinário na praça para compactar os resíduos, o que por sua vez pode ter influenciado na baixa massa específica demonstrada. Logo, a escassez de dados de anos anteriores, para esses meses impede uma análise mais aprofundada. Apesar das variações observadas nos meses de maio e junho, a análise global dos dados não evidencia uma mudança significativa na densidade de compactação dos resíduos em decorrência da

mudança de método de disposição de resíduos adotada. Essa constância sugere uma relativa consistência nas práticas de disposição e compactação de resíduos adotadas pelo CTR de Jaboaão dos Guararapes, independente do método selecionado.

A discrepância temporal dos dados obtidos e apresentados na Tabela 8 pode ter impactado nos resultados das análises já que os dados de densidade obtidos com a técnica *uphill* abrange quatro anos, e com a técnica *downhill* o período abrangido é relativamente mais curto, de aproximadamente um ano e meio.

A diferença de período pode acarretar em uma divergência na quantidade de dados consolidados para cada técnica. Considerando que o período de aplicação da técnica *uphill* é substancialmente maior, os resultados obtidos durante esse intervalo podem ser considerados mais consolidados e representativos.

5.2.4 CTR Maceió - Alagoas

Observa-se com base nos dados disponíveis da Tabela 15 que o período de implementação e registro da técnica *uphill* abrangeu de agosto de 2019 a junho de 2022, enquanto o método *downhill* foi aplicado de julho de 2022 a junho de 2023. Entretanto, entre esses intervalos, há lacunas de informações referentes aos meses de outubro de 2019, janeiro de 2020, outubro de 2020 e julho de 2021. É importante ressaltar que estas lacunas de dados estão presentes por conta da gestão anterior.

Tabela 15: Massa Específica de 2019 a 2023 (t/m³) - Maceió

Massa Específica de 2019 a 2023 (t/m³) - Maceió												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2019								1,19	1,15	-	1,09	1,24
2020	-	1,09	1,21	1,15	1,17	1,09	1,14	0,99	0,89	-	1,09	0,99
2021	1,02	1,13	1,11	0,92	0,92	1,04	-	0,9	1,12	1,29	1,13	1,29
2022	1,24	1,24	1,17	1,1	1,12	1,05	1,22	1,02	1,02	0,98	0,98	0,99
2023	1,09	1,08	1,1	1,08	1,11	1,05						

 *uphill*
 *downhill*

Fonte: Autores (2023).

A disponibilidade de dados entre as duas técnicas é notável, com o método *uphill* apresentando um período de vigência consideravelmente maior em comparação ao método *downhill*, cujos dados cobrem somente um ano corrido.

Na Tabela 16, são fornecidas as densidades médias calculadas por mês. A análise revela que a massa específica média de compactação dos resíduos durante todo o período analisado (Agosto de 2019 a Junho de 2023) foi de 1,09 t/m³. Observa-se, ainda, uma diferença de densidade entre os períodos em que cada técnica foi implementada. Durante o período em que a técnica *uphill* estava em vigor, a densidade média foi de 1,11 t/m³, enquanto no período de aplicação do método *downhill*, essa densidade média foi ligeiramente menor, atingindo 1,06 t/m³.

Tabela 16: Médias Mensais (t/m³) - Maceió

Médias Mensais (t/m ³) - Maceió												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2017 a 2023	1,12	1,14	1,15	1,06	1,08	1,06	1,18	1,03	1,05	1,14	1,07	1,13

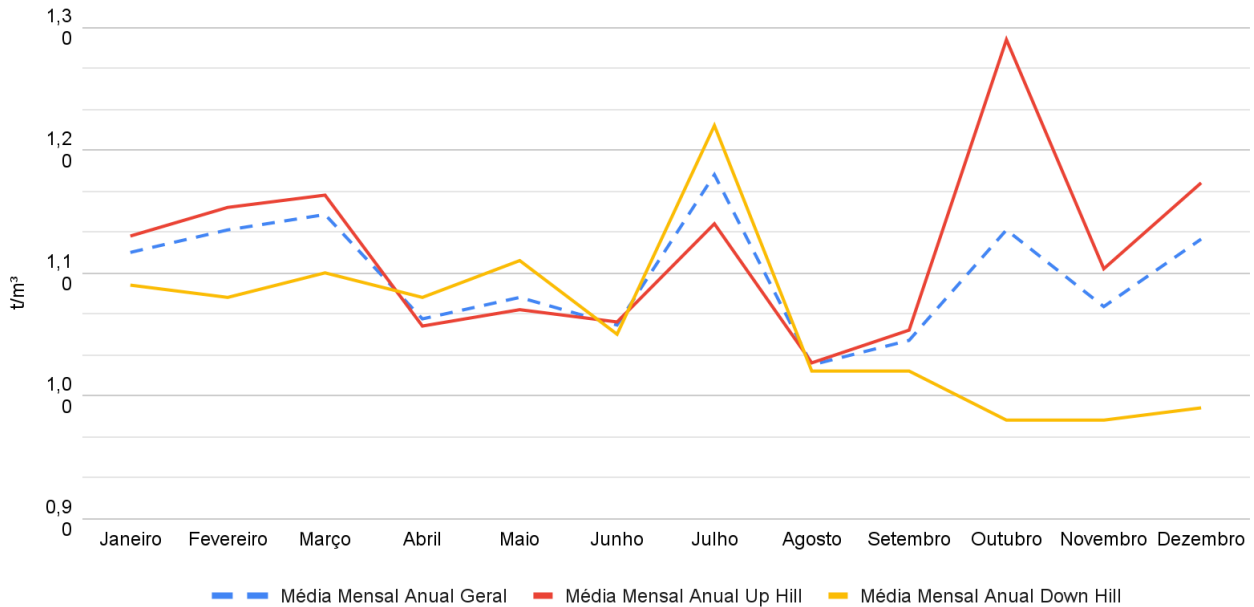
Fonte: Autores (2023).

A discrepância de 0,05 t/m³ (equivalente a 45,5 kg/m³) entre as médias de densidade dos métodos *downhill* e *uphill* suscita uma consideração ponderada. Apesar da aparente diferença, a magnitude dessa variação, relativamente pequena, torna complexa a atribuição direta da mudança de método como sua causa. Uma série de fatores intrínsecos ao processo de compactação, características dos resíduos, variações climáticas sazonais e outras influências podem estar contribuindo para essa discrepância.

A análise dos dados coletados e apresentados nas Figuras 37 e 38 oferece *insights* relevantes sobre a variação da densidade de compactação dos resíduos ao longo do período de observação. Embora seja importante ressaltar algumas lacunas nos dados, é notável que, de maneira geral, a amplitude de variação da densidade de compactação ao longo do período foi de 0,4 t/m³, considerando que a menor densidade registrada foi em setembro de 2020, atingindo um valor de 0,89 t/m³. Por outro lado, os maiores valores de densidade foram observados nos meses de outubro e dezembro de 2021, com registros de 1,29 t/m³. Essa variação de 0,4 t/m³

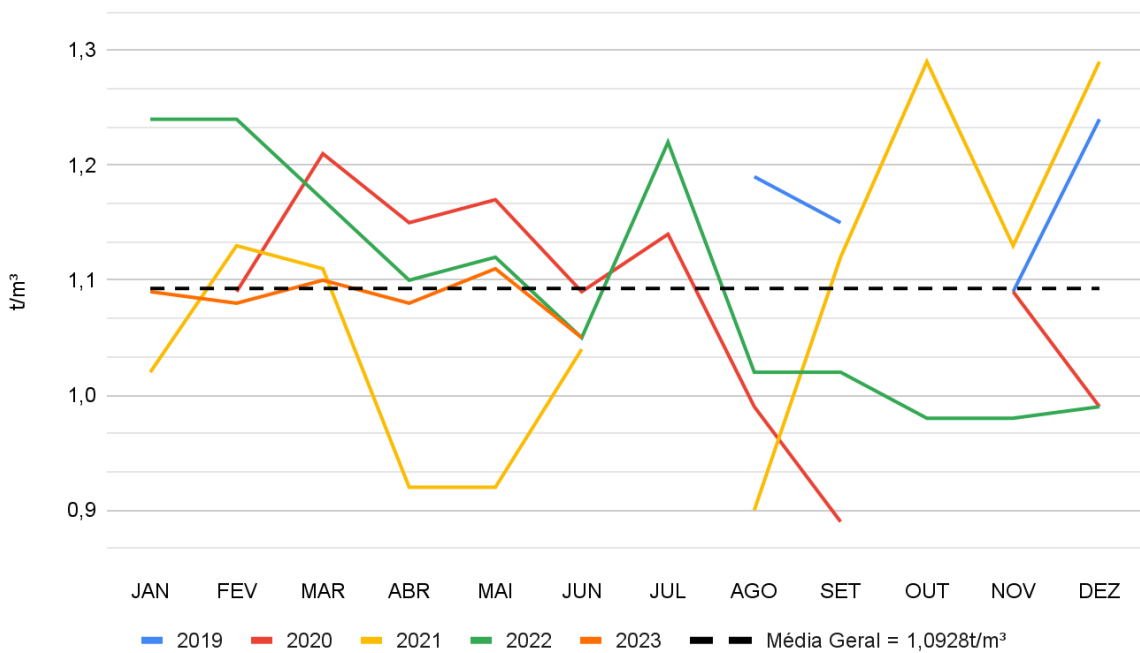
ao longo do período analisado chama a atenção para a oscilação significativa da densidade de compactação dos resíduos no ambiente de estudo.

Figura 37: Média Mensal Massa Específica (t/m³) - Maceió



Fonte: Autores (2023).

Figura 38: Massa Específica (t/m³) - Maceió



Fonte: Autores (2023).

Os menores e maiores valores de densidade ocorreram durante o período em que a técnica *uphill* estava sendo aplicada, o que aponta para a constatação que, dentro do próprio método *uphill*, há uma variação substancial na densidade dos resíduos compactados. Isto lança luz sobre a complexidade da análise comparativa entre os métodos *uphill* e *downhill* em termos de eficiência de compactação.

A consideração de tais variações intrínsecas dentro do método *uphill* atenua a dificuldade de traçar relações lineares entre a utilização de um método específico e seus efeitos no quesito massa específica. A ampla variação identificada mesmo dentro do método *uphill* continua a sugerir, assim como nos outros CTR's, que múltiplos fatores estão contribuindo para as oscilações observadas na densidade.

As Tabelas 17, 18, 19 e 20, associadas a Figura 36, oferecem informações úteis sobre a estabilidade da densidade média de compactação ao longo do período de observação. Nota-se que não há variação expressiva na densidade média dos resíduos compactados, sugerindo uma certa constância nesse aspecto ao longo do tempo.

Tabela 17: Médias Mensais por Técnica (t/m³) - Maceió

Médias Mensais por Técnica (t/m ³) - Maceió												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
uphill ago/19 a jun/22	1,13	1,15	1,16	1,06	1,07	1,06	1,14	1,03	1,05	1,29	1,10	1,17
downhill I jul/22 a jun/23	1,09	1,08	1,10	1,08	1,11	1,05	1,22	1,02	1,02	0,98	0,98	0,99

Fonte: Autores (2023).

Tabela 18: Média da Massa Específica (t/m³) - Maceió

Média da Massa Específica (t/m ³) - Maceió	
Média de Todo o Período (t/m³):	1,09
Média uphill (t/m³):	1,11
Média downhill (t/m³):	1,06

Fonte: Autores (2023).

Ao calcular o desvio padrão geral conforme apresentado pela Tabela 19, que registra a dispersão dos valores em relação à média, obtém-se um valor de 0,10

t/m³. Considerando a média geral de densidade de compactação de 1,10 t/m³, verifica-se que o desvio padrão equivale a aproximadamente 9,1% da média. Essa análise estatística aponta para uma variação consideravelmente modesta em relação à média, ressaltando uma certa uniformidade na densidade dos resíduos compactados.

Tabela 19: Desvio Padrão da Massa Específica (t/m³) - Maceió

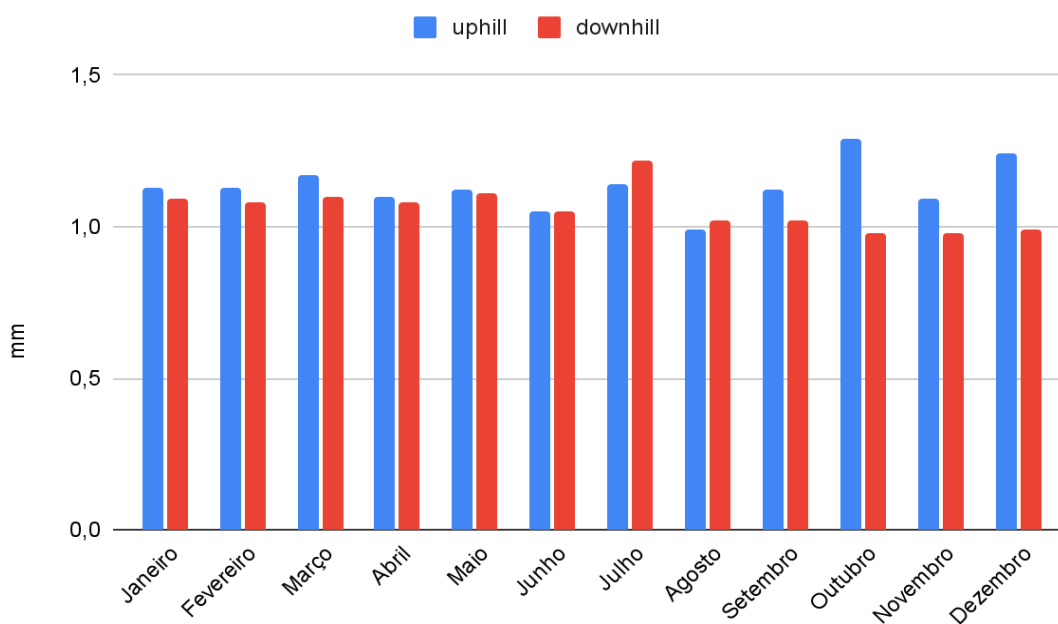
Desvio Padrão da Massa Específica (t/m ³) - Maceió	
Desvio Padrão de Todo o Período (t/m ³):	0,10
Desvio Padrão uphill (t/m ³):	0,11
Desvio Padrão downhill (t/m ³):	0,07

Fonte: Autores (2023).

Comparando os desvios padrões das médias de cada técnica utilizada, é possível observar que o método *uphill* apresenta um desvio padrão de 0,11 em relação à média do período *uphill*, enquanto o método *downhill* exibe um desvio padrão de 0,07 em relação à média do período *downhill*. A constatação de que o método *downhill* possui um desvio padrão menor sugere uma maior consistência nas densidades observadas. No entanto, é importante destacar que o período amostral do método *downhill* foi de apenas um ano, em comparação com o período de três anos do método *uphill*.

A coleta de dados ao longo de um período maior permite uma consolidação mais precisa das informações, reduzindo a influência de flutuações sazonais e eventos isolados. Nesse contexto, o período de três anos de observação para o método *uphill* contribui para uma análise mais robusta e confiável, enquanto o período de apenas um ano para o método *downhill* limita a generalização das conclusões.

Figura 39: Média Mensal por Técnica (t/m³) - Maceió



Fonte: Autores (2023).

Tabela 20: Comparativo de Médias - Maceió

Médias Comparativo de Médias - Maceió						
Mês	Média uphill (t/m³)	Média downhill (t/m³)	Média Mensal Anual (t/m³)	% de variação entre as técnicas	% de variação em relação à média - Método uphill	% de variação em relação à média - Método downhill
Janeiro	1,13	1,09	1,12	-0,04	-0,01	0,02
Fevereiro	1,15	1,08	1,14	-0,06	-0,02	0,05
Março	1,16	1,10	1,15	-0,05	-0,01	0,04
Abril	1,06	1,08	1,06	0,02	0,01	-0,02
Mai	1,07	1,11	1,08	0,04	0,01	-0,03
Junho	1,06	1,05	1,06	-0,01	0,00	0,01
Julho	1,14	1,22	1,18	0,07	0,04	-0,03
Agosto	1,03	1,02	1,03	-0,01	0,00	0,00
Setembro	1,05	1,02	1,05	-0,03	-0,01	0,02
Outubro	1,29	0,98	1,14	-0,24	-0,12	0,16
Novembro	1,10	0,98	1,07	-0,11	-0,03	0,09
Dezembro	1,17	0,99	1,13	-0,16	-0,04	0,14

Fonte: Autores (2023).

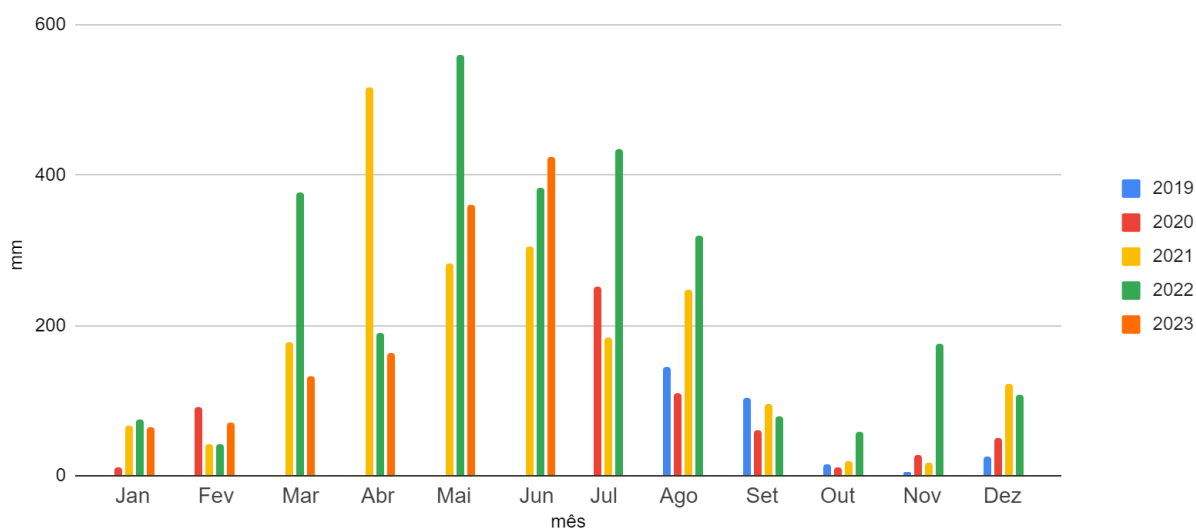
Tabela 21: Precipitação Mensal Total de 2019 a 2023 (mm) - Maceió

Precipitação Mensal de 2019 a 2023 (mm) - Maceió												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2019								144,2	102,9	14,7	4,4	26,5
2020	10,8	91,8	0	0	0	0	252,1	109,2	61,1	11,8	28,1	50,6
2021	65,8	41,5	177,1	516,3	283,1	306,1	184	247,7	96	19	16,8	121,3
2022	74,4	41,1	378	189,8	560,6	383,3	434,3	318,9	78,3	59,4	174,7	108,8
2023	64	69,8	133,4	163,2	360	424,8						

- UP HILL
- DOWN HILL

Fonte: Autores (2023).

Figura 40: Precipitação Mensal Total de 2019 a 2023 (mm) - Maceió



Fonte: Autores (2023).

Com base nos dados de precipitação mensal obtidos da SEMARH/AL, disponíveis na Tabela 21 e representados na Figura 40, verifica-se no período o aumento nos índices de precipitação mensais nos meses entre Março e Agosto. Entretanto, quando relacionamos esses dados climáticos com a densidade de compactação dos resíduos no aterro, conforme ilustrado na Figura 38, nota-se uma aparente ausência de variação significativa. Contrariando a expectativa de que períodos com maior precipitação pudessem impactar a densidade final de compactação dos resíduos, a análise dos resultados não parece apoiar essa

suposição. A complexidade das interações entre o clima e os processos de disposição de resíduos fica evidente diante da ausência de um padrão claro de variação da densidade de compactação ao longo das diferentes estações do ano.

5.2.5 Considerações

Não obstante a profundidade das investigações realizadas, é possível identificar certas limitações aos resultados obtidos. Uma limitação marcante reside na regionalização geográfica dos CTRs selecionados. Ao concentrar nossa análise nesses três CTRs que estão localizados no nordeste do Brasil, é vital considerar que as características geológicas, climáticas e socioeconômicas específicas da região podem influenciar os resultados obtidos. Aspectos como as variações sazonais de temperatura e umidade podem impactar os processos de degradação dos resíduos, afetando as taxas de compactação e eventualmente as características da massa específica. Dessa forma, ao extrapolar nossas conclusões para outras áreas geográficas, deve-se considerar a diversidade de contextos e suas potenciais implicações.

Além disso, é imperativo abordar as limitações decorrentes da temporalidade dos dados coletados. As informações sobre a técnica *downhill* coincidiu com o período de disseminação global da pandemia de COVID-19. Esse contexto pandêmico introduz uma série de vicissitudes que podem comprometer a plena compreensão dos resultados. Mudanças nos hábitos de consumo da população, alterações na força de trabalho e alterações nas práticas operacionais podem ter gerado anomalias nos dados coletados. A limitação temporal não apenas pode afetar a interpretação dos resultados, mas também dificulta a generalização das conclusões para períodos de normalidade operacional.

No escopo das investigações, a análise concentrou-se primordialmente na influência da mudança de técnica de disposição sobre a massa específica dos resíduos compactados. Todavia, é crucial mencionar que outras variáveis relevantes foram negligenciadas. Uma área de pesquisa promissora se refere aos aspectos econômicos da mudança de técnica. A análise de custos associados à adoção das técnicas *downhill* e *uphill* poderia ser um ponto a ser considerado. Elementos como equipamentos e maior necessidade de manutenção podem influenciar consideravelmente a escolha da técnica mais adequada.

Ademais, a dimensão da segurança operacional e de manutenção merece a devida consideração. A identificação da técnica que confere maior segurança para os trabalhadores e para o ambiente pode desempenhar um papel determinante na tomada de decisões de gestão.

6 CONCLUSÃO

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A criação do Centro de Tratamento de Resíduos - CTR de Maceió, em 2010, no estado de Alagoas, foi um marco para o estado. Apesar das mudanças administrativas, o aterro sanitário de Maceió atualmente passa por uma evolução com a nova gestão, nota-se a melhora nas estratégias de processamento dos resíduos, o cuidado com o monitoramento das células, além da redução de vetores e do volume de lixiviados graças a aplicação de grama nos talude finalizados, fato que até 2022 não existia. Mesmo diante deste avanço, o CTR de Maceió ainda apresenta muitos pontos a serem lapidados e aplicados, como é o caso do aproveitamento energético de biogás no local. Um estudo e revisão da planta atual do aterro também é um ponto a se trabalhar, já que são usadas bombas que necessitam de elevado consumo de energia para o chorume chegar na Estação de Tratamento de Chorume localizada a uma cota bem mais elevada que os pés dos taludes de várias células do aterro.

A análise dos dados obtidos dos Centros de Tratamento de Resíduos (CTR) em João Pessoa, Jaboatão dos Guararapes e Maceió permite fazer uma análise comparativa inicial sobre as técnicas de compactação *downhill* e *uphill*. No CTR de João Pessoa, obteve-se uma densidade média geral de $1,14 \text{ t/m}^3$, com um desvio padrão de 0,14. No que tange às médias específicas para os períodos de utilização das técnicas *uphill* e *downhill*, identifica-se uma média de $1,07 \pm 0,13 \text{ t/m}^3$ e $1,17 \pm 0,13 \text{ t/m}^3$, respectivamente. Entretanto, a variação observada não demonstra uma mudança expressiva na densidade dos resíduos compactados associada à troca de método de disposição.

De forma análoga, o CTR de Jaboatão dos Guararapes apresenta densidades médias gerais de $1,24 \text{ t/m}^3$ para todo o período, com desvio padrão de 0,18. As médias específicas para os métodos *uphill* e *downhill*, $1,23 \pm 0,19 \text{ t/m}^3$ e $1,24 \pm 0,16 \text{ t/m}^3$, respectivamente, também não indicam uma variação substancial atribuível às diferentes técnicas. Vale mencionar que, assim como em João Pessoa, a presença de lacunas de dados nos meses durante a pandemia limitam a análise.

Já no CTR de Maceió, observa-se uma densidade média geral de $1,09 \text{ t/m}^3$ para todo o período, com desvio padrão de 0,10. As médias específicas durante os períodos de *uphill* e *downhill*, $1,11 \pm 0,11 \text{ t/m}^3$ e $1,06 \pm 0,07 \text{ t/m}^3$, respectivamente,

apresentam pequenas diferenças, entretanto, sem uma tendência clara de variação associada às técnicas adotadas.

É relevante mencionar que o período em que a técnica *downhill* foi implementada coincidiu com o período de pandemia da COVID-19, que impactou consideravelmente os padrões de consumo e geração de resíduos. O fato de não haver dados disponíveis fora desse período dificulta a atribuição das variações observadas exclusivamente à técnica de disposição, uma vez que outros fatores podem ter influenciado os resultados.

Adicionalmente, a análise dos históricos de precipitação nas cidades onde os CTRs estão localizados não revelou um padrão consistente de influência das taxas mensais de precipitação na massa específica dos resíduos compactados. Em João Pessoa, houve aumento durante o método *downhill*, enquanto em Jaboatão dos Guararapes ocorreu uma diminuição. Maceió, por sua vez, não apresentou alterações significativas. Esses resultados sugerem que a relação entre as condições climáticas e a densidade de compactação é complexa e pode ser influenciada por múltiplos fatores.

É importante também considerar a possibilidade de erros nas análises, como falhas de calibração dos equipamentos de medição de peso e volume, uma vez que a massa de resíduos que entra nos aterros é verificada através de balanças industriais que aferem o peso dos caminhões antes e após a introdução dos resíduos nos aterros. Além disso, o volume dos resíduos compactados é estimado através de medições topográficas, que também apresenta pequenos erros de medições. Essas incertezas, dentre outras, podem ter contribuído para as pequenas variações observadas nos resultados.

Em conclusão, os dados e análises apresentados não permitem estabelecer uma relação direta e significativa entre as técnicas de disposição de resíduos em aterros sanitários (*uphill* e *downhill*) e a massa específica dos resíduos compactados.

6.2 Trabalhos futuros

Outro aspecto relevante para futuras pesquisas é a análise do impacto ambiental decorrente das técnicas de disposição de resíduos. Investigar a possibilidade de uma técnica apresentar uma camada de resíduos mais fácil de ser coberta por solo do que a outra, traria ao aterro mais segurança ambiental no que se

refere à avifauna presente no aterro, bem como para propagação de doenças entre os animais e à propagação de zoonoses.

No que diz respeito às recomendações para estudos futuros, é fundamental expandir a análise para diferentes regiões geográficas, a fim de validar a aplicabilidade das conclusões encontradas. A diversidade de condições climáticas, geológicas e socioeconômicas pode oferecer uma visão mais holística das vantagens e desvantagens de cada técnica. Além disso, a incorporação de dados pós-pandemia pode permitir uma comparação mais precisa e relevante entre as técnicas de disposição, considerando um contexto operacional normal.

Quanto às variáveis de custo e manutenção, futuras investigações devem considerar um espectro mais amplo de elementos financeiros. Incluir despesas como investimentos iniciais, operacionais e de longo prazo permitiria uma avaliação mais abrangente do custo-benefício das técnicas *downhill* e *uphill*. Além disso, a análise de *Return on Investment* (ROI) e a projeção de custos ao longo do tempo podem oferecer uma perspectiva dinâmica da viabilidade econômica de cada abordagem.

Ao delinear essas limitações e apontar direções para pesquisas futuras, espera-se que este trabalho sirva de ponto de partida para uma abordagem mais holística no gerenciamento de resíduos sólidos. A consideração de aspectos econômicos, ambientais e de segurança pode conduzir a uma tomada de decisões mais informada e sustentável, contribuindo para o avanço contínuo da gestão de resíduos em aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 10 set. 2023.

Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). **Dados de Meteorologia e Chuvas**. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/?formdate=2023-08-25&produto=municipio&periodo=mensal>> Acesso em: 26 ago. 2023.

Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). **Dados de Meteorologia e Chuvas**. Disponível em: <<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>> Acesso em: 23 ago. 2023.

ALTA GEOTECNIA AMBIENTAL. **Métodos de compactação e camada de cobertura: Nota Técnica**. Rio de Janeiro, 2023.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Dezembro de 2022. São Paulo, SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 1004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13896: **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro. 1992.

BARBOSA, P. M.; CAMPOS, A, B. **Análise sócio-ambiental do aterro sanitário de Aparecida de Goiânia, GO: dez anos após sua implantação.** Bol. geogr., Maringá, v.33, n. 2, p. 127-141, mai.-ago., 2015.

BOLTON, N. **Pushing Downhill.** Disponível em: <https://www.solidwaste.com/doc/pushing-downhill-0001> Acesso em: 25 ago. 2023.

BOLTON, N. **Pushing Uphill vs. Downhill.** Disponível em: <https://www.solidwaste.com/doc/pushing-uphill-vs-downhill-0001> Acesso em: 265 ago. 2023.

Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. **Manual de Operação de Aterros Sanitários.** 2010. Governo do Estado da Bahia.

Conselho Nacional de Meio Ambiente. 2006. Resolução CONAMA nº382/2006 - **Eficiência Energética com Responsabilidade Ambiental.** Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, Brasil.

CONDER - Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. **Manual de Operação de Aterros Sanitários.** Bahia, 2023.

CORREA, J; LANÇA, S. S. B. Resíduos Sólidos – **Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários – Guia do profissional em treinamento.** Cátedra da Unesco de Educação à Distância - FAE/UFMG. Editora Sigma. 2008.

CUNHA, Bruno. **A INTERPRETAÇÃO GEOGRÁFICA DA LOCALIZAÇÃO DOS LIXÕES MUNICIPAIS.** Revista Eletrônica do Curso de Geografia do Campus Jataí - UFG. n.7 2006.

FARIAS, M. **Aterro sanitário de Maceió funciona há 4 anos, mas ainda é mal utilizado.** G1 Globo. (2014, 02 de agosto). Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2014/08/aterro-sanitario-de-maceio-funciona-ha-4-anos-mas-ainda-e-mal-utilizado.html> Acesso em: 15 ago. 2023.

FILHO, Ronaldo; Holanda, Erika; Oliveira, Luis; Silva, Valdir. **O aproveitamento de resíduos sólidos urbanos, por meio do processo de compostagem aeróbia enriquecida com casca de sururu para aproveitamento na construção civil.** Ciências exatas e tecnológicas, Alagoas. v. 4. n. 2. p. 125-134. Novembro 2017.

ICLEI, **Manual para aproveitamento de biogás.** São Paulo, 2009, 81 p.

IMPROVING LANDFILL OPERATION. **Landfill Guidelines 2010.** Disponível em: <<https://www.sprep.org/attachments/WMPC/chapter5.pdf>> Acesso em: 26 ago. 2023.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Dados de Meteorologia e Chuvas.** Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br>> Acesso em: 24 ago. 2023.

International Solid Waste Association (ISWA). **A report from ISWA's working group on Landfill. 3rd edition.** 2019.

International Solid Waste Association (ISWA). **O futuro do setor de gestão de resíduos - tendências, oportunidades e desafios para a década.** 2021

JUCÁ MACIEL, Felipe; Fernando Thomé Jucá, José. **Geração de biogás e energia em aterro experiemntal de resíduos sólidos urbanos.** 2009. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

JUCÁ, J. F. T. (2003). **Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Brasil. Anais...In: 5º Congresso Brasileiro de Geotécnica Ambiental e Ambiental.** Porto Alegre, RS. 2003.

Lei nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos,** Brasília, 2 de agosto de 2010.

MACEIÓ. **Código Municipal de Limpeza Urbana no município de Maceió.** Capítulo 5. Seção 1. Art. 38º. 05 de setembro de 2019.

MARQUES, Afonso Celso Moruzzi. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. Vol. 01.** Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos, 2001.

Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Alagoas (2016). Disponível em: <<http://www.residuossolidos.al.gov.br/planos/estadual>> Acesso em: 18 ago. 2023.

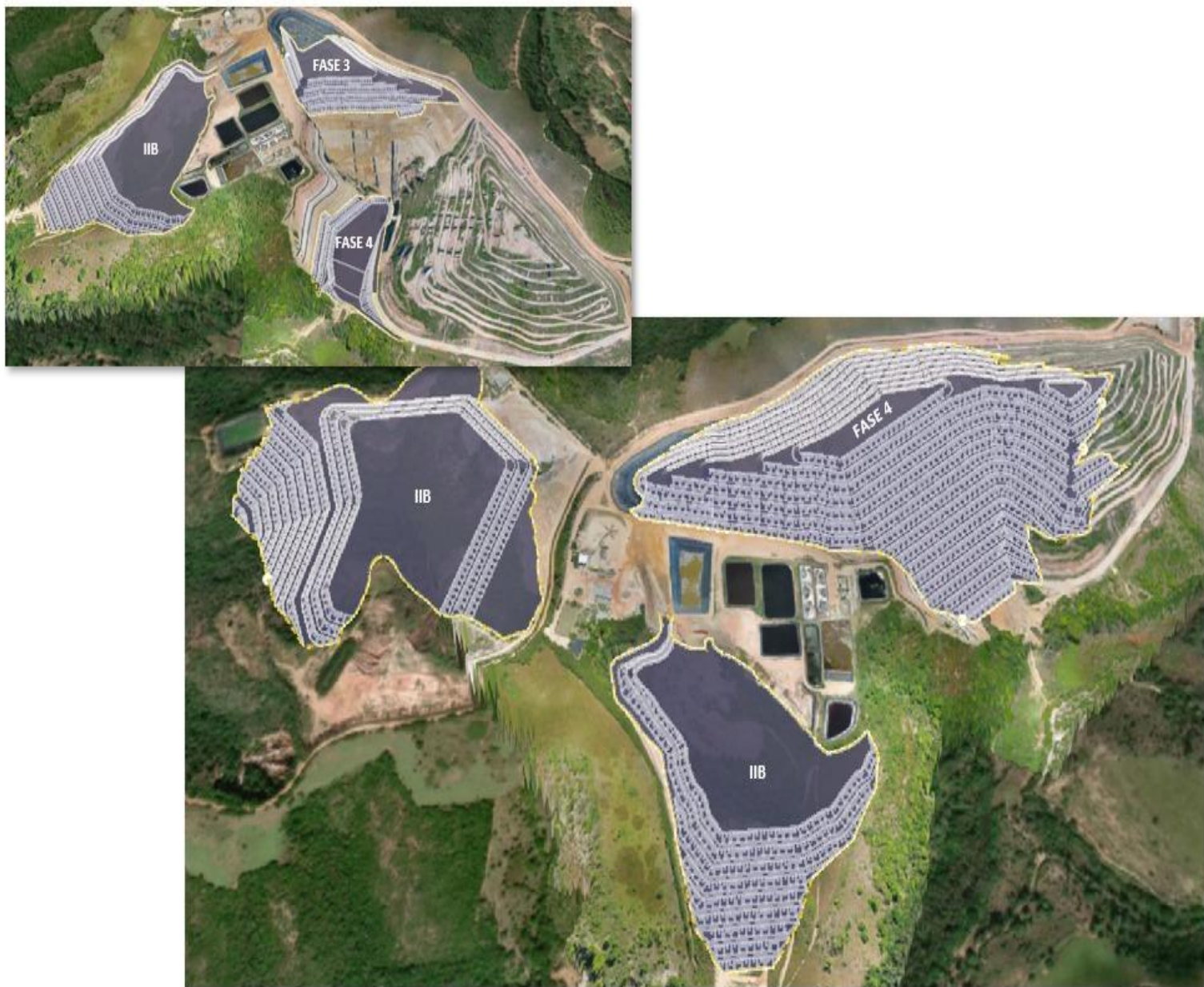
Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL). **Dados de Meteorologia e Chuvas.** Disponível em: <<https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/dados-de-precipitacao-mensal>> Acesso em: 21 ago. 2023.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues.** McGraw-Hill, Inc, 1993, 978p.

Vertown. **Impactos da má gestão dos resíduos sólidos.** Disponível em: <<https://www.vertown.com/blog/impactos-da-ma-gestao-dos-residuos-solidos/>> Acesso em: 29 ago. 2023.

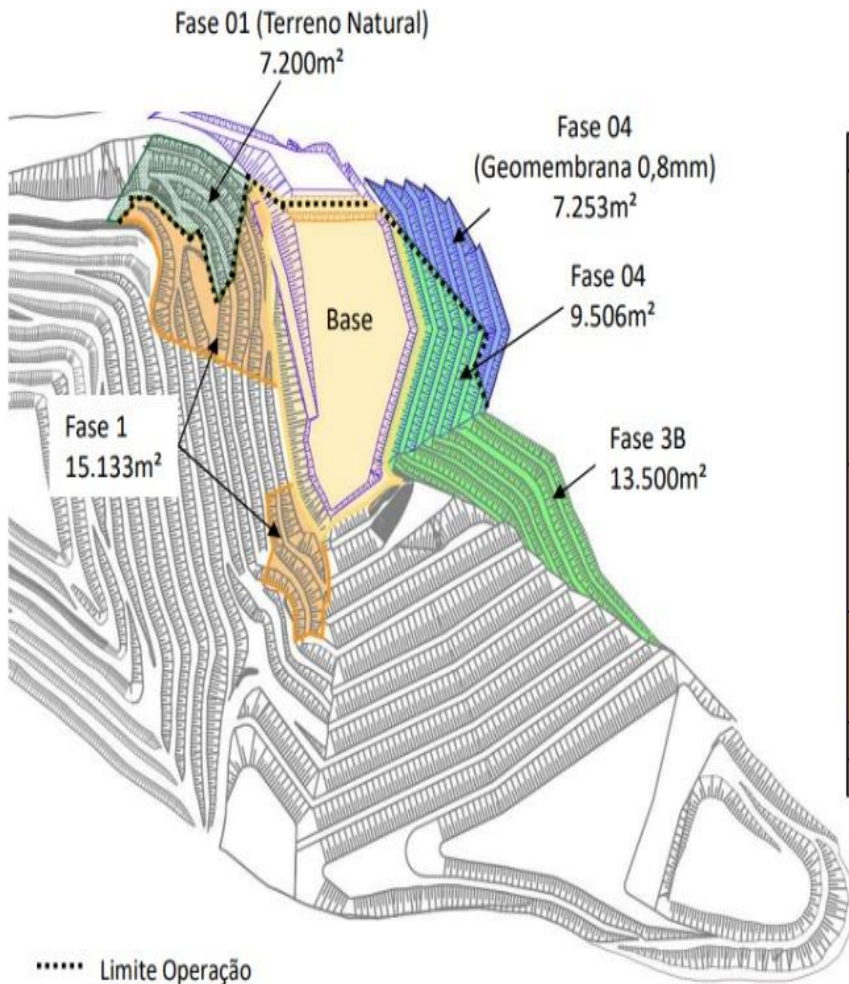
ANEXO

ANEXO A - Planta baixa CTR Maceió (2023) o mapeamento do tipo de resíduo.



Fonte: Disponibilizado pela gestão do CTR de Maceió (2023)

ANEXO B - Implantação de Geomembrana no Aterro Sanitário de Maceió.



Fases	Descrição	Área (m ²) Total
Fase 3B + Fase 4	Talude (Geo 2mm)	19.908
	Ancoragem (Geo 2mm)	3.093
	TOTAL (Geomembrana 2mm)	23.001
	Talude (Geo 0,8mm)	6.099
	Ancoragem (Geo 0,8mm)	1.154
	TOTAL (Geomembrana 0,8mm)	7.253
	Total (Geomembrana 2mm)	23.001
BASE	Base	11.748
	Cota 30	8.925
	Ancoragem (Geo 2mm)	2.085
	Total (Geomembrana 2mm)	22.758
FASE 1	Taludes Fase 1	13.207
	Ancoragem Fase 1	1.926
	Total (Geomembrana 2mm)	15.133
Total (Geomembrana 2mm)		60.892
Total (Geomembrana 0,8mm)		7.253

Fonte: Disponibilizado pela gestão do CTR de Maceió (2023)

ANEXO C - Planejamento de Operação do Aterro Sanitário de Maceió.

Fase 3B (Cota 85):
Operação Atual
Vida Útil até 07/2023

Expansão Fase 04:
Volume Disponível: 3.730.163,00 m³
Vida Útil até 09/2031

Inertes (Classe IIB):
Volume Disponível: 466.800,00 m³
Vida Útil até 03/2023
Recebimento Mensal: 39.000,00 Ton



Fonte: Disponibilizado pela gestão do CTR de Maceió (2023)