

# UFPA

**PPGEC**

# Universidade Federal do Pará

---



Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira

## **COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO: A INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO EM UM MUNICÍPIO DA AMAZÔNIA**

**TESE DE DOUTORADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Professor Dr. Lindemberg Lima Fernandes  
Coorientação: Dra. Risete Maria Queiroz Leão Braga

Belém – Pará – Brasil

2023

RAFAELA NAZARETH PINHEIRO DE OLIVEIRA SILVEIRA

# **COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO: A INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO EM UM MUNICÍPIO DA AMAZÔNIA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-ITEC), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil – Área de Concentração: Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. Lindemberg  
Lima Fernandes

Coorientação: Profa. Dra. Risete  
Maria Queiroz Leão Braga

**Belém**

**2023**

RAFAELA NAZARETH PINHEIRO DE OLIVEIRA SILVEIRA

## **COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO: A INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO EM UM MUNICÍPIO DA AMAZÔNIA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-ITEC), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil – Área de Concentração: Engenharia Hídrica.

**Aprovado em: 23/11/2023**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes**  
Orientador – (PPGEC/UFPA)

**Profa. Dra. Risete Maria Queiroz Leão Braga**  
Coorientadora – (PPGEC/UFPA)

**Profa. Dra. Maria Eugênia Gimenez Boscov**  
Examinadora Externa – (Poli/USP)

**Profa. Dra. Marcia Maria dos Anjos Mascarenha**  
Examinadora Externa – (PPGECON /UFG)

**Profa. Dra. Tamara Daiane de Souza**  
Examinadora Externa – (PROAMB/UFOP)

**Prof. Dr. Francisco Carlos Lira Pessoa**  
Examinador Interno – (PPGEC/UFPA)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

Silveira, Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira.  
COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO: A  
INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO EM UM MUNICÍPIO  
DA AMAZÔNIA / Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira.  
— 2023.  
XVI, 218 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes  
Coorientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Risete Maria Queiroz Leão Braga  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
Belém, 2023.

1. Balanço hídrico. 2. Sazonalidade de chuvas. 3. Ensaio  
de coluna. 4. Percolação. 5. Cobertura final convencional. I.  
Título.

CDD 620

---



## **COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO: A INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO EM UM MUNICÍPIO DA AMAZÔNIA**

**AUTORA:**

**RAFAELA NAZARETH PINHEIRO DE OLIVEIRA SILVEIRA**

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL.

APROVADO EM: 23 / 11 / 2023.

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente

**LINDEMBERG LIMA FERNANDES**

Data: 24/11/2023 16:53:54-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes  
Orientador (UFPA)



Documento assinado digitalmente

**RISETE MARIA QUEIROZ LEAO BRAGA**

Data: 08/01/2024 11:14:52-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Risete Maria Queiroz Leão Braga  
Coorientadora (UFPA)

USPAssina - Autenticação digital de documentos da USP e Registro de assinatura(s) eletrônica(s). Este documento foi assinado de forma eletrônica pelos seguintes participantes e sua autenticidade pode ser verificada através do código IJ7S-AR8P-AUZF-UHVW no seguinte link:  
<https://portalservicos.usp.br/iddigital/IJ7S-AR8P-AUZF-UHVW>

Maria Eugênia Gimenez Boscov

Nº USP: 57397

Data: 14/12/2023 11:28

Profa. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov  
Membro Externo (USP)



Documento assinado digitalmente

**MARCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHA**

Data: 08/12/2023 17:29:27-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Profª. Dra. Marcia Maria dos Anjos Mascarenha  
Membro Externo (UFG)



Documento assinado digitalmente

**TAMARA DAIANE DE SOUZA**

Data: 19/12/2023 14:24:55-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Profª. Dra. Tamara Daiane de Souza  
Membro Externo (UFOP)



Documento assinado digitalmente

**FRANCISCO CARLOS LIRA PESSOA**

Data: 04/01/2024 10:01:40-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Prof. Dr. Francisco Carlos Lira Pessoa  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

---

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Coordenador do PPGECC / ITEC / UFPA

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu pai Ewaldo Silveira e minha mãe Regina Glória Silveira pelo apoio incansável durante todo o doutorado e a minha vida. Seja com palavras sábias, incentivos, reflexões, abraços, carinhos, dedicação e muito amor.

Ao meu esposo Francisco Pereira, que esteve ao meu lado durante todo o doutorado, com apoio, amor e dedicação para que tudo funcionasse bem durante esses anos. E que muitas vezes precisei me ausentar para o desenvolvimento dos estudos, e que mesmo sobrecarregado sempre disse a mim, que ele daria conta de tudo e que eu poderia contar com ele para tudo.

Ao meu filho Theo, que praticamente nasceu junto com o doutorado. Que por muitas vezes tive que conversar com ele, que eu teria que estudar e não conseguiria brincar com ele naquele momento. E no jeitinho dele, dizia que entendia e que eu estudava muito. E perguntava sempre quando eu iria acabar de estudar para ficar com ele. Sim, é de partir o coração e logo vem a culpa materna, que ninguém disse que doía tanto. Mas que aos poucos a gente vai aprendendo a lidar melhor.

A minha irmã Renata Silveira que sempre proferiu e agiu de forma a continuar com os estudos e nunca desistir. E junto com meu cunhado Aluísio Arruda, com presteza e carinho tomaram conta do Theo enquanto estava envolvida com a pesquisa, na Universidade.

A minha família que me incentiva e com carinho me deu força para continuar e finalizar este feito da vida acadêmica e profissional.

Aos meus amigos, que são muitos, e eu agradeço todos os dias por isso, que sempre acreditaram em mim, e que mesmo afastada de alguns por falta de tempo, em qualquer oportunidade se faziam presentes e entendiam meu sumiço com amor.

A minha psicóloga Taiana Negrelli que me deu apoio profissional para controlar, o que antes era desconhecido para mim, como as crises de ansiedade.

Aos meus orientadores Lindemberg Fernandes e Risete Braga, que com profissionalismo, conhecimento e presteza souberam conduzir e me deixaram segura para o desenvolvimento da pesquisa de doutorado.

As amigas que fiz no laboratório de resíduos sólidos da UFPA, que me ajudaram tanto durante os ensaios, e sempre me incentivando durante a caminhada.

Ao PPGECC pela oportunidade e infraestrutura como Laboratório de Resíduos Sólidos para a execução dos ensaios principais da pesquisa.

*No fundo, todos temos necessidade de dizer quem somos e o que é que estamos a fazer e a necessidade de deixar algo feito, porque esta vida não é eterna e deixar coisas feitas pode ser uma forma de eternidade.*  
*(José Saramago, 20.07.1997)*



## RESUMO

Os estudos relacionados à camada de cobertura final convencional e evapotranspirativa de aterros sanitários são bastante discutidos na literatura mundial, mas pouco se sabe sobre o comportamento de uma cobertura final de aterro sanitário em locais com climas tropicais. A Amazônia é uma região de clima tropical e com padrões de precipitações pluviométricas e evapotranspiração, apresentando uma sazonalidade ao longo do ano hidrológico, divididos em período chuvoso e período mais seco. Deste modo, é primordial avaliar a influência do balanço hídrico em sistemas de coberturas final de aterros sanitários. Neste estudo, contemplou-se uma avaliação desse balanço em coberturas de aterros do tipo convencional (CONV) e evapotranspirativa - barreira capilar (BARCAP), a partir de dados hidrológicos do município de Marabá, no Estado do Pará. A metodologia consistiu em calcular o balanço hídrico de acordo com método de Thornthwaite e Mather (1955) com dados hidrológicos de uma série histórica de 30 anos, entre os anos de 1991 e 2020. Esses dados de precipitação pluviométrica também foram importantes para avaliar as alturas de lâminas de chuva diárias e mensais mais frequentes na região de Marabá. Além disso, um panorama da quantidade de dias com chuva e sem chuva por mês e por ano foi obtido, com uma avaliação do espaçamento de episódios com chuva. Para o cálculo do balanço hídrico, os dados hidrológicos de entrada foram precipitação pluviométrica, temperatura, luz solar e como dados resultantes têm-se as parcelas como o escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração, armazenagem de água e percolação. Com os dados conseguiu-se avaliar o cenário de percolação de água de chuva para o interior dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de um aterro sanitário, levando em conta as parcelas que compõem o balanço hídrico. Para avaliar o desempenho das coberturas com materiais predominantes na região, solos, e que são empregados em obras de engenharia local, denominados no estudo como solo fino (SF) com percentual de 55% de argila e outro intitulado solo grosso (SG) por possuir maior fração areia, totalizando 49%. Ambos foram caracterizados geotecnicamente, somando-se a estes os ensaios de compactação, permeabilidade e curva de retenção de água nos solos e difração de raios-x. Os dados hidrológicos também possibilitaram tomadas de decisão na configuração das lâminas impostas aos fluxos de água de chuva nas colunas, dentro da realidade que ocorre no município de Marabá. Simultaneamente, sensores de umidade foram incluídos nos ensaios de colunas na representação de sistemas de cobertura para avaliar o comportamento da umidade dos materiais frente às lâminas de chuva ao longo do tempo. Os principais resultados da hidrologia e balanço hídrico foram o cenário da sazonalidade amazônica, que evidenciaram as maiores médias mensais de precipitação no período de dezembro a maio, entre 212 mm e 293 mm, e os meses menos chuvosos de junho a novembro, entre 90 mm e 159 mm. Em termos de evapotranspiração os maiores valores coincidiram com os meses de maiores médias mensais de precipitação. Como resposta do balanço hídrico, meses de maio a novembro não ocorreu percolação, principalmente devido a evapotranspiração ser superior a infiltração, isso ocorreu devido baixos valores de precipitação pluviométrica desses meses. As lâminas equivalentes às precipitações pluviométricas diárias encontradas foi a máxima de 86 mm, e as lâminas com a maior frequência foram as de 10 mm e 20 mm, respectivamente em ordem de maior frequência. Esses dados de lâminas conduziram aos valores de entrada para o fluxo de água de chuva nas colunas. Os resultados mostraram que a coluna com sistema de cobertura BARCAP apresentou melhor desempenho, haja vista que o tempo de percolação foi significativamente superior quando comparado ao da cobertura CONV, para todas as lâminas de chuva inseridas durante o ensaio. Repercutiu variação mais suaves de umidades frente a precipitação pluviométrica imposta nas colunas. Entende-se que a quantidade de percolação em cobertura BARCAP pode ser menor, pois no campo têm-se maiores níveis de evaporação dessa água localizada mais próxima da atmosfera e, portanto, favorecendo a diminuição da parcela contributiva de água de chuva na geração de lixiviado, no caso prático de aterros sanitários.

**Palavras Chaves:** Balanço hídrico; Sazonalidade de chuvas; Ensaio de coluna; Percolação; Cobertura final convencional; Cobertura evapotranspirativa.

## ABSTRACT

Studies related to the conventional and evapotranspiration final cover layer of landfills are widely discussed in the world literature, but little is known about the behavior of a landfill final cover in places with tropical climates. The Amazon is a region with a tropical climate and patterns of rainfall and evapotranspiration, presenting seasonality throughout the hydrological year, divided into a rainy period and a drier period. Therefore, it is essential to evaluate the influence of the water balance on final landfill cover systems. In this study, an assessment of this balance was included in landfill covers of the conventional type (CONV) and evapotranspiration - capillary barrier (BARCAP), based on hydrological data from the municipality of Marabá, in the State of Pará. The methodology consisted of calculating the water balance according to the method of Thornthwaite and Mather (1955) with hydrological data from a 30-year historical series, between the years 1991 and 2020. These rainfall data were also important for evaluating the heights of daily rain sheets and most frequent monthly rates in the Marabá region. Furthermore, an overview of the number of days with rain and without rain per month and per year was obtained, with an assessment of the spacing of rainy episodes. To calculate the water balance, the hydrological input data were rainfall, temperature, sunlight and the resulting data include surface runoff, evapotranspiration, infiltration, water storage and percolation. With the data, it was possible to evaluate the scenario of rainwater percolation into urban solid waste (MSW) from a landfill, taking into account the portions that make up the water balance. To evaluate the performance of coverings with predominant materials in the region, soils, which are used in local engineering works, referred to in the study as fine soil (SF) with a percentage of 55% clay and another called coarse soil (SG) as it has largest sand fraction, totaling 49%. Both were geotechnically characterized, in addition to compaction, permeability and water retention curve tests in the soil and x-ray diffraction. The hydrological data also enabled decision-making in the configuration of the blades imposed on the rainwater flows in the columns, within the reality that occurs in the municipality of Marabá. Simultaneously, humidity sensors were included in the column tests representing roofing systems to evaluate the moisture behavior of materials against rain sheets over time. The main results of hydrology and water balance were the Amazon seasonality scenario, which showed the highest monthly averages of precipitation in the period from December to May, between 212 mm and 293 mm, and the least rainy months from June to November, between 90 mm and 159mm. In terms of evapotranspiration, the highest values coincided with the months with the highest monthly rainfall averages. As a response to the water balance, from May to November there was no percolation, mainly due to evapotranspiration being higher than infiltration, this was due to low rainfall values in these months. The depths equivalent to daily rainfall found were the maximum of 86 mm, and the depths with the highest frequency were 10 mm and 20 mm, respectively in order of greatest frequency. This slide data drove the input values for rainwater flow in the columns. The results showed that the column with the BARCAP cover system presented better performance, given that the percolation time was significantly higher when compared to the CONV cover, for all sheets of rain inserted during the test. It reflected smoother variations in humidity compared to the rainfall imposed on the columns. It is understood that the amount of percolation in BARCAP coverage may be lower, as in the field there are higher levels of evaporation of this water located closer to the atmosphere and, therefore, favoring the reduction of the contribution of rainwater in the generation of leachate, in the practical case of landfills.

**Keywords:** Water balance; Seasonality of rainfall; Column test; Percolation; Conventional final coverage; Evapotranspiration coverage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Projeção de geração de RSU no mundo. ....	28
Figura 2. Geração projetada de resíduos, por região (milhões de toneladas/ano).....	29
Figura 3. Geração e coleta de RSU no Brasil (em toneladas/dia).....	29
Figura 4. Cenário internacional da tecnologia de tratamento e disposição final RSU.....	30
Figura 5. Percentual do tipo de disposição final de RSU no Brasil .....	31
Figura 6. Percentual da disposição final de RSU por região do Brasil em 2022. ....	31
Figura 7. Perfil com a estratificação multicamadas que formam a cobertura final.....	39
Figura 8. Seção de cobertura final convencional.....	42
Figura 9. Resultados do processo de filtragem na RSL e RB .....	52
Figura 10. Quantidade de artigos publicados por ano e artigos aptos a pesquisa. ....	53
Figura 11. Painel quantitativo dos artigos - critérios de inclusão ou exclusão .....	54
Figura 12. Nuvem de palavras mais citadas nos artigos aptos.....	54
Figura 13. Tendências de publicação sobre cobertura final de aterros sanitários .....	56
Figura 14. Composições de cobertura final de aterro sanitário mais empregado .....	57
Figura 15. Materiais aplicados na cobertura final de aterros sanitários .....	58
Figura 16. Qualis dos artigos aceitos.....	65
Figura 17. Exemplo de uma curva de retenção de um solo arenoso.....	71
Figura 18. Seção transversal esquemática de um aterro e o balanço hídrico .....	74
Figura 19. Caminho da água na seção transversal de uma cobertura final de aterro sanitário.....	78
Figura 20. Componentes do balanço hídrico em coberturas finais de aterros .....	79
Figura 21. Tipos de cobertura final evapotranspirativas.....	85
Figura 22. Fluxograma do percurso metodológico da pesquisa. ....	91
Figura 23. Localização da área de estudo aplicada na Pesquisa .....	93
Figura 24. Precipitação Média Mensal de Marabá - 1961 a 1990 .....	94
Figura 25. Insolação Total de Marabá - 1961 a 1990 .....	95
Figura 26. Temperatura de Marabá - 1961 a 1990 .....	95
Figura 27. Localização da jazida de solo.....	96
Figura 28. Visão geral do local de coleta das amostras de solo na jazida .....	97
Figura 29. Montagem das colunas.....	120
Figura 30. Desenho esquemático das colunas 1 e 2, medidas em milímetros. ....	121
Figura 31. Detalhe do trado e suas dimensões.....	121
Figura 32. Esquema dos perfis das coberturas finais tipo CONV e BARCAP .....	122
Figura 33. Curvas de calibração dos sensores S2, S3 e S4 aplicados para o solo SF. ....	126
Figura 34. Curvas de calibração dos sensores S5 aplicados para o solo SG.....	127
Figura 35. Sistema de umedecimento das colunas. ....	129
Figura 36. Box plot da média PPM, entre 1991 a 2020.....	135
Figura 37. Temperatura máxima, mínima e média mensal de Marabá, 1991 a 2020. ....	137
Figura 38. PPD de janeiro a dezembro, entre 1991 a 2020.....	138

Figura 39. Histograma de frequência relativa de lâminas PPD, de 1991 a 2020. ....	139
Figura 40. Histograma de lâminas PPD do mês de março, de 1991 a 2020. ....	139
Figura 41. Dia que mais choveram ao longo de 12 meses, de 1991 a 2020. ....	140
Figura 42. Mínimo, média e máximo de dias sem chuva e com chuva por mês.....	142
Figura 43. Dias que chovem e não chovem por mês, entre 1991 a 2020.....	143
Figura 44. Espaçamento médio de dias com estiagem por mês (1991 a 2020) .....	145
Figura 45. Balanço hídrico climatológico. ....	147
Figura 46. Curvas granulométricas das amostras de solo. ....	151
Figura 47. Curva de compactação dos solos SF e SG. ....	153
Figura 48. Difração de raios-x da amostra de solo SF.....	154
Figura 49. Difração de raios-x da amostra de solo SG. ....	154
Figura 50. Curva do ensaio de sucção do solo SF. ....	156
Figura 51. Curvas do ensaio de sucção do solo SG .....	157
Figura 52. Precipitação e percolação versus tempo para coberturas CONV e BARCAP.....	161
Figura 53. Infiltração frente a precipitações de 10 mm (a) CONV e (b) BARCAP. ....	165
Figura 54. Infiltração frente a precipitações de 20 mm (a) CONV e (b) BARCAP. ....	167
Figura 55. Umidades na cobertura CONV para lâmina de chuva de 86 mm.....	169
Figura 56. Umidades na cobertura BARCAP para lâmina de chuva de 86 mm. ....	171
Figura 57. Umidades na cobertura CONV com lâminas de chuva de 10 mm. ....	172
Figura 58. Umidades na cobertura BARCAP com lâminas de chuva de 10 mm.....	174
Figura 59. Umidades na cobertura CONV com lâminas de chuva de 20mm. ....	175
Figura 60. Umidades na cobertura BARCAP com lâminas de chuva de 20 mm.....	176
Figura 61. Permeabilidade do sistema de cobertura CONV .....	178
Figura 62. Permeabilidade do sistema de cobertura BARCAP .....	178

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1. Resumo técnico dos artigos aceitos sobre cobertura final de aterro sanitário.....	62
Quadro 2. Resumo técnico dos artigos aceitos sobre cobertura de aterro sanitário no Brasil.....	68
Quadro 3. Alguns artigos que tratam do balanço hídrico em aterros sanitários .....	88
Quadro 4. Tipos de cobertura final, composições e nomenclaturas adotadas.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Formulário de extração do StArt da pesquisa .....	51
Tabela 2. Frequência das palavras chaves presentes nos artigos aceitos. ....	55
Tabela 3. Composição dos dados climáticos .....	98
Tabela 4. Valores mensais de luz natural para o hemisfério sul baseado na latitude.....	103
Tabela 5. Valores do coeficiente de Runoff .....	104
Tabela 6. Índices físicos do SF para calibração dos sensores de umidade. ....	124
Tabela 7. Índices físicos do SG para calibração dos sensores de umidade.....	124
Tabela 8. Umidades dos corpos de provas para calibração dos quatro sensores .....	126
Tabela 9. Balanço Hídrico Climatológico .....	149
Tabela 10. Caracterização geotécnica das amostras de solo SF e SG.....	152
Tabela 11. Dados de entrada e saída utilizados do software RETC .....	155
Tabela 12. Parâmetros obtidos das curvas de retenção e gráficos do RETC. ....	158
Tabela 13. Dados de moldagem dos solos das coberturas para o ensaio de coluna. ....	160
Tabela 14. Ensaio de Coluna na Cobertura CONV, com lâmina de precipitação pluviométrica de 86mm. ....	162
Tabela 15. Ensaio de Coluna na Cobertura BARCAP, com lâmina de precipitação pluviométrica de 86mm. ....	162
Tabela 16. Ensaio de Coluna na cobertura CONV, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 10mm. ....	166
Tabela 17. Ensaio de Coluna na cobertura BARCAP, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 10mm. ....	166
Tabela 18. Ensaio de coluna na cobertura CONV, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 20 mm. ....	168
Tabela 19. Ensaio de Coluna na cobertura BARCAP, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 20 mm .....	168
Tabela 20. Características dos CPs e Permeabilidade dos solos.....	177
Tabela 21. Cenários de percolação mensal e diária .....	180
Tabela 22. Relação precipitação pluviométrica e percolação diária no mês de março de 1991. ....	181
Tabela 23. Relação precipitação pluviométrica e percolação diária no mês de fevereiro de 2018. ....	181
Tabela 24. Desempenho de cobertura de outros trabalhos .....	185

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1.	HIPÓTESE .....	21
1.2.	OBJETIVOS.....	23
1.3.	JUSTIFICATIVA.....	23
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO (FRAMEWORK) .....	25
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
2.1.	PANORAMA DOS RSU .....	27
2.2.	PROJETOS DE ATERROS SANITÁRIOS .....	33
2.3.	COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS: RSL E RB .....	37
2.3.1.	Procedimentos da RSL e RB .....	47
2.3.1.1.	Etapa 1 RSL e RB: Planejamento – Protocolo .....	49
2.3.1.2.	Etapa 2 RSL e RB: Execução – Seleção .....	49
2.3.1.3.	Etapa 3 RSL e RB: Execução – Extração.....	50
2.3.1.4.	Etapa 4 RSL e RB: Sumarização.....	52
2.3.2.	Repercussões da RSL e RB .....	52
2.3.2.1.	Repercussões da Fase de Seleção .....	53
2.3.2.2.	Repercussões da Fase de Extração .....	56
2.3.3.	Constatações da RSL e RB .....	65
2.4.	COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO NO BRASIL .....	66
2.5.	FLUXO DE ÁGUA SOLO E INFILTRAÇÃO .....	69
2.6.	BALANÇO HÍDRICO .....	77
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>90</b>
3.1.	ÁREA DE ESTUDO .....	93
3.1.1.	Clima e Aspectos Fisiográficos .....	93
3.2.	MATERIAIS .....	95
3.3.	ESTUDOS HIDROLÓGICOS .....	98
3.3.1.	Balanço Hídrico .....	100
3.4.	ENSAIOS GEOTÉCNICOS .....	111
3.4.1.	Caracterização Geotécnica.....	111
3.4.2.	Ensaio de Compactação .....	111
3.5.	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	112
3.6.	ENSAIOS HIDROGEOTÉCNICOS.....	112
3.6.1.	Curva de Retenção pelo Método de Papel Filtro .....	112

3.6.2.	Ensaio de Coluna com Sensores de Umidade.....	117
3.6.2.1.	Preparação de Amostras .....	118
3.6.2.2.	Calibração dos sensores.....	122
3.6.2.3.	Fluxo de Água nas Colunas.....	128
3.6.2.4.	Medição de Umidade nas Colunas .....	131
3.6.3.	Ensaio de permeabilidade via ensaio de coluna .....	132
3.7.	DESEMPENHO DAS COBERTURAS.....	133
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>134</b>
4.1.	ESTUDOS HIDROLÓGICOS .....	135
4.2.	BALANÇO HÍDRICO DE MARABÁ-PA.....	146
4.3.	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA .....	151
4.4.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO .....	153
4.5.	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	153
4.6.	ENSAIO DE SUCÇÃO COM PAPEL FILTRO .....	155
4.7.	ENSAIO DE COLUNA COM SENSORES DE UMIDADE.....	160
4.8.	ENSAIO DE PERMEABILIDADE VIA ENSAIO DE COLUNA .....	177
4.9.	DESEMPENHO DAS COBERTURAS.....	179
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>187</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>190</b>
	<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>220</b>
	<b>APÊNDICE II .....</b>	<b>233</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações atuais da preservação ambiental é quanto à contenção segura dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), de modo a evitar prejuízos ou ameaças à saúde e a segurança das águas superficiais e subterrâneas situadas na porção inferior do local de disposição final desses resíduos, além da emissão de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o gás metano (CH<sub>4</sub>), que estão presentes nos aterros sanitários.

A abordagem de segurança ambiental em aterros sanitários geralmente está atrelada a contaminação do lençol freático com o agente agressor chamado de lixiviado. O fluxo de água proveniente de precipitações pluviométricas pode ir em direção ao interior do aterro sanitário, e desempenha um papel fundamental na decomposição dos resíduos, formando, por conseguinte, maior volume de lixiviado, normalmente com elevados percentuais de metais pesados e outros componentes poluidores (Apiwantragoon *et al.*, 2015; Stock *et al.*, 2020).

Dados atualizados da geração de RSU, em âmbito mundial (World Bank Group, 2018) e nacionais (Associação de Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2022), apontam um aumento progressivo, em escala geométrica, na geração de RSU na maioria das cidades do mundo, e que não é acompanhado em relação aos aspectos de políticas públicas e tecnologias quanto à disposição final desses resíduos (Alfaia *et al.*, 2017; Leme *et al.*, 2014).

De acordo com World Bank Group (2018), no ano de 2016, do total de RSU gerados no mundo, cerca de 33% não tiveram o gerenciamento e disposição final ambientalmente adequada. O relatório da Associação de Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) aponta que no Brasil, em 2022, aproximadamente 61% da massa dos RSU coletados receberam uma disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários, e os 39% da massa dos resíduos coletados tiveram sua disposição final inadequada (ABRELPE, 2022).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) destaca a necessidade de destinar de forma ambientalmente adequada os resíduos a partir da não geração, redução, reutilização, reciclagem e aproveitamento energético, e que sejam dispostos apenas os rejeitos em aterros sanitários (Brasil, 2010). Entretanto, pouco se tem reciclado, a média nacional não ultrapassou os 4% ao longo desses dez anos,

desde a instituição dessa Lei Federal (ABRELPE, 2022; Alfaia *et al.*, 2017; Costa *et al.*, 2019).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 75,1% dos municípios do Brasil apresentam alguma atividade de coleta seletiva, enquanto na região norte essa iniciativa de coleta seletiva ficou em 33,8% (SNIS, 2022), mesmo sendo até ações de iniciativas pontuais nos municípios.

Portanto, a realidade do Brasil quanto à destinação dos RSU ainda são os aterros sanitários, praticamente como a única técnica para lidar com os resíduos, e sendo a ferramenta de disposição final mais ambientalmente adequada (Alfaia *et al.*, 2017; Boscov; Hems, 2020). Outro instrumento legal aprovado foi a Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020, denominado Marco Legal do Saneamento Básico (2020), que estabelece metas de instalação de aterros sanitários com vida útil superior a 20 anos nos municípios do Brasil (Brasil, 2020).

De acordo com Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do município de estudo Marabá, localizado na região sudeste do Estado do Pará, não possui coleta seletiva e a disposição dos RSU é realizada em aterro sanitário há pouco mais de 10 anos (PMSB, 2019). No referido plano não há projeto e nem detalhes quanto aos sistemas de impermeabilização e drenantes no aterro.

Boscov e Hems (2020) apontam que a demanda por aterros continua crescendo, devido ao crescimento das cidades, e consórcios vão sendo formados entre pequenos municípios para compartilhar os custos de implementação e operação, assim como grandes aterros sanitários privados de RSU vêm sendo implementados para servir vários municípios vizinhos.

Sabe-se que a construção de um aterro sanitário envolve projeto desde a fase de concepção, infraestrutura e a construção, política de reciclagem e inclusão oficial dos catadores na gestão integrada dos RSU (Alfaia *et al.*, 2017; Bortoli; Garcias, 2016; Lewis; Rauturrier, 2019; Mannarino *et al.*, 2016).

Dentre os componentes importantes dos aterros sanitários, pode-se citar o sistema de impermeabilização de fundo ou revestimento de fundo das células, com função é impedir a contaminação do solo e das águas subterrâneas (Emmanuel *et al.*, 2020; Katsumi *et al.*, 2001; Krishna; Harish, 2021; Rowe, 2012).

Outro sistema é de drenagem e tratamento de líquidos e gases, haja vista que seu objetivo é evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais, controlar o aumento da pressão neutra na massa de resíduos e evitar explosões

resultantes da interação entre os gases (Chavan; Kumar, 2018; Duan *et al.*, 2021; Jucá, 2011; Imbiriba *et al.*, 2020; Zhan *et al.*, 2020;).

O sistema de cobertura final eleva a vida útil do aterro sanitário, pós encerramento das atividades, por ser uma camada separadora entre os resíduos e o meio ambiente, além de minimizar a emissão de gases para a atmosfera e reduzir a infiltração de água de chuva para o interior da massa de RSU (Apiwantragoon *et al.*, 2015; Hauser *et al.*, 2001; Ni *et al.*, 2020; Rock *et al.*, 2012; Shaikh *et al.*, 2019; Sobti; Singh, 2017; Stock *et al.*, 2020). Esse proporcionará a diminuição do volume gerado de lixiviado.

A maioria dos artigos na área de RSU e aterros sanitários aborda gestão integrada e/ou gerenciamento e reciclagem (Gonçalves; Moraes; Marques; Lima, 2018; Lombardi; Carnevale; Corti, 2015; Vergara; Tchobanoglous, 2012), além do enfoque quanto às falhas na camada impermeabilizante de base ou revestimento de fundo dos aterros sanitários (Genelle *et al.*, 2014; Gonçalves *et al.*, 2017; Turner *et al.*, 2017).

Percebe-se também uma lacuna relevante no que diz respeito ao comportamento de diferentes sistemas de cobertura final de aterro sanitário, de acordo com a identidade climática e pluviométrica, e que interfere no desempenho e eficiência dessa cobertura.

A cobertura final de aterro sanitário pode ser do tipo convencional (resistiva) e evapotranspirativas, entre outras (Hauser *et al.*, 2005; Hauser, 2009; Stock *et al.*, 2020). A convencional visa o impedimento máximo da passagem de água precipitada em direção à massa de RSU, portanto utiliza materiais com coeficiente de permeabilidade baixo (inferior a  $10^{-7}$  m/s), como as argilas compactadas, geomembranas, combinações de geomembranas com argilas compactadas.

Já os sistemas de cobertura final evapotranspirativas utilizam pelo menos dois tipos de materiais (geralmente solos) com diferentes granulometrias, sendo um material mais fino e outro com granulometria mais grossa, ambos não são compactados com densidade seca máxima, possibilitando que parte da água precipitada fique armazenada nos vazios da camada superior, e a outra parte seja evaporada pela superfície da cobertura e/ou transpirada pela vegetação, trazendo resultados eficazes quanto à minimização de água para dentro dos RSU, evitando uma maior contribuição a quantidade de lixiviado gerado.

A ausência ou até mesmo poucas pesquisas sobre o comportamento de cobertura final do aterro sanitário, submetida a padrões de precipitações pluviométricas, pode favorecer um aumento na estimativa da quantidade de lixiviado, produzidos a partir da decomposição dos RSU (Grugnaletti *et al.*, 2016). Para isso, é necessário pesquisar sobre as componentes do balanço hídrico e o material de cobertura final para cada região em que será instalado o aterro sanitário (Beck-Broichsitter; Gerke *et al.*, 2018; Berger; Groengroeft *et al.*, 2019; Scalia; Benson, 2010; Stock *et al.*, 2020; Zhan;Qiu;Xu, 2016).

Portanto, um maior conhecimento do comportamento da cobertura frente ao clima local pode levar a estimativas mais realistas.

As pesquisas internacionais têm evidenciado a importância em quantificar a infiltração de água de chuva nas coberturas de aterros sanitários (Kamon *et al.*, 2003; Mijares *et al.*, 2012; Shaikh *et al.*, 2018; Stock *et al.*, 2020; Udoh, 2012; Yesiller *et al.*, 2019; Zhan;Qiu;Xu, 2016), na estimativa do volume de lixiviado gerado no interior das células de aterros (Beck-Broichsitter *et al.*, 2018; Widomski *et al.*, 2015).

De acordo com a pesquisa realizada de forma sistemática, descrita e detalhada mais na frente, no Brasil, há poucos artigos sobre a temática cobertura final de aterro sanitário (Costa *et al.*, 2018; Gonçalves *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2019), e especificamente para a região Amazônica oriental tem-se o trabalho de Imbiriba *et al.* (2020), que versa sobre a problemática de emissão de gás metano e carbônico proveniente de um aterro sanitário situado na região metropolitana de Belém-PA, e um outro estudo que trata de cobertura final de aterro sanitário e balanço hídrico, com uso de resíduos da construção, para a estimativa de vazões de lixiviado (Oliveira; Braga, 2017).

A PNRS (BRASIL, 2010) e o Novo Marco do Saneamento (BRASIL, 2020) apresentam como meta a implantação de aterros sanitários em municípios localizados na Amazônia nos próximos 5 (cinco) anos, levando em consideração um ciclo de vida útil de 10 a 20 anos. O comportamento da cobertura final de um aterro a ser utilizado associado aos padrões de chuva de uma região úmida, que é o caso da Amazônia, deve ser estudado, para garantir os critérios de estabilidade, segurança e estanqueidade do volume precipitado sobre a massa dos RSU.

Grande parte da região Amazônica possui clima úmido, com uma precipitação média anual que varia de 2.300 a 3.000 mm e percentual de infiltração

de 40% (Ishihara; Fernandes *et al.*, 2014; Rocha *et al.*, 2017), ou seja, quando um ambiente de um aterro sanitário recebe essa infiltração, através da sua cobertura final, esse volume infiltrado soma-se ao volume de lixiviado proveniente da biodegradação dos RSU (Silva *et al.*, 2020), promovendo assim um volume ainda maior de lixiviado que, conseqüentemente, deverá ser drenado e tratado. Cabe comentar que, o investimento em drenagem e tratamento do lixiviado é bastante elevado, e com a problematização de encontrar a composição de cobertura final mais adequada para a região gerará benefícios econômicos e ambientais.

A quantidade de infiltração de água é um dos principais parâmetros utilizados para quantificar o desempenho num sistema de cobertura (Albright; Benson; Apiwantragoon, 2013; Perotti *et al.*, 2022; Stock *et al.*, 2020).

Somado a infiltração e a permeabilidade do material natural, têm-se também a água presente nos vazios dos solos das coberturas (teor de umidade no solo) e sua sucção, pois combinados fornecem a capacidade de armazenagem das barreiras e atestam seu desempenho perante os níveis de percolação (Albright *et al.*, 2004, 2006; Albright; Benson; Apiwantragoon, 2013; Apiwantragoon; Benson; Albright, 2015; Perotti *et al.*, 2022).

Deste modo, foi primordial comparar dois tipos de cobertura final de aterro sanitário, levando em conta o balanço hídrico e a composição com solos representativos de uma região da Amazônia, no município de Marabá-PA.

### **1.1. HIPÓTESE**

Os aterros sanitários são compostos por sistemas específicos para minimizar os efeitos adversos ao meio ambiente, seja na emissão de gás e/ou mitigação na geração de lixiviado. Um dos elementos mais relevantes para essa mitigação é a utilização de uma cobertura ao final de vida útil do aterro, compatível com as características locais climatológicas e geotécnicas do material a ser empregado nessa cobertura. Dessa forma, o que vale para uma determinada região poderá não ser válida para outra.

A composição e tipo de material de cobertura final de um aterro são elementos a serem definidos de forma técnica e estratégica, a fim de promover uma efetividade e segurança dessa cobertura. Geralmente, essas coberturas são compostas por solos naturais compactados e muitas vezes não alcançam os parâmetros mínimos de condutividade hidráulica.

As condições atmosféricas e as características geotécnicas do(s) material(is), que formam a cobertura final, influenciam diretamente no movimento da água (fluxo) em direção ao RSU, por meio da infiltração, culminando na maior geração de lixiviado. Essa infiltração por sua vez é influenciada pelo balanço hídrico do conjunto atmosfera e do material de cobertura final do aterro sanitário.

Por isso, surge a necessidade de pesquisar composições e materiais mais aplicáveis à cobertura final localizadas em regiões úmidas do Brasil, como no caso da região da Amazônia, objeto de estudo desta pesquisa.

Para esta pesquisa, além da cobertura final de aterro sanitário do tipo convencional com solo fino compactado, amplamente utilizada no Brasil, têm-se a proposta também de uma cobertura final alternativa do tipo evapotranspirativa - barreira capilar. Essa cobertura é composta com pelo menos duas granulometrias distintas, um solo mais grosso e outro solo fino, sendo o primeiro mais à superfície em contato com a atmosfera.

A escolha de solos como material de construção da camada de cobertura final deve-se a facilidade de obtenção e ter quantidade disponível expressiva na região objeto de estudo, e a escassez de pesquisas sobre o comportamento destes solos em cobertura final de aterro sanitário, principalmente em condições climáticas tropicais e com a sazonalidade Amazônica.

Essas premissas norteiam a hipótese levantada nesta pesquisa, como:

Os solos tropicais latossolo vermelho-amarelo podem ser utilizados como materiais componentes de cobertura final do tipo convencional e evapotranspirativa de aterros sanitários, pois minimizam a infiltração de água de chuva até os RSU e apresentam desempenho satisfatório em relação ao microclima, principalmente no período chuvoso da Amazônia Paraense, que chega acima de 420 mm (Hoffmann *et al.*, 2018).

Para confirmar essa hipótese, necessita-se elucidar sobre as seguintes questões de pesquisa:

- a. os materiais naturais utilizados no estudo atendem critérios geotécnicos para a cobertura final de aterro sanitário em regiões úmidas da Amazônia?
- b. Qual seria a melhor configuração de uma cobertura final de aterro sanitário frente aos efeitos climáticos e sazonalidades de uma região úmida?
- c. Qual cobertura final apresentará melhor desempenho para minimizar a geração de lixiviado no aterro?

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência do balanço hídrico em dois tipos de sistemas de cobertura final de aterro sanitário em uma região da Amazônia.

Os objetivos específicos incluem:

- a. quantificar cada componente do balanço hídrico climatológico, especialmente a parcela de percolação introduzida na cobertura final de um aterro sanitário.
- b. analisar a composição dos materiais de cobertura final do aterro sanitário no comportamento geotécnico e mineralógico.
- c. avaliar a viabilidade técnica da utilização de solos tropicais da região amazônica paraense em cobertura final de aterro sanitário;
- d. comparar o desempenho do uso de cobertura final convencional com cobertura final evapotranspirativa - barreira capilar submetidos a padrões de precipitação pluviométrica de uma região da Amazônia.

## 1.3. JUSTIFICATIVA

A PNRS (Brasil, 2010) tem como um dos principais objetivos o fechamento de todos os lixões a céu aberto, a destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos (reutilização, reciclagem, compostagem e aproveitamento dos resíduos para fins energéticos) e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos<sup>1</sup> nos aterros sanitários.

Entretanto, o Brasil, assim como outros países em desenvolvimento, possui poucas iniciativas quanto a destinação ambientalmente adequada (Alfaia *et al.*, 2017; Leme *et al.*, 2014), processos esses mais recomendados na literatura e já aderidos em países desenvolvidos (Ali; Courtenay, 2014; Ji *et al.*, 2016).

Por mais que países desenvolvidos já tenham aderido em massa aos procedimentos de reciclagem e reutilização dos resíduos, o Brasil ainda está em busca da transição da disposição de rejeitos<sup>1</sup> em lixões e aterros controlados para

---

<sup>1</sup> Material que esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada em aterros (Brasil, 2010),

aterros sanitários e pouca adesão a reciclagem e compostagem anteriormente a disposição final (Alfaia *et al.*, 2017; Scarff *et al.*, 2011).

No Brasil, os aterros sanitários provavelmente ainda existirão por muito tempo, e medidas devem ser tomadas para reduzir a geração de lixiviado e as emissões de gases de efeito estufa provenientes da biodegradação dos resíduos orgânicos. Uma medida importante é o estudo de coberturas finais de aterros sanitários, levando em consideração o balanço hídrico de cada região.

Embora este trabalho se concentre em cobertura final para aterros sanitários, estudos de cobertura também podem ser aplicados aos lixões e aterros controlados, que no Brasil representam cerca de 45% somando-se esses dois tipos de disposição final inadequada de RSU (World Bank Group, 2018). Além disso, diante da iminência de fechamento dos lixões e frente à necessidade dessas áreas receberem cuidados corretivos, já que não haverá realocação dos resíduos dispostos em lixões para os aterros sanitários, é de suma importância que exista um aporte técnico com referência a cobertura final, a fim de minimizar a entrada de água para o interior dos RSU dispostos em células de aterro, principalmente em regiões com elevado índice pluviométrico, como é o caso de cidades situadas na Amazônia.

Vislumbra-se que, por ser a última etapa de um sistema do aterro, a cobertura final tanto para lixões e aterros controlados, assim como para novos aterros sanitários, devam ser executados com o mesmo rigor técnico de outros projetos de engenharia, uma vez que se prioriza uma cobertura final de baixa manutenção, protetiva contra erosão e que atue como uma barreira física no controle da infiltração da precipitação e consequente diminuição na geração de lixiviados.

Ademais, os locais de disposição final de RSU necessitam, após seu fechamento, criar alternativas seguras para o reaproveitamento desses espaços, seja para uso comercial, industrial e de lazer (Rahardjo *et al.*, 2017). A cobertura final é um elemento principal para ressignificar o potencial do local, que era um aterro sanitário.

Uma das questões que devem ser investigadas ao projetar a cobertura final de aterros sanitários são as variações climáticas locais, impostas diretamente nessas coberturas ao longo de toda sua vida útil. Dentre as questões climáticas destaca-se a precipitação, que é tratada como um elemento de entrada para o cálculo do balanço hídrico, e que tem forte relação com o comportamento do fluxo de água no meio poroso (material que compõe as coberturas).



Ao se tratar de um aterro sanitário localizado em uma cidade na Amazônia (Marabá-PA), que possui um clima úmido, com elevados índices pluviométricos, é inerente que ocorram infiltrações de água relevantes pela cobertura, e por conseguintes vazões em direção aos RSU, gerando assim maior volume de lixiviado a ser tratado.

Por isso, faz-se necessário estudos comparativos entre tipos de coberturas final de aterro sanitário, convencional e evapotranspirativa, a fim de estabelecer aquela mais adequada em termos de sazonalidade das precipitações pluviométricas, características da região amazônica, de modo a se obter critérios técnicos quanto a escolha dos materiais que a comporão.

Esta pesquisa constitui uma proposta de investigação para preencher a lacuna referente ao estudo do comportamento de uma cobertura final de aterro sanitário, frente ao balanço hídrico de uma região úmida da Amazônia Paraense.

Além disso, a presente pesquisa pode contribuir para o desenvolvimento de projetos de cobertura final de aterro sanitário, uma vez que no Brasil verifica-se que o destino final dos RSU, pelo menos nos próximos 20 anos, ainda será o aterro sanitário (Alfaia *et al.*, 2017; Battistelle *et al.*, 2015; BRASIL, 2020; Costa *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2018; Deus *et al.*, 2016).

#### **1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO (FRAMEWORK)**

A tese está estruturada em Capítulo 1– Introdução, contendo o estado da arte com referências bibliográficas dos últimos 5 anos, além de trabalhos clássicos e seminal fundamentais para esta pesquisa. Compendo ainda a Introdução, é apresentado o problema da pesquisa, hipótese, objetivos e justificativa. Finalizando o capítulo 1, está exposto a estrutura do trabalho com encadeamento de ideias em forma de capítulos desta tese de doutorado.

Com um levantamento bibliográfico sistemático e auditável foi possível identificar a fronteira do conhecimento, a lacuna de pesquisa, as contribuições científicas em forma de artigo (ver em detalhe no item 2.2). Permitindo assim, observar o que seria o avanço da ciência quanto à abordagem do comportamento do balanço hídrico em cobertura de aterro sanitário na região amazônica, sendo esse o objeto nesta pesquisa. A partir da detecção da lacuna de pesquisa da tese, selecionaram-se os assuntos e seus respectivos trabalhos científicos que necessitam

ser abordados, empíricos e teóricos, para fundamentação da pesquisa (Capítulo 2 – Referencial Teórico).

Inserido ao Capítulo 2 – Referencial Teórico, destarte o subitem 2.2. Sistemas de Cobertura Final de Aterros Sanitários: Revisão Sistemática da Literatura e Revisão Bibliométrica. Que contempla quanto as composições e materiais utilizados em cobertura final de aterro sanitários, entre 2000 e 2019, baseado em pesquisa sistemática na base de dados Scopus e Scielo.

Os resultados levantados da RSL e RB subsidiou também o desenvolvimento do Capítulo 3 – Materiais e Métodos. No capítulo consta uma descrição dos dois materiais a serem utilizados nos experimentos e modelagem do balanço hídrico (solos topicais da região de Marabá-Pará) e o detalhamento das quatro etapas do percurso metodológico, que servirão para responder os objetivos do trabalho e a problematização construída em torno do tipo de cobertura de aterros sanitário mais aderente a regiões úmidas, de modo a minimizar a infiltração de água de chuva até os resíduos sólidos urbanos.

Em seguida, no Capítulo 4 é apresentada os resultados e discussão frente as demandas mencionadas nos objetivos.

E por fim conclusão as referências utilizadas neste trabalho, de forma a fundamentar a teoria e identificar a lacuna de pesquisa.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

O capítulo referencial teórico possui o arcabouço teórico e prático para o desenvolvimento do estudo, com foco na lacuna de pesquisa, que trata do estudo de uma cobertura final de aterro sanitário e seu desempenho hidrológico, quando submetido a padrões de chuvas amazônicas.

Para isso, elencaram-se os assuntos como panorama da disposição final dos RSU, no mundo e no Brasil, tipos de tecnologias de disposição final de RSU, partes constituintes de um aterro sanitário com ênfase no sistema de cobertura final, fluxo de água em solo e infiltração, e balanço hídrico em cobertura final.

A escolha dos autores que compõem esse referencial teórico se deu com base inicial na seleção de artigos científicos realizada durante a elaboração do primeiro artigo vinculado a esta tese. O referido artigo tratou-se de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) combinada com Revisão Bibliométrica (RB), e que contou com um processo metodológico rigoroso, mediante ao protocolo de pesquisa, e, por conseguinte caracterizou-se por ser auditável e replicável.

A pesquisa foi iniciada com o uso de palavras chaves, criação de *strings*, filtros, base de periódicos, e escolha da ferramenta de gerenciamento de artigos StArt, que auxiliou na elaboração do artigo intitulado “Repercussões das tecnologias de cobertura de aterros sanitários: literatura sistemática e revisão bibliométrica entre 2000 e 2019”

A partir dessas referências encontraram-se outros artigos sobre a temática de coberturas de aterros, além da pesquisa documental na literatura consagrada sobre o tema, em bases de artigos científicos, principalmente Science Direct, Web Of Science e Scielo.

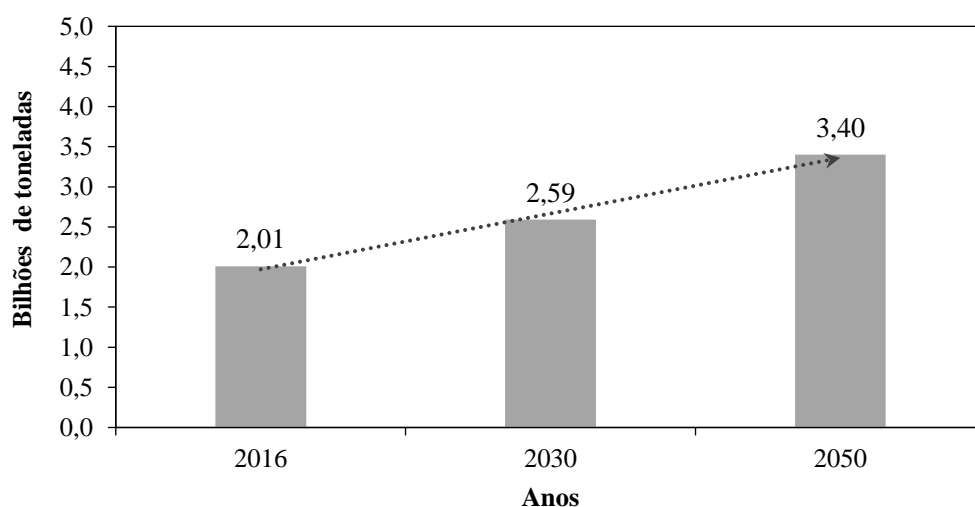
### **2.1. PANORAMA DOS RSU**

Os problemas com o meio ambiente relacionados aos resíduos sólidos vêm se destacando em uma grande quantidade de artigos científicos originários de muitos países ao redor do mundo (Chen *et al.*, 2015; Fu *et al.*, 2010; Lewis; Rauturier, 2019; Ma; Hipel, 2016). O aumento populacional e consequente crescimento da sociedade e consumo estão intimamente ligados ao aumento da geração de resíduos sólidos (Alfaia; Costa; Campos, 2017), fato que pode ser correlacionado, segundo Lima (2015), ao desenvolvimento das cidades e aumento da renda da população,

mais poder de consumo, e consequentemente mais resíduos são gerados (Baptista *et al.*, 2019).

Segundo World Bank Group (2018), no ano de 2016, o mundo gerou 2,01 bilhões de toneladas de RSU, 33% dos quais não são gerenciados de maneira ambientalmente adequada (Figura 1). A tendência apontada pelo mesmo grupo é que até o ano de 2050 haverá aumento de 60% na geração de resíduos sólidos no panorama mundial. Fica sempre o questionamento, onde serão dispostos tantos resíduos?

Figura 1. Projeção de geração de RSU no mundo.

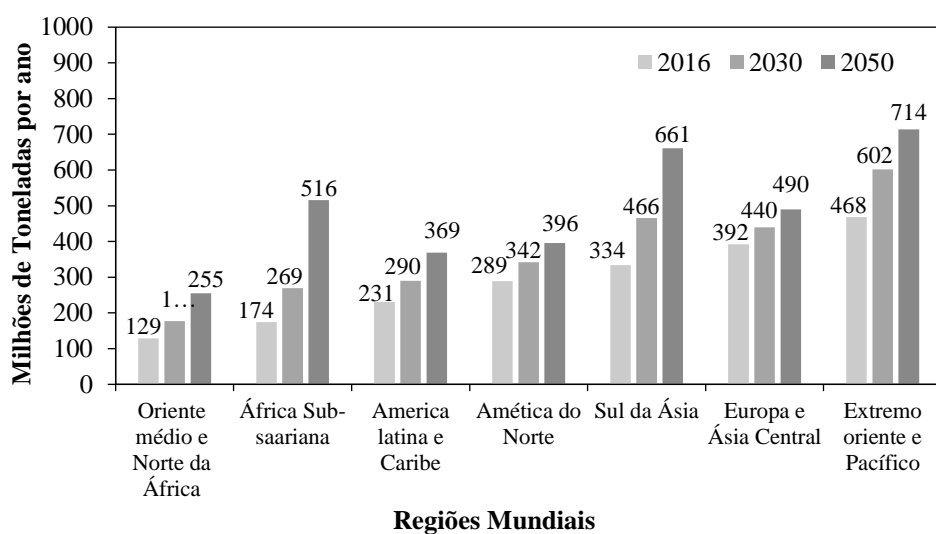


Fonte: Adaptado World Bank Group (2018).

Em todo o mundo, é em média 0,74 kg/hab.dia, mas varia amplamente, de 0,11 a 4,54 kg/hab.dia (World Bank Group, 2018). Embora representem apenas 16% da população mundial, os países de alta renda geram cerca de 34%, ou 683 milhões de toneladas, dos resíduos do mundo (World Bank Group, 2018).

Geralmente, se observa uma correlação diretamente proporcional entre a geração de resíduos e o nível de renda da população, ou seja, quanto maior o poder aquisitivo das pessoas mais resíduos são gerados (Deus *et al.*, 2015; Fu *et al.*, 2010; Mannarino; Ferreira; Gandolla, 2016; Vergara; Tchobanoglous, 2012). Porém, de acordo com a estimativa feita pelo Word Bank Group (2018) é previsto um aumento na geração diária de resíduos per capita, em países de alta renda, de 19% até 2050, e em países de baixa e média renda é esperado um aumento de aproximadamente 40% ou mais (Figura 2).

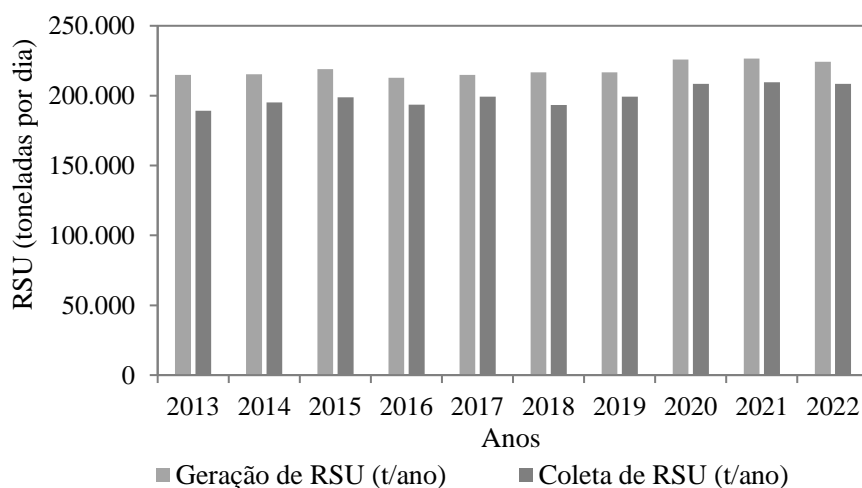
Figura 2. Geração projetada de resíduos, por região (milhões de toneladas/ano)



Fonte: Adaptado de World Bank Group (2018).

No Brasil, a ABRELPE tem apresentado anualmente um panorama dos RSU, que contempla dados da sua geração e coleta (Figura 3). Além dessas informações, gratuitamente, com apenas cadastro simples no site da Associação, tem-se acesso a panorama de destinação e disposição final dos RSU, dados de coleta seletiva, número de empregados relacionados a gestão, gerenciamento e operacionalização dos resíduos sólidos no Brasil.

Figura 3. Geração e coleta de RSU no Brasil (em toneladas/dia)

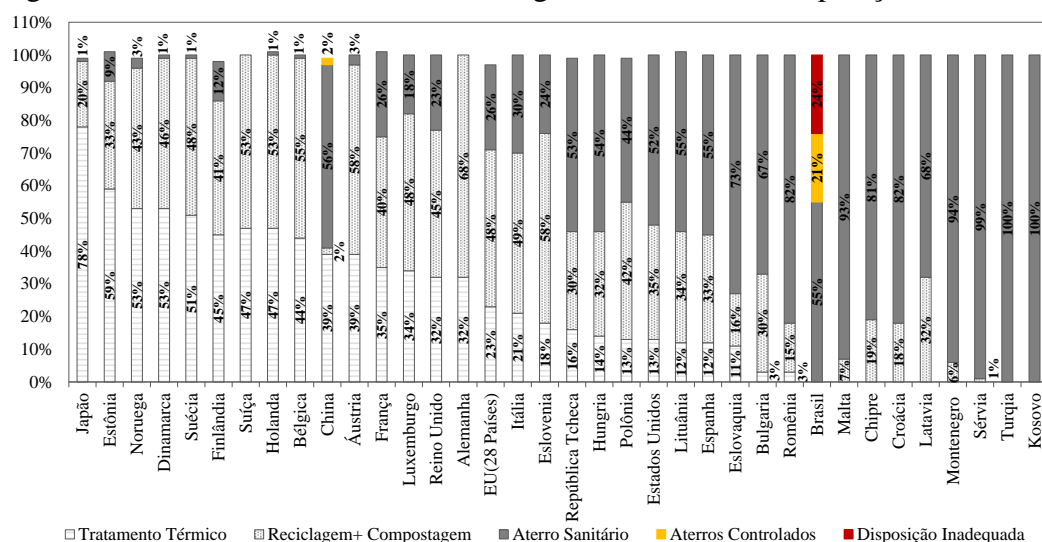


Fonte: Adaptado da ABRELPE (2022).

Em relação ao cenário internacional, quanto a tecnologia de tratamento e a disposição final dos RSU, o World Bank Group (2018) constatou que o Brasil ainda

é um País onde predomina o uso de aterros sanitários, e ainda existe a disposição final em aterros controlados e lixões, conforme pode ser observado na Figura 4. Não há informações quanto a compostagem e reciclagem, quanto tratamento térmico dos resíduos, no Brasil.

Figura 4. Cenário internacional da tecnologia de tratamento e disposição final RSU.



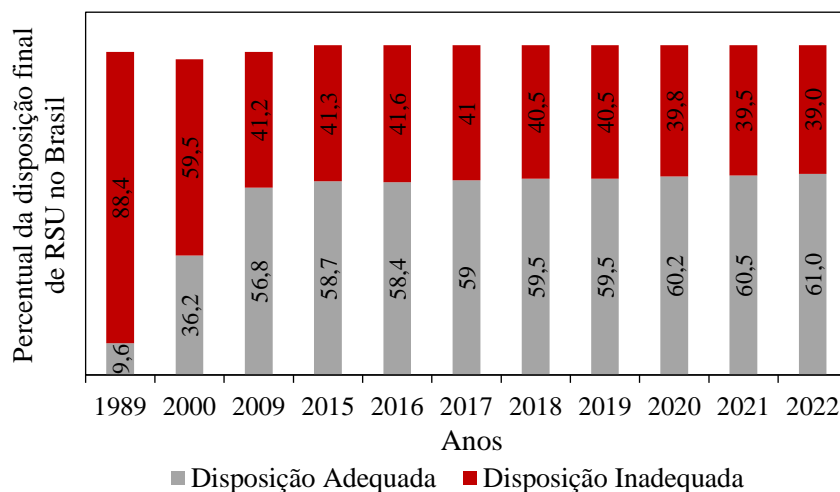
Fonte: Adaptado de World Bank Group (2018).

Países como Estados Unidos, Japão, Alemanha e China desenvolvem e aplicam diferentes tecnologias para o tratamento e disposição final de resíduos sólidos, entre os tratamentos destaca-se a incineração com aproveitamento energético com ou sem uso de biorreatores (Baptista *et al.*, 2019; Mannarino; Ferreira; Gandolla, 2016). O percentual elevado de 52% de massa dos resíduos sólidos gerados no USA que são depositados em aterros sanitários, e na China com 56%, pode ser atribuído a serem países com grande extensão territorial, o que corrobora o uso desse tipo de tecnologia de tratamento final dos resíduos (World Bank Group, 2018).

Em países sul-americanos, em destaque o Brasil que possui grande extensão territorial e em quantidade de habitantes é considerado um dos grandes geradores de RSU, em 2019 gerou 79 milhões de toneladas de RSU e ainda possui como principal disposição final os aterros sanitários (59,5%). Entretanto, esses RSU ainda são depositados em lixões ou aterros controlados, o que representa um total de 23% de massa dos resíduos coletados (ABRELPE, 2020).

De acordo com os dados do relatório da ABRELPE (2022), percebe-se de 1989 até o ano 2009 um crescimento significativo de disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários, porém essa performance não foi a mesma entre o período de 2009 a 2022, mesmo como uma das metas do PNRS (Figura 5) e com Marco Legal do Saneamento (2020).

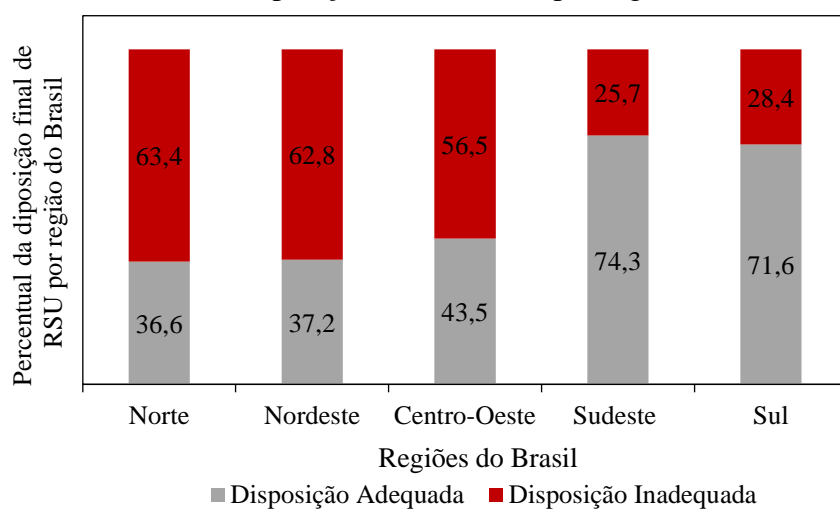
Figura 5. Percentual do tipo de disposição final de RSU no Brasil



Fonte: Adaptado da ABRELPE (2022).

A Figura 6 apresenta o percentual da disposição de RSU nas cinco regiões do Brasil

Figura 6. Percentual da disposição final de RSU por região do Brasil em 2022.



Fonte: Adaptado da ABRELPE (2022).

Os dados levantados para o ano 2022, pela ABRELPE (2022), mostram que dos municípios brasileiros, as regiões Norte e Nordeste registraram as maiores proporções de disposição final inadequada – 63,4% e 62,8%, respectivamente, enquanto que os localizados nas regiões Sul e Sudeste apresentaram as menores proporções – 28,4% e 25,7%, respectivamente (Figura 6).

No Brasil, a implementação da PNRS (BRASIL, 2010) trouxe novas perspectivas no âmbito dos resíduos sólidos. Para isso, há necessidade que as cidades pratiquem uma gestão integrada e um bom gerenciamento dos RSU, atendendo aos objetivos da PNRS de não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, até a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Nos termos da PNRS (BRASIL, 2010), e com atualização das datas da obrigatoriedade de todos os municípios em extinguir os lixões e implantar aterros sanitários, de acordo com o porte populacional de cada município, o Novo Marco Legal do Saneamento (BRASIL, 2020), contém o trecho apresentado a seguir.

“I - Até 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais;

II - Até 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes;

III - até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010;

IV - Até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010.

§ 1º (VETADO).

§ 2º Nos casos em que a disposição de rejeitos em aterros sanitários for economicamente inviável, poderão ser adotadas outras soluções, observadas normas técnicas e operacionais estabelecidas pelo órgão competente, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais” (BRASIL, 2020, p. 27).

Mesmo com metas e prazos contidos no Novo Marco do Saneamento (BRASIL, 2020), percebe-se o não cumprimento por parte de muitos municípios dos estabelecidos por esse instrumental legal.

A disposição final dos RSU é a última etapa do gerenciamento, geralmente, com ou sem tratamento prévio, em células de aterros sanitários, principalmente em países com economia em desenvolvimento (Zhang *et al.*, 2019).



Diante disso, nota-se que no Brasil a adoção de aterros sanitários é a alternativa mais utilizada para armazenagem de RSU em larga escala, uma vez que o objetivo deste tipo de empreendimento é utilizar técnicas de engenharia baseadas na normatização vigente para armazenar os RSU com segurança e responsabilidade socioambiental (Mannarino; Ferreira; Gandolla, 2016).

Todavia, na disposição de RSU em aterros é necessário o monitoramento do fluxo de água proveniente de precipitações pluviométricas, pois a infiltração de água em camadas constituintes dos aterros sanitários eleva o volume de lixiviado no interior das células com RSU (Idowu *et al.*, 2019; Gonçalves; Moraes; Marques; Lima, 2018; Stock *et al.*, 2020) .

## **2.2.PROJETOS DE ATERROS SANITÁRIOS**

Uma obra de aterro sanitário é composta por elementos diversos que desempenham funções específicas dentro deste (Izzo; Malher; Rose, 2013), e que quando corretamente dimensionados permitem uma disposição final ambientalmente adequada (Costa *et al.* , 2018).

Para Environmental Protection Agency (EPA), agência de cunho ambiental e de conservação dos Estados Unidos (USA), que rege as Leis e Regulamentos sobre resíduos sólidos e aterros sanitários, a unidade de aterro de resíduos sólidos municipal é uma área grande a ser escavada para receber resíduos domésticos, que não funcione como local de represamento de água, podendo ser de propriedade pública ou privada (EPA, 1991, 2014).

Além disso, a agência dos USA preconiza que os aterros sanitários possuam um revestimento de fundo composto por uma camada de membrana flexível e abaixo dela uma camada de solo compactado com permeabilidade inferior a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s e um sistema de coleta de chorume projetado e construído para manter uma profundidade menor que 30 cm de chorume sobre o revestimento de fundo (*liner*).

No Brasil, a NBR 8419 (ABNT, 1992) define que o aterro sanitário é uma técnica de disposição final de RSU no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Segundo a norma, o método de disposição em aterro sanitário baseia-se em utilizar 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 solo na conclusão de cada jornada de

trabalho. Obrigatoriamente, ao encerrar a vida útil do aterro sanitário executa-se a cobertura final, que minimize as infiltrações de água de chuva na célula (NBR 13896 ABNT, 1997)

Sobti e Singh (2016) apontam que um aterro sanitário não é um local de descarte seguro para RSU e resíduos perigosos, sendo necessário um projeto de engenharia detalhado para que ocorra um isolamento dos resíduos para com o meio ambiente. Geralmente, o material que faz a função desse isolante, tanto como revestimento de fundo quanto o de cobertura final, é um solo com baixa permeabilidade ( $k < 10^{-7}$  cm/s). Apesar disso, há relatos de que certos aterros sanitários no continente africano não há qualquer cobertura ou proteção final.

No contexto brasileiro, basicamente existem duas normas da ABNT antigas, com publicação de mais de duas décadas, e ainda vigentes que estabelecem direcionamentos gerais quanto a projeto de aterro sanitário, que são as normas NBR 8419 (ABNT, 1992) e a NBR 13896 (ABNT, 1992).

A NBR 13896 (ABNT, 1992) versa sobre critérios de projeto, implantação e manutenção de aterros sanitários, que perpassa sobre impermeabilização para minimização da infiltração do lixiviado em direção as águas subterrâneas, o monitoramento de gases, correlações com clima e principalmente quanto ao pico de precipitações pluviométricas, plano de emergência, plano de fechamento e inspeção e manutenção. A norma ainda faz referência quanto aos sistemas de drenagem interna e externa, sistemas de detecção de vazamentos e monitoramento de águas subterrâneas, e destaca os critérios que podem ser empregados para a localização e implantação dos aterros como forma de minimizar o impacto para com o meio ambiente e assim proporcionar melhor aceitação da população vizinha.

Já a NBR 8419 (ABNT,1992) estabelece as condições mínimas necessárias para apresentação dos projetos de aterros sanitários de RSU, que compreendem em memorial descritivo e técnico, cronograma de execução e custo, e primordialmente os desenhos de projetos, devendo o projeto do empreendimento ser submetido ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), resolução n° 001/1986.

Do ponto de vista de hidrogeotecnia presente na NBR 8419 (ABNT,1992), destarte a necessidade de investigação geológica-geotécnica do terreno envolvido no aterro sanitário tais como a natureza dos solos e água subterrânea, a estratigrafia do terreno, caracterização geotécnica do subsolo, permeabilidade e posição e dinâmica do lençol freático. Não menos importante, a norma destaca o

conhecimento de dados climatológicos mensais de precipitação e evapotranspiração, que são elementos importantes para determinação do balanço hídrico e estimativa do volume e vazão do lixiviado proveniente da deterioração dos RSU e infiltração de água de chuva.

Ao descrever as partes constituintes de um aterro sanitário pode-se dividir em dois grandes grupos, que são: o grupo de elementos drenantes e o outro grupo com elementos vedantes ou impermeabilizantes. Os elementos drenantes de um aterro sanitários estão contemplados pelos sistemas de drenagem interna do lixiviado e o sistema de drenagem de gás, principalmente da drenagem dos gases metano e carbônico, e não menos importante tem-se o sistema de drenagem externa ou superficial que é responsável em coletar as águas de chuvas e direcioná-las para fora das células de RSU conforme NBR 8419 (ABNT, 1992).

Quanto aos elementos vedantes, têm-se a impermeabilização inferior chamada de revestimento de fundo das células, e impermeabilização superior, como as coberturas diária, intermediária e final, previstos na NBR 8419 (ABNT, 1992).

Como foco na cobertura final do aterro sanitário, a NBR 8419 (ABNT, 1992) apresenta que o projeto deve conter a(s) espessura(s) da(s) camada(s) de cobertura final, o tipo de material a ser utilizado, os locais de onde serão extraídos o material para cobertura final e as respectivas quantidades previstas.

De forma a aprofundar a temática sobre a cobertura final do aterro sanitário, a NBR 13896 (ABNT, 1992) estabelece que no plano de encerramento deve constar o projeto e construção da cobertura final, de forma a minimizar a infiltração de água de chuva para o interior da célula, que exija pouca manutenção e combata erosão. Além disso, a norma especifica que o material componente da cobertura final do aterro sanitário possua um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural que compõem o terreno situado na abrangência da área do aterro.

A permeabilidade do solo natural, latossolo vermelho e amarelo da formação Itapecuru, é em torno de  $5,5 \times 10^{-3}$  cm/s ou  $5,5 \times 10^{-5}$  m/s (EMBRAPA, 1999).

Nos USA, o preconizado pela (EPA, 1991) em relação ao sistema de cobertura final, presente nos projetos de aterros sanitários, é que se deve dimensionar componentes de engenharia que minimizem a entrada de água de chuva para o interior da massa de resíduos, e proteger contra a erosão. Em suma, o sistema de cobertura final deve ser projetado e construído para:

- “I. Ter uma permeabilidade menor ou igual à permeabilidade de qualquer sistema de revestimento de fundo ou subsolos naturais presentes, ou uma permeabilidade não superior a  $1 \times 10^{-7}$  cm / s, o que for menor, e
- II. Minimizar a infiltração através da cobertura final do aterro com o uso de uma camada que minimize a infiltração, com um mínimo de 50cm solo, e
- III. Minimizar a erosão da cobertura final com o uso de uma camada de erosão que possua uma espessura mínima de 15cm solo, e que seja capaz de sustentar o crescimento das plantas nativas.” (EPA, 1991,p.3-4, tradução nossa).

Diante da pesquisa entre as normas técnicas, regulamentos e/ou leis dos países como Brasil (ABNT), Estados Unidos (EPA), Austrália e Europa (EUROSTAT), percebeu-se consenso em relação aos requisitos de desempenhos dos aterros sanitários e que são expressos em termos de resultados como “... evitar que o lixiviado chegue às águas subterrâneas ”e“ ... evitar que as águas superficiais provenientes de precipitação pluviométrica se misturem com os resíduos no interior das células e assim aumentem o volume de lixiviado. Apesar desses resultados de desempenhos serem importantes, eles são difíceis de mensuração em uma escala adequada para conclusões válidas e abrangentes, além de terem investimento elevado.

Deste modo, alguns trabalhos mostram-se bastante desafiadores ao realizar a avaliação de quais tipos de sistema de cobertura se comportam de maneira mais efetiva para a minimização da infiltração de água de chuva para o interior das células de RSU (Keelson, 2015; Mijares *et al.*, 2012; Shaikh *et al.*, 2018; Stock *et al.*, 2020; Udoh, 2012; Yesiller *et al.*, 2019; Zhan; Qiu; Xu, 2016), assim como trabalhos que estimaram o volume e a vazão dos lixiviados (Genelle *et al.*, 2014; Soh; Hettiaratchi, 2009; Udoh, 2012), e não menos importante pesquisa sobre materiais alternativos para cobertura final dos aterros sanitários (Kamon *et al.*, 2003; Kortnik *et al.*, 2008; Sobti; Singh, 2017).

Destarte o trabalho de Zhang e Sun (2014) que realizaram o estudo comparativo com dois tipos de cobertura final de aterro sanitário em regiões úmidas em três cidades com precipitações pluviométricas médias anuais de 810 mm ( em Suzhou, na China), 910 mm (na Filadelfia, nos USA) e 1000 mm (Juneau, nos USA). Apesar do uso mais comum de coberturas convencionais, com solo compactado ou material com baixa permeabilidade, para minimizar a infiltração de água de chuva em direção aos RSU, os melhores resultados obtidos foram com a

utilização de coberturas evapotranspirativas ou de balanço hídrico, que conta com componentes do balanço hídrico para minimizar essa infiltração.

Já em regiões áridas e semiáridas que possuem precipitação pluviométrica média de 415 mm/ano, trabalho semelhante de comparação de dois tipos de cobertura foi desenvolvido por Stock *et al.* (2020), que perceberam que nas coberturas convencionais, a evaporação foi o mecanismo mais eficaz na remoção de água para fora das coberturas, enquanto nas coberturas evapotranspirativas, a transpiração foi o mecanismo mais importante na remoção de água, contribuindo cerca de 58% a 73% para o balanço hídrico. Além disso, verificaram que essas coberturas dependem das características do solo e vegetação.

Como o recorte desta pesquisa trata do estudo do comportamento de uma cobertura final de aterro sanitário submetido a características hidrológicas e mensuração do balanço hídrico de uma região na Amazônia, fez-se necessário um levantamento aprofundado sobre sistemas de cobertura final de aterro sanitário no Brasil e no mundo. Esse estudo foi fundamentado por uma técnica de pesquisa da literatura denominada RSL e RB.

### **2.3. COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS: RSL E RB**

Não é raro ao fazer pesquisa bibliográfica, sem método científico de pesquisa, em que o autor se depare com problemas graves, tais como: inventário com apenas referenciais conhecidos pelo autor, aleatório, de predileção e repertório usual, o que favorece, muitas vezes, na limitação e parcialidade da revisão da literatura (Det Udomsap; Hallinger, 2020; Fu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2018; Medeiros *et al.*, 2015; Mesdaghinia *et al.*, 2015).

Neste contexto, atrelado ao encerramento do ciclo de vida útil do aterro sanitário é necessária uma atenção criteriosa quanto à cobertura final, pois geralmente é vista como um componente mais crítico do projeto (Costa; Mariano; Jucá., 2018). Essa cobertura visa minimizar a percolação da água, proveniente da precipitação pluviométrica, e a direciona para uma área drenante, promove ainda, indiretamente, o armazenamento ou a drenagem da água para as camadas subjacentes, sendo eventualmente removida por escoamento, evapotranspiração ou pela drenagem interna (Benson *et al.*, 2002; Hauser *et al.*, 2001; Hauser, 2009; Koerner; Daniel, 1997; Scalia IV; Benson, 2010; Yesiller *et al.*, 2019).

Para Hauser *et al.* (2001) os três requisitos principais para coberturas de aterro sanitário são: que minimize a infiltração nos resíduos e a percolação dos resíduos para as águas subterrâneas; isole os resíduos dos receptores e controle o movimento do vento ou da água; e, controle a emissão de gás do aterro.

Órgãos como a Environmental Protection Agency - EPA (Estados Unidos), Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (Brasil), Departamento de Estatística da Comunidade Europeia - EUROSTAT (países da Europa) e Ministry of the Environment Government of Japan (Japão), possuem legislações ambientais relacionadas a aterro sanitário e preveem que no plano de encerramento do aterro sanitário deva ter o projeto e construção da cobertura final, de forma a minimizar a infiltração de água em direção aos RSU, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro, além da minimização de emissão do gás metano para atmosfera.

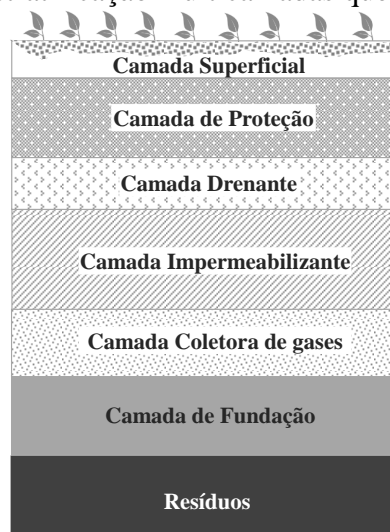
Portanto, a escolha da composição da cobertura de um aterro sanitário (com uma ou mais de uma camada) e o tipo de material exercem papel fundamental para minimizar a água de chuva infiltrada até os RSU e o volume total de percolato gerado (Izzo *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2018; Naves, 2019), tão quanto o aumento na geração do gás metano (Abushammala; Younes, 2018; Pitanga *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017).

Em um aterro sanitário convencional, os solos são geralmente usados como coberturas diária, intermediária e final (Stock *et al.*, 2020). Porém, o material de uso em ascensão da camada impermeabilizante é a geomembrana, ou uma geomembrana sobrejacente a camada de argila compactada (CCL) de baixa permeabilidade ( $k \leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s) ou com revestimento de geossintético com argila (GCL). E em menor escala tem-se usado membrana asfáltica e concreto asfáltico, que apresenta como vantagem, comparada a CCL, a não vulnerabilidade à fissuração por ressecamento, o que o torna uma alternativa atraente para algumas instalações localizadas em regiões áridas (Koerner; Daniel, 1997).

Outros materiais alternativos como o lodo de estação de tratamento de esgoto (Yang *et al.*, 2017), lodo de estação de tratamento de água (Gonçalves *et al.*, 2017), mistura de RSU com solo (Rose *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017) e até rejeitos de mineração e industriais estão sendo pesquisados para utilização em coberturas de aterros sanitários (Gapak *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2019).

De acordo com o Guia Técnico da US. EPA (2004) os componentes ideais de um projeto de cobertura final para aterros sanitários de RSU são: camada superficial para fins de vegetação; camada biótica ou de proteção, camada drenante, camada/barreira resistiva ou barreira hidráulica, camada de controle de gás, camadas filtrantes/filtros e camada de fundação (Figura 7). Ou seja, é um projeto composto por multicamadas que formam a cobertura final, onde cada camada possui uma função específica.

Figura 7. Perfil com a estratificação multicamadas que formam a cobertura final



Fonte: Adaptado de US.EPA (2004)

A estruturação dos sistemas de cobertura final de um aterro sanitário depende das especificidades de cada local, do tipo de material(is) utilizado(s) na(s) camada(s) de cobertura final e a função de cada cobertura (Hauser *et al.*, 2001; Koerner; Daniel, 1997; Stock *et al.*, 2020). Portanto, a cobertura final pode ser desde um sistema composto por uma camada única, até um sistema complexo formado por mais de uma camada, denominadas multicamadas ou sistema de cobertura formada por mais de uma camada, conforme a configuração já observada na Figura 7.

Dentre os tipos de cobertura final formada por mais de uma camada, destacam-se as camadas evapotranspirativas, que podem se subdividir em monolíticas ou barreiras capilares (Rock *et al.*, 2012; Zhang; Sun, 2014). As coberturas evapotranspirativas (ET), também chamada de camadas alternativas ou de balanço hídrico são projetadas levando-se em consideração os componentes do balanço

hídrico, como a capacidade de armazenamento de água no solo, precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração. Em síntese, esse sistema de cobertura final depende do solo para capturar e armazenar as águas precipitadas, até que sejam transpiradas pela vegetação ou evaporadas da superfície do solo (Keelson, 2015; Rock *et al.*, 2012, Zhang; Sun, 2014).

A US.EPA estabelece três pré-requisitos para que esse tipo de cobertura final (ET) seja validado, que são: desempenho equivalente a coberturas convencionais; possuir dados e resultados experimentais de estudos específicos com condições análogas em termos de solo e clima; e, instalação de sistema de coleta de dados em campo para verificar o cumprimento de metas da cobertura ET pelo menos semelhantes aos resultados nas coberturas convencionais. Os requisitos citados são mediados pelos componentes do Programa de Avaliação de Cobertura Alternativa da EPA dos EUA (ACAP), onde são avaliados os: histórico de uso, design geral, desempenho, monitoramento, custo, status atual, limitações de uso e exemplos específicos de projetos.

Rock *et al.* (2012) apontam que a cobertura final evapotranspirativa monolítica utiliza uma única camada de solo de granulação fina, geralmente disponíveis no local de instalação do aterro, e que possuem a capacidade de armazenar água (Benson; Bareither, 2012) e permite o desenvolvimento da vegetação para aumentar a evapotranspiração.

Quando se adiciona à cobertura monolítica uma camada com material de granulação grosseira (areia ou cascalho) tem-se uma cobertura final considerada do tipo barreira capilar (Rock *et al.*, 2012). Esse tipo de sistema composto fornece um contraste nas propriedades hidráulicas não saturadas, ao ponto de “se ter ruptura” capilar formada na interface das duas camadas, aumentando a capacidade de armazenamento da camada de solo de textura fina (Benson; Bareither, 2012; Zhan *et al.*, 2014).

A cobertura final do tipo evapotranspirativa se destaca por ser projetada em conformidade com as condições hidrológicas naturais e são levados em consideração os processos hidrológicos de regiões próximas ao local de implantação do aterro sanitário (Benson; Bareither, 2012; Stock *et al.*, 2020).

Catapreta (2008) e Costa (2015) entendem que as coberturas monolíticas prezam por ter um material de baixa permeabilidade, porém de alta capacidade de



armazenamento de água, o que permite a versatilidade em controlar o balanço hídrico seja com o armazenamento, evaporação e limitando a infiltração de água.

Por conseguinte, a água de chuva que não escoar superficialmente é rapidamente armazenada próxima a superfície, de onde é evaporada ou transpirada pela camada de vegetação (Catapreta, 2008).

Cobertura final evapotranspirativa do tipo barreira capilar é constituída por pelo menos dois solos de granulometrias diferentes, um solo mais fino mais próximo da superfície. A água que infiltra fica armazenada, e logo abaixo uma camada de material de granulometria mais granular que impede a água para dentro dos resíduos (Catapreta, 2008; Costa, 2015).

A busca pela disponibilidade de diferentes modelos de camada de cobertura final pode favorecer a utilização de materiais alternativos, haja vista que dependendo do modelo cada camada possui uma função específica, possibilitando o uso de materiais com características distintas.

Oliveira e Braga (2017) empregaram um modelo de cobertura final utilizando resíduos da construção civil (RCC) nas camadas de drenagem e coleta de gás em substituição a brita natural. A granulometria do RCC favoreceu o processo de drenagem e o fator de segurança foi superior àquele calculado com brita natural para essas camadas.

A cobertura final formada por uma única camada é responsável por receber toda a ação do meio ambiente como precipitação pluviométrica, insolação, vento, ações de animais, e geralmente é composta por solo natural compactado (Hauser *et al.*, 2001; Stock *et al.*, 2020).

A seção típica de uma cobertura final de aterro sanitário, formada por apenas uma camada pode ser observada na Figura 8. Denominada barreira resistiva ou barreira impermeabilizante, geralmente possui baixa permeabilidade, de forma a ter um elemento físico que interfira na infiltração na água de chuva para o interior dos resíduos. Geralmente, ela possui um sistema de drenagem externo bastante robusto, uma vez que a maior parte da água precipitada será escoada superficialmente. Acima da camada resistiva, lança-se solo sem compactação de modo a formar um substrato para o plantio de vegetação e proteção contra erosão e assoreamento.

Figura 8. Seção de cobertura final convencional



Fonte: Adaptado de US.EPA (2004)

Quando a função de minimizar a percolação da água, proveniente de precipitação pluviométrica, para o interior da massa de resíduos, o mais indicado são as coberturas convencionais, formadas por uma camada composta por materiais de baixa permeabilidade (entre  $1 \times 10^{-5}$  cm/s e  $1 \times 10^{-9}$  cm/s), que geralmente são argilas compactadas ou geomembranas (Koerner; Daniel, 1997; Rock *et al.*, 2012; Stock *et al.*, 2020; US.EPA, 2004).

Amplamente aplicada em regiões úmidas a cobertura final convencional ou resistiva é composta por solo fino compactado, visando a impermeabilização no topo da cobertura, evitando assim a infiltração de água para dentro dos resíduos e prevalece o escoamento superficial da água da chuva. Entretanto, quando as coberturas convencionais são aplicadas em regiões áridas e semiáridas, essas não apresentam o mesmo desempenho, pois esse sistema não funciona adequadamente, podendo surgir problemas com fissuras, aumentando a sua permeabilidade (Albright *et al.*, 2004; Sadek *et al.*, 2007; Zhan *et al.*, 2016).

Todavia, Hauser *et al.* (2001) comentam que coberturas convencionais são válidas, e que possuam camadas adicionais com atribuições de proteção e contra erosão, além de camadas de drenagem interna e coleta de gás. Porém, os autores como Hauser *et al.*(2001), Justin e Zupancic (2009), Ng *et al.*(2014) e Ni e Ng (2019) sugerem uma opção mais barata e prática, com a utilização de camada cobertura final vegetativas para aterros sanitários, ou seja, coberturas vegetais formadas por gramíneas nativas, elas são projetadas para trabalhar com as forças de natureza ao invés de tentar controlá-los.

Esses autores ainda acrescentam que as coberturas vegetais usam dois processos naturais para controlar a infiltração nos resíduos: (1) o solo fornece um

reservatório de água; e (2) a evaporação natural do solo mais a transpiração da planta (evapotranspiração) esvazia o reservatório de água do solo.

Outro tipo de cobertura final para minimizar a emissão de gás metano e dióxido de carbono provenientes da deterioração da matéria orgânica dos RSU (IPCC, 2014) são as coberturas oxidativas (Van Verseveld; Gebert, 2020). De acordo com o IPCC (2014) tanto o CH<sub>4</sub> quanto o CO<sub>2</sub> são classificados como gases de efeito estufa. Os aterros sanitários são uma importante fonte antropogênica de CH<sub>4</sub> e estima-se que contribuam com cerca de 18% das emissões antropogênicas globais de CH<sub>4</sub> para a atmosfera (Bogner *et al.*, 2011; Chavan; Kumar, 2018), além de ter efeitos nas mudanças climáticas (Thomassen *et al.*, 2019).

A utilização de *biocovers* (biocoberturas oxidativas) como cobertura final de aterro sanitário vem apresentando boas respostas na perspectiva absorvedora de uma parte da emissão de metano, quando comparado a outros materiais convencionais como CCL, GCL e geomembranas. É importante destacar a tendência na reutilização de materiais, que geralmente iriam parar dentro das células de aterro sanitário e que agora estão sendo utilizados como materiais alternativos em aplicações de engenharia, dentre elas em cobertura de aterro.

Chavan e Kumar (2018) definiram que as *biocovers* são coberturas compostas por materiais naturais e/ou alternativos, podendo ser composta por RSU, misturas de RSU e solo, ou resíduos sem valor agregado, ricos em matéria orgânica que otimizam a oxidação do gás CH<sub>4</sub>. Os autores, em seu artigo de revisão da literatura sobre o uso de *biocover* em cobertura de aterro sanitário, apontaram que a primeira tentativa de quantificar a oxidação do CH<sub>4</sub> na cobertura do aterro foi realizada por Whalen *et al.* (1990). Desde então, vários materiais que compõem *biocovers* em aterros sanitários estão sendo testados e validados quanto ao seu potencial de oxidação de CH<sub>4</sub> em vários ensaios de laboratório e de campo.

A composição da *biocover* é variada podendo aplicadas misturas de resíduos oriundos de biorreatores estabilizados com solos (Bogner *et al.* 2011; He *et al.*, 2008; He *et al.*, 2012; Wickramarachchi *et al.*, 2011), com materiais derivados de vermicompostagem (Obulisamy *et al.*, 2016), misturas com esterco (Wei *et al.*, 2016) e emprego de folhas verdes (Tanthachoon *et al.*, 2008). O emprego desses materiais se justifica por apresentar uma significativa quantidade de matéria orgânica, que acabam promovendo a absorção do gás metano ao longo do tempo.

No Brasil, Costa *et al.* (2018) estudaram uma camada de cobertura final oxidativa, composta pela mistura entre solo e um produto compostado na proporção de 1:1, avaliando os resultados da mistura em relação à infiltração e emissão de gases. Os autores observaram que, em termos de infiltração, a mistura apresentou características melhores que as obtidas para camada composta somente por solo, pois a retenção de água da mistura foi superior à do solo natural.

É primordial que existam mais estudos sobre o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo com o emprego de materiais alternativos que componham as *biocovers* que limitem a liberação de CH<sub>4</sub> de aterro sanitários, e que sejam validadas por meio da execução em escalas piloto a longo prazo e ensaios de laboratório (Barlaz *et al.*, 2004; Chavan; Kumar, 2018; Dever *et al.*, 2007; Santos, 2019; Stern *et al.*, 2007).

Diante do cenário de pesquisas especializadas e com os crescentes números de publicações sobre aterros sanitários, realizou-se de forma combinada, as técnicas de RSL e RB para identificar as coberturas e tipos de materiais mais empregadas em alguns países do mundo. Neste contexto, algumas definições se fazem necessário.

A RB é um método de análise quantitativa de registros de publicações de um ou mais repositório de dados e vem sendo utilizada para fundamentar em números o estado da arte de pesquisas científicas como teses, dissertações e artigos científicos com a finalidade de estudar as tendências de produção e de pesquisa científica (Det Udomsap; Hallinger, 2020; Fu *et al.*, 2010 ).

Essa ferramenta possibilita a verificação da contribuição do conhecimento científico proveniente de publicações em áreas desejadas de pesquisa, por meio dos dados estatísticos estudados, além de permitir situar um país em relação ao mundo, uma instituição em relação a um país, e cientistas individuais em relação às próprias comunidades científicas (Cassundé *et al.*, 2018; Soares *et al.*, 2016) .

Medeiros *et al.* (2015) definem como bibliometria um produto oriundo do estudo da arte de um assunto e que é passível de se determinar indicadores bibliométricos, ao se executar a fragmentação desses dados em componentes fundamentais. Destacam-se como indicadores bibliométricos o peso do artigo, do periódico, do evento, dos autores, etc. Pesquisas bibliométricas em bases de periódicos vêm sendo muito utilizadas, seja devido a avaliação da tendência de

estudo e desenvolvimento em determinada temática, assim como, sobre a relevância desses estudos (Li *et al.*, 2018; Mesdaghinia *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2019).

Os artigos que visam o emprego da bibliometria estão cada vez mais sendo utilizados com o objetivo de analisar a distribuição de idiomas, países, institutos, periódicos, palavras-chave de autores, padrões de autoria e co-relações-autoria (Fu, 2010). O referido autor desenvolveu um artigo de análise bibliométrica na área de resíduos sólidos por ser uma das preocupações ambientais mais importantes em todas as regiões do Irã e as universidades e institutos de pesquisa daquele país.

Chen *et al.* (2015) desenvolveram estudo bibliométrico com objetivo de mapear RSU no mundo, no período de 1997 a 2014, na plataforma de periódico Web of Science. Nesse trabalho foram utilizados indicadores bibliométricos de categorização como origem (país), assunto e métodos inovadores com emprego de palavras-chave. O resultado da pesquisa mostrou um avanço em escala acelerada sobre RSU. Como por exemplo, em 1997 apenas 147 artigos foram publicados sobre essa temática, em 2002 foram 219 artigos e em 2013 foram 800 artigos relacionados à RSU.

O crescimento acelerado de publicações na área de RSU está baseado em razões como a crise ecológica e ambiental global e o maior nível de consciência ambiental (Chen *et al.*, 2015). Um dado interessante também foi que a segunda palavra-chave mais citada nos artigos contidos na bibliometria foi “aterro”, ficando atrás apenas de RSU.

Aliado a RB, um método de identificar, avaliar e interpretar as pesquisas disponíveis relevantes para uma determinada questão ou fenômeno de interesse pode-se conseguir com o uso da técnica de pesquisa denominada RSL (Kitchenham, 2004; Kitchenham; Charters, 2007; Kitchenham; Sampaio; Mancini, 2007).

A palavra sistemática faz referência a forma de condução da pesquisa. Leva o autor a conseguir uma pesquisa da literatura de maneira planejada, sequenciadas, responsável e justificável, de modo a permitir que o estudo seja isento de viés, rigoroso, auditável, replicável e atualizável (Morandi; Camargo, 2015).

Para se construir o conhecimento necessário para iniciar uma pesquisa, os autores Ensslin e Ensslin (2007) desenvolveram uma metodologia própria e patenteada de *Knowledge Development Process Constructivist (Proknow-C)*. Em 2010, essa metodologia foi sendo consolidada com a publicação em periódicos, consagrando assim como um processo para mapeamento do conhecimento para o

desenvolvimento de RSL e/ou combinada com a RB, de acordo com as delimitações, filtros, percepções do tema e motivações do pesquisador (Ensslin *et al.*, 2014; Ensslin *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2012).

Autores relevantes da área de estado da arte e quantificação de trabalhos científicos se baseiam em obras científicas de autores provenientes da revisão sistemática, e executa-se bibliometria, para quantificar, avaliar a relevância, tendências de publicações dentro da linha temporal, origem das publicações, além de outros indicadores específicos, proporcionando ao processo de seleção do referencial bibliográfico que melhor se aproxime do interesse do assunto pesquisado. Portanto, têm-se inúmeros trabalhos científicos embasados na combinação das técnicas de RSL e análise bibliométrica, conforme pode ser visto a seguir.

Gularte *et al.* (2018) elaboraram um portfólio bibliográfico com os principais artigos publicados em revistas no período de 2000 a 2015 com o tema viabilidade econômico-financeira, gestão e sustentabilidade na reciclagem de resíduos da construção civil. Os autores empregaram a combinação da técnica de RSL com a bibliometria, por meio de dados estatísticos. A RSL foi baseada no método adotado por (Knoff *et al.*, 2014), que consiste em cinco fases de avaliações: (i) eliminação de arquivos que não eram artigos e de artigos repetidos e/ou com data de publicação inferior ao ano 2000; (ii) alinhamento pela leitura do título; (iii) alinhamento quanto ao reconhecimento científico; (iv) alinhamento pela leitura do resumo; e (v) alinhamento pela leitura integral dos artigos. O software utilizado para o gerenciamento das referências foi o Endnote®.

A técnica de RSL combinada com RB contribui no processo de redação e embasamento em determinados temas, com o propósito de integrar protocolos quantitativos para pesquisas de referências (Gonçales Filho *et al.*, 2016; Knoff *et al.*, 2014; Medeiros *et al.*, 2015).

De disponibilidade pública e gratuita existem inúmeros *softwares* e ferramentas que auxiliam na organização dos artigos para revisão sistemática da literatura e/ou bibliometria. De acordo com Fabbri *et al.* (2016) a ferramenta StArt, desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal de São Carlos (Lapes) suporta todo o processo de revisão sistemática da literatura e foi baixado pelos usuários de mais de vinte países. Possui pelo menos 3000

downloads de usuários distintos em todo o mundo, incluindo países como Brasil, Estados Unidos, Itália, Espanha, Reino Unido e outros.

A vantagem da utilização de softwares e/ou ferramentas facilitadoras é que já se tem rotinas pré-estabelecidas com a presença de três importantes etapas: planejamento, execução e sumarização.

Trabalhos como dos autores Octaviano *et al.* (2015), Dermeval *et al.* (2016), Fabbri *et al.* (2016), Bonidia *et al.* (2018), Castro e Jesus (2018), Feitosa *et al.* (2018), Santos *et al.* (2018), Jesus e Castro (2019), Al-Zubidy e Carver (2019), Armas *et al.* (2020) utilizaram a ferramenta StArt para os seus artigos de revisão sistemática de literatura e/ou revisões bibliométricas.

O objetivo deste procedimento sistemático e auditável na literatura se fez necessário por se considerar objeto principal deste trabalho a identificação das tecnologias e o aprofundamento de saberes quanto à composição e materiais das coberturas finais de aterros sanitário no mundo nos últimos 20 anos, de 2000 a 2019. Por isso, executou-se por meio da combinação da RSL e RB, na base de dados Scopus, utilizando a ferramenta StArt.

A seguir, de forma itemizada estarão detalhados o procedimento metodológico e os resultados encontrados.

### 2.3.1. PROCEDIMENTOS DA RSL E RB

Para qualquer estudo, a etapa inicial se dá por meio de uma revisão da literatura, para assim se mapear e avaliar o campo intelectual das informações afins sobre sua própria investigação.

Esta pesquisa, assim como os trabalhos de Afonso *et al.* (2012), Knoff *et al.* (2014), Fahimnia *et al.* (2015), Medeiros *et al.* (2015), Li *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2019) empregaram o uso da RSL inicialmente num ciclo iterativo de definição de palavras-chave e strings, para assim estruturar a coleta de artigos, baseada em filtros e análise quanto a permanência do arcabouço bibliográfico. Por conseguinte, a abordagem da pesquisa teve caráter quantitativo no que concerne a revisão e análise bibliométrica dos artigos que compuseram o trabalho.

Comparações empíricas entre bases de dados que permitiram verificar que o Scopus oferece uma cobertura mais abrangente de fontes que os da Web of Science para campos de estudo fora da medicina e das ciências físicas (Det Udomsap; Hallinger, 2020; Hallinger; Chatpinyakoo, 2019; Mongeon; Paul-Hus, 2016).

Neste estudo, todos os artigos referentes às pesquisas sobre materiais constituintes da camada de cobertura final de aterros sanitários foram avaliados em termos dos números de publicações por ano e países, composições de camadas da cobertura final mais utilizada no mundo, materiais que compõem a cobertura final de aterro sanitário, com abordagem em balanço hídrico, emissão de gases e outras aplicações. Além de analisar se os artigos mencionavam ao longo do texto, premissas, projetos fazendo referências com normas técnicas, agências de proteção ambiental ou planos nacionais de resíduos sólidos e/ou saneamento básico.

Inicialmente, determinou-se o termo de busca, que são palavras relacionadas com o tema, que em conjunto conseguiram direcionar a pesquisa de maneira imparcial. Tais termos precisaram estar em inglês, devido a abrangência das buscas em bases que possuem em seu acervo revistas internacionais.

Posteriormente, uniram-se os termos de busca, utilizando operadores booleanos para formar uma *string* de busca, esse foi responsável por nortear a pesquisa e definir os níveis de restrição durante a coleta dos artigos nas bases de dados. O operador booleano “\*” é o que permite que o radical antecessor do símbolo assuma diferentes terminologias, proporcionando a minimização do viés e melhor rastreamento dos artigos pertinentes ao escopo da pesquisa.

Portanto, por meio de leituras prévias em artigos científicos e pesquisa exploratória inicial da literatura, com foco no problema, buscou-se identificar: quais materiais estão sendo utilizados em cobertura final de aterros sanitários no mundo. A *string* criada e utilizada na base de pesquisa de artigos foi *Landfill Cover\* and Type of Materials*, e como primeiro filtro, dentro do ambiente da base, foi que somente seriam aceitos artigos do tipo pesquisa, descartando, portanto, os aceitos como artigos de revisão e qualquer outro tipo de formato de documento científico.

Para suporte computacional da RB e RSL e para agilizar a organização dos artigos científicos, além de oferecer auxílio na emissão de relatórios de resultados, escolheu-se a ferramenta StArt versão 3.0, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos (LAPES - UFSCAR) e disponibilizado gratuitamente pelo site <[http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start\\_tool](http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool)>.

Além disso, o StArt é uma ferramenta que proporciona um ambiente unificado para o registro de todas as tomadas de decisão do pesquisador, desde o planejamento da pesquisa até a coleta dos dados, e ainda permite a identificação de



documentos em duplicatas, o que otimiza o processo de seleção dos documentos. Dentro do ambiente StArt, desenvolveu-se o trabalho em três etapas, sendo elas a 1ª etapa de planejamento, a 2ª etapa de execução e por último a 3ª etapa denominada de sumarização, que serão detalhadas a seguir.

#### *2.3.1.1. Etapa 1 RSL e RB: Planejamento – Protocolo*

No StArt, iniciou-se pela Etapa 1 de planejamento, que consistiu no preenchimento do protocolo que abrange características gerais da pesquisa, tais como: objetivo geral, palavras chaves, pergunta da pesquisa, estratégias de busca, seleção, critérios de inclusão e exclusão, formulário de extração de dados, critérios de qualidade e estratégia para ir sintetizando os dados extraídos. A ferramenta StArt permitiu que os pesquisadores preenchessem um protocolo cujo campos foram preenchidos semelhantes com os descritos em (Biolchini *et al.*, 2005; Fabbri *et al.*, 2016; Kitchenham; Charters, 2007).

Os artigos foram baixados da plataforma Scopus, após a execução dos filtros citados, e armazenados em um único arquivo em formato Bibtex. Esse formato é um dos formatos que o StArt aceita de forma a ter os macros dados de cada artigo científico de maneira organizada e completa.

#### *2.3.1.2. Etapa 2 RSL e RB: Execução – Seleção*

A Etapa 2 de execução contempla a atividade de seleção e extração. A etapa seleção consistiu em classificar o artigo como aceite, rejeitado ou duplicado por meio da leitura de título e resumo de cada artigo, baseado na análise de conteúdo proposto por Bardin (1977). Isso foi possível realizar dentro do ambiente do StArt com a importação dos artigos em formato de Bibtex, sendo esses oriundos da base escolhida e com os filtros executados na mesma.

Neste caso, na base de dados Scopus, os filtros executados foram três, sendo eles: a *string* utilizada intitulada *landfill Cover\* and type of materials*, e o período da pesquisa de 2000 a 2019 e apenas foram aceitos artigos científicos de pesquisa.

Nesta etapa, também foi possível definir uma ordem de prioridade de leitura para cada estudo, classificando-o como muito alto, alto, baixo ou muito baixo, baseada na leitura do título e resumo. Esse facilitador permitiu guiar o pesquisador na leitura dos textos completos na próxima etapa.

Sendo assim, cada um dos artigos foi classificado como artigos aceitos, rejeitados ou duplicados, através dos critérios de inclusão e exclusão, sendo que esses elaborados durante a fase anterior de planejamento, com o preenchimento do protocolo.

Os critérios de inclusão adotados nesta pesquisa foi o questionamento “se” o artigo: apresenta o tipo de material que compõem a camada de cobertura final do aterro sanitário; foi desenvolvido com dados primários e, está dentro da abordagem dessa pesquisa. Já os critérios de exclusão foram “se” o artigo: não apresenta o tipo de material que compõem a cobertura final do aterro sanitário; relata apenas dados secundários; trata-se de uma revisão; sem o artigo completo, e que tem abordagem fora do contexto estudado.

Foi definido que se o artigo apresentasse pelo menos um critério de inclusão e nenhum de exclusão, o mesmo era classificado como aceito. Agora, se artigo possuísse um ou mais critério de exclusão o mesmo seria rejeitado e não passava para etapa seguinte de extração.

Cabe comentar que, a própria ferramenta StArt já possui recursos como gráficos ilustrativos e informações do tipo número de artigos aceitos, rejeitados ou duplicados, após a fase de seleção.

#### *2.3.1.3. Etapa 3 RSL e RB: Execução – Extração*

A fase de extração consistiu na leitura completa dos artigos selecionados após a etapa de seleção, além de responder o formulário de extração que possui perguntas elaboradas durante a fase de planejamento no protocolo StArt, essas foram direcionadas para se ter resultados de extração úteis para composição dos indicadores bibliométricos.

O formulário de extração da ferramenta StArt permite três tipos de respostas as perguntas elaboradas, que são: respostas em forma de texto (*text*), respostas com alternativas binárias, ou seja, sim ou não (opção *pick on list*) e respostas que possuem alternativas pré-estabelecidas e que podem assinalar uma ou mais alternativa como resposta (opção *pick many list*).

Para este artigo, no formulário de extração foi utilizado apenas perguntas e resposta do tipo *pick on list* e *pick many list*, já opção de resposta em texto foi contemplada pelo campo comentário existente no plano denominado dados do

estudo. Esse procedimento foi necessário, pois no momento de exportação para o software Excel existe uma limitação de número de caracteres no formulário.

Além do formulário de extração, no campo livre de comentário, dentro da ferramenta StArt, também foram introduzidas perguntas substanciais para se obter observações relevantes para a pesquisa bibliométrica. Portanto, para todos os artigos aceitos as perguntas foram respondidas na forma de texto livre e os artigos foram salvos em formato de pdf em pasta arquivo. A Tabela 1 apresenta-se as perguntas presentes no formulário de extração.

Tabela 1. Formulário de extração do StArt da pesquisa.

<b>Tipo de perguntas e respostas</b>	<b>Texto da pergunta</b>	<b>Alternativas de Respostas</b>
Múltipla escolha (podendo ter mais de uma alternativa)	Quais as composições de camadas da cobertura final de aterro sanitário utilizadas na pesquisa?	i. Camada única ii. Multicamadas (Cobertura formada por mais de uma camada)
Múltipla escolha (podendo ter mais de uma alternativa)	Quais os materiais utilizados em camada de cobertura final em aterros sanitários?	i. Camada de argila compactada (CCL) ii. Camada de geossintéticos com argila (GCL) iii. Geossintético iv. <i>Biocovers</i> (biocoberturas) v. Bentonita vi. Outra
Múltipla escolha (podendo assinalar somente uma alternativa)	Qual a abordagem do artigo?	i. Emissão de Gás ii. Balanço Hídrico iv. Outra.
Múltipla escolha (podendo assinalar somente uma alternativa)	Existe relação dos prescritos nas legislações com o tipo de materiais utilizados na camada de cobertura final de aterro sanitário, presente no artigo em questão?	i. Não ii. Sim

Fonte: Autora (2023).

#### 2.3.1.4. Etapa 4 RSL e RB: Sumarização

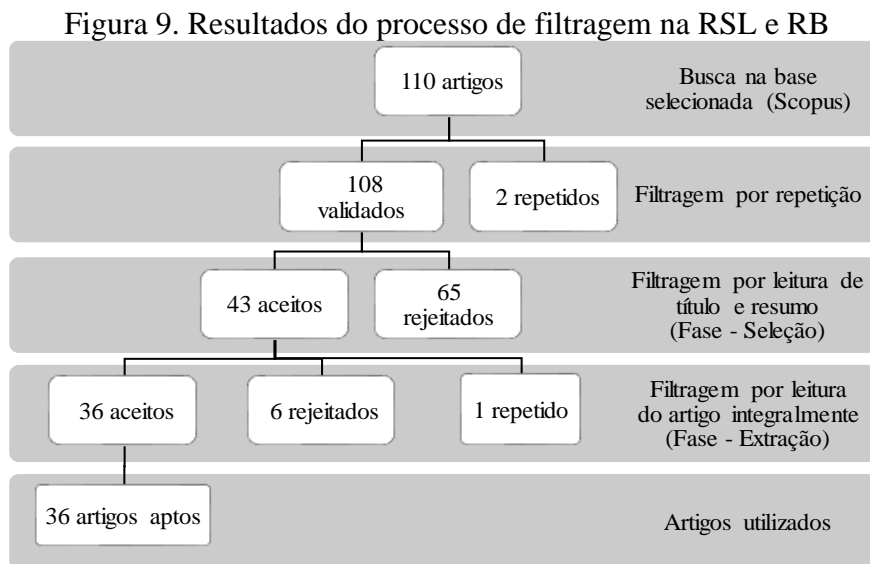
A Etapa 4 intitulada de sumarização foi uma atividade que possibilitou uma síntese dos dados provenientes das fases de seleção e extração dos artigos. Essa etapa possui recurso de visualização para a identificação dos filtros mais adequados, a fim de se obter os melhores produtos gráficos e assim, com maior clareza as informações pertinentes para cada pesquisa.

Neste artigo, optou-se que após as etapas realizadas no StArt, os dados fossem exportados para o Excel para a tabulação e geração dos gráficos pertinentes para discussão dos resultados.

#### 2.3.2. REPERCURSSÕES DA RSL E RB

Após as etapas de planejamento, execução e sumarização realizadas no StArt e com os dados compilados no interior da ferramenta foi possível desenvolver produtos gráficos de visualização.

A Figura 9 apresenta-se o panorama geral do quantitativo de artigos após o processo de filtragem na plataforma Scopus, utilizando a string *Landfill cover\* and Type of materials*.



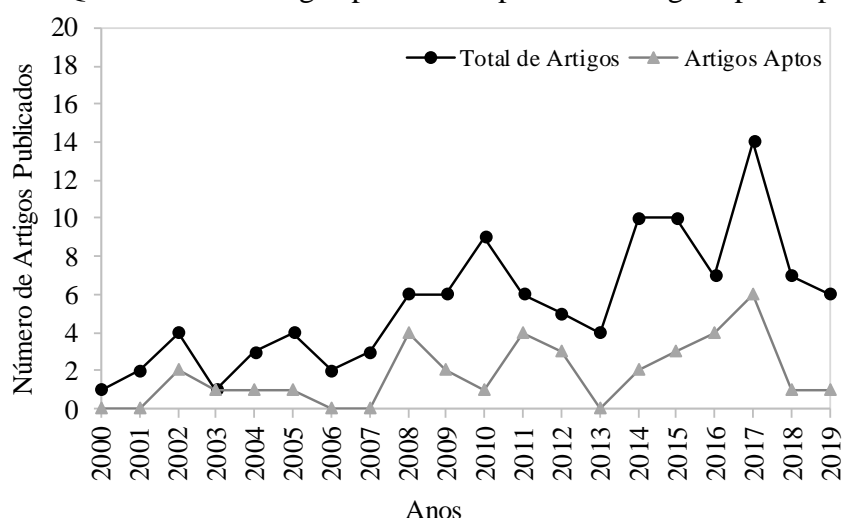
Fonte: Autora (2023).

Verificou-se um total de 110 artigos para o período da pesquisa contemplada na RSL e RB. Ao exportar todos os artigos para o StArt identificou-se automaticamente dois artigos repetidos, resultando assim em 108 artigos validados. Partindo para a primeira filtragem dentro do StArt, iniciou-se pela leitura do título

e o resumo de cada artigo e foram classificados 43 artigos com status de aceitos e 65 artigos foram classificados como rejeitados. Os artigos aceitos ou rejeitados foram classificados baseados nos critérios de inclusão e exclusão, definidos na etapa de planejamento e presente no protocolo.

Além disso, extraíram-se dados bibliométricos como a quantidade de publicação ao longo do período estudado e países que mais publicaram. A quantidade de artigos publicados entre o período pesquisado está apresentada na Figura 10, além da comparação entre os dados de total de artigos publicados com a *String* citada e a quantidade de artigos aptos, após leitura completa dos artigos completos (leitura integral dos artigos).

Figura 10. Quantidade de artigos publicados por ano e artigos aptos a pesquisa.



Fonte: Autora (2023).

É notável o aumento de publicações com abordagem sobre cobertura final de aterro sanitário a partir do ano 2013, com um pico de 14 artigos publicados em 2017. No mesmo ano, obteve-se a maior quantidade de artigos aceitos e aptos.

As seções seguintes apresentarão com mais detalhes os resultados e discussão no que concerne a fase de seleção, e posteriormente os resultados oriundos da fase de extração. Por último produtos gráficos provenientes da etapa de sumarização e oriundos do Excel.

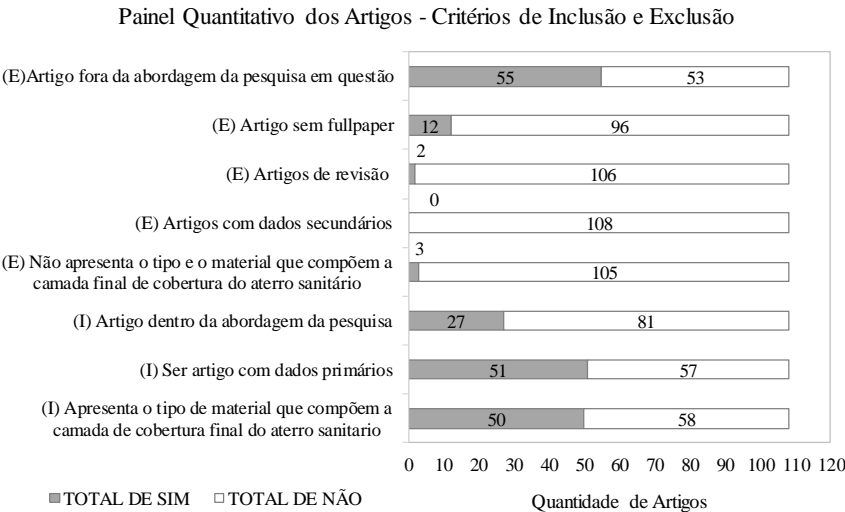
### 2.3.2.1.Repercussões da Fase de Seleção

Com um total de 108 artigos validados, destaca-se que 51% (55 artigos) foram rejeitados na fase de seleção por atender o critério de exclusão “artigo fora da

abordagem da pesquisa” (Figura 11), conforme o protocolo utilizado neste trabalho, o qual considera como critério para exclusão o artigo que durante a fase de seleção, leitura título e resumo, apresentasse pelo menos um dos critérios excludentes.

O critério que se refere a artigos fora da pesquisa é equivalente a artigos que não trataram sobre cobertura final de aterros sanitários e/ou que não fazem alusão aos materiais utilizados em coberturas.

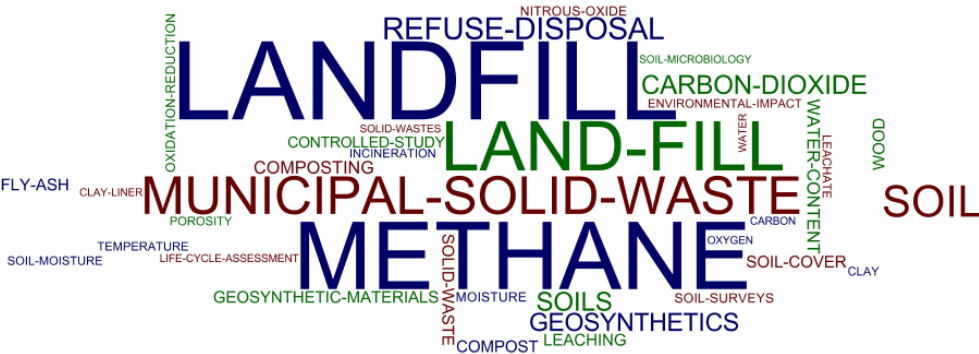
Figura 11. Painel quantitativo dos artigos - critérios de inclusão ou exclusão



Fonte: Autora (2023).

A ferramenta StArt permitiu a geração de produto de visualização das principais palavras chaves com o recurso intitulado *word cloude* (nuvem de palavras). Essa opção permitiu observar, de maneira direta, quais as palavras mais citadas nos artigos selecionados (Figura 12). Quanto maior o tamanho das fontes e mais centralizada forem as palavras, maior é o número de citações.

Figura 12. Nuvem de palavras mais citadas nos artigos aptos



Fonte: Autora (2023).

O resultado do StArt para o inventário das palavras chaves mais citadas nos artigos, aceitos na fase de seleção, foram aterro sanitário (somando as duas formas de escrita de landfill e land-fill) citada 69 vezes, metano com 48 citações, seguida da palavra oxidação com 24 citações (Tabela 2).

Tabela 2. Frequência das palavras chaves presentes nos artigos aceitos.

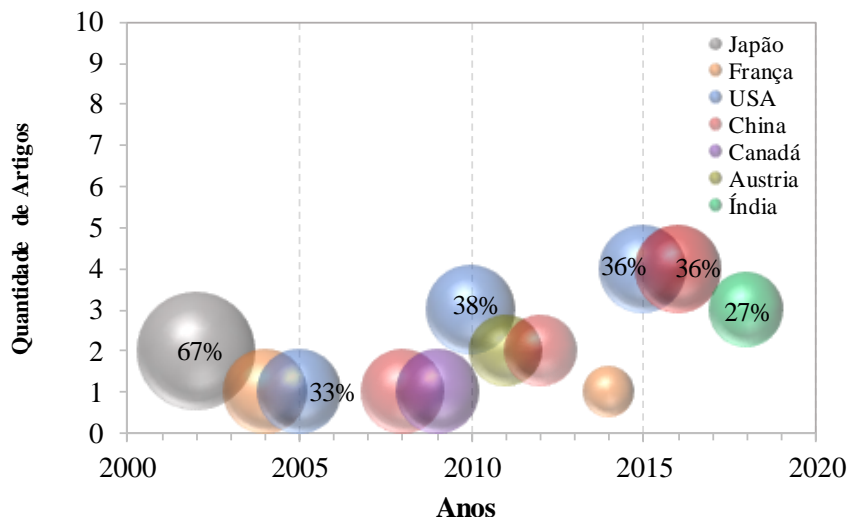
<b>Palavras Chaves (Keywords)</b>	<b>Frequência (Frequency)</b>
Metano ( <i>Methane</i> )	48
Aterro Sanitário ( <i>Landfill</i> )	36
Aterro Sanitário ( <i>Land-Fill</i> )	29
Oxidação ( <i>Oxidation</i> )	24
Solo ( <i>Soil</i> )	20
Disposição de Resíduos ( <i>Waste Disposal</i> )	14
Geossintéticos ( <i>Geosynthetics</i> )	14
Artigos ( <i>Article</i> )	14
Resíduos Sólidos Urbanos ( <i>Municipal Solid Waste</i> )	13
Dióxido de carbono ( <i>Carbon Dioxide</i> )	13
Condutividade hidráulica ( <i>Hydraulic Conductivity</i> )	11
Resíduo descartado ( <i>Refuse Difusal</i> )	10
Madeira ( <i>Wood</i> )	10
Teor de umidade ( <i>Water Content</i> )	9
Materiais Geossintéticos ( <i>Geosynthetic Materals</i> )	8
Instalação de disposição de resíduos sólido urbano ( <i>Municipal Disposal Facilities</i> )	8
Infiltração ( <i>Infiltration</i> )	8
Artigos Prioritários ( <i>Priority Journal</i> )	8
Solos ( <i>Soils</i> )	8
Instalação de disposição de resíduos sólidos urbanos ( <i>Waste Disposal Facility</i> )	8
Resíduo Sólido ( <i>Solid Waste</i> )	7
Lixiviado ( <i>Leachate</i> )	7
Gestão de Resíduos ( <i>Waste Management</i> )	7
Umidade do Solo ( <i>Soil Moisture</i> )	7
Estudo Controlado ( <i>Controlled Study</i> )	7
Composto ( <i>Compost</i> )	7
Umidade ( <i>Mousture</i> )	7
Comunidade Microbiana ( <i>Microbial Community</i> )	6
Cobertura de Aterro sanitário ( <i>Landfill Covers</i> )	6

Fonte: Autora (2023).

Em termos de quantidade de publicações, por países, 7 países apresentaram mais artigos publicados entre os anos pesquisados (Figura 13). Estados Unidos e China publicaram a maior quantidade de artigos, enquanto o Brasil e outros países da América do Sul não foram encontrados publicações na plataforma sobre o tema

abordado. As percentagens presentes nas bolhas coloridas são os percentuais de publicações de cada País, nos intervalos de 5 em 5 anos.

Figura 13. Tendências de publicação sobre cobertura final de aterros sanitários



Fonte: Autora (2023).

O tamanho de cada bolha em cada período indica a contribuição de cada país em cada intervalo de tempo. Os EUA foi o país com maior produtividade de artigos entre 2005 e 2015, seguido pela China e Índia.

A razão para a produtividade de artigos pode ser atribuída ao fato de que os países desenvolvidos começaram muito antes dos países em desenvolvimento, como no caso a Índia, a estabelecerem uma preocupação no âmbito dos aterros sanitários e pesquisas sobre gestão, disposição de resíduos com mais discussões, assim como preocupação com a reciclagem (Li *et al.*, 2018; Zhang, 2017).

Nota-se que o Japão teve maior destaque nas publicações no período de 2000 a 2005, com 67% das publicações. Entretanto, após o ano de 2005 não se encontrou mais produção sobre a temática abordada, o que pode estar relacionado a destinação dos RSU a incineradores e não mais em aterros sanitários, além da crescente taxa de reciclagem do país (Fy 2018, 2019).

#### 2.3.2.2.Repercussões da Fase de Extração

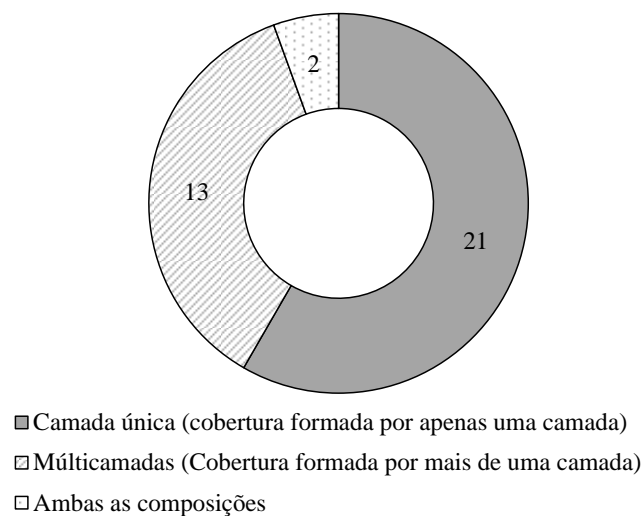
Na fase de extração, por meio das perguntas e respostas, presentes no formulário de extração, realizadas para cada artigo, foi possível conhecer mais sobre os tipos de composições das camadas de cobertura final de aterro sanitário (formada por única camada ou por mais de uma camada), os tipos de materiais



utilizados como CCL, GCL, geossintéticos (GYS), biocobertura (*biocover*), bentonita e ou outros materiais. Além disso, observou-se a abordagem do artigo quanto ao emprego da camada na emissão de gases e/ou balanço hídrico. Contemplaram-se os artigos apresentavam alguma relação entre a escolha do material de cobertura com a legislação existente em cada local da pesquisa.

O estudo evidenciou que a composição de cobertura final de aterro formada por uma única camada é a mais praticada, ou seja, em universo de 36 artigos aceitos em pelo menos 21 artigos utilizaram esse tipo de cobertura (Figura 14).

Figura 14. Composições de cobertura final de aterro sanitário mais empregado



Fonte: Autora (2023).

De acordo com a Figura 14, pode-se perceber que dois artigos abordaram ambos os tipos de composição. O artigo de Genelle *et al.* (2014) apresentou ensaios geofísicos para investigação de infiltração em coberturas do tipo CCL (formada por apenas um material) e comparou coberturas CCL com coberturas GCL (tipo de cobertura combinada com solo e geomembrana e por isso formada por mais de um tipo de material).

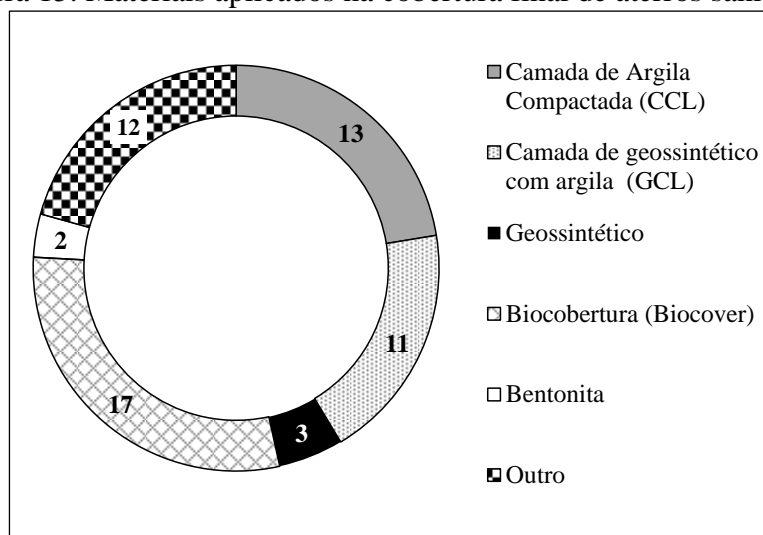
Zhang e Sun (2014) investigaram o armazenamento de água de chuva em coberturas em regiões úmidas, sendo as camadas de cobertura do tipo evapotranspirativa (composição com mais de um material) e uma cobertura com uma camada resistiva, sendo um cenário com CCL e outro cenário com mistura de solo fino e solo grosso. Além disso, ainda comparou com uma camada formada por GCL. A cobertura composta por GCL obteve os melhores resultados quanto ao armazenamento de água e minimização da infiltração para com os resíduos.

Salienta-se que em cobertura final de aterros formada por apenas uma camada, essa recebe toda a precipitação pluviométrica e minimiza os efeitos de infiltração de água de chuva para o interior do maciço de RSU.

As composições de cobertura final formada por camada única têm como principais exemplos de materiais aplicados o CCL, *biocover*, geossintéticos, bentonita e outras combinações de misturas de resíduos. As composições de cobertura final formadas por mais de uma camada, estão presentes os GCLs como principal tipo de material, alguns layouts utilizando CCL e também algumas de coberturas de aterro *biocover*.

Nesta pesquisa, um dos objetivos foi identificar nos artigos quais materiais compõem as camadas de cobertura de aterro sanitário. Observou-se que nos 36 artigos estudados, identificaram-se 58 tipos de materiais de cobertura (Figura 15).

Figura 15. Materiais aplicados na cobertura final de aterros sanitários



Fonte: Autora (2023).

O material mais empregado foi a *biocover* com 17 aplicações em artigos. Essa quantidade é justificável haja vista que 13 artigos tiveram como principal foco o estudo da minimização da emissão de gás metano para atmosfera. Apenas 4 artigos fizeram alusão a escolha do material vinculada a premissas de legislação (Bogner *et al.*, 2011; Pariatamby *et al.*, 2015; Sadasivam; Reddy, 2015; Wang *et al.*, 2017).

A composição do *biocover* é variada podendo ser aplicados resíduos provenientes de madeira, serragem ou palha (Pariatamby *et al.*, 2015; Rannaud *et al.*, 2009; Sadasivam; Reddy 2015; Tintner; Klug, 2011; Wang *et al.*, 2017; Yargicoglu; Reddy, 2017) ou misturas de resíduos oriundo de biorreatores

estabilizados com solos (Bogner *et al.*, 2011; He *et al.*, 2008; He *et al.*, 2012; Wickramarachchi *et al.* 2011), materiais derivados de vermicompostagem (Obulisamy *et al.*, 2016), misturas com esterco (Wei *et al.*, 2016) e emprego de folhas verdes (Tanthachonn *et al.*, 2008). O emprego desses materiais se justifica por apresentar uma significativa quantidade de matéria orgânica, que acabam promovendo a absorção do gás metano ao longo do tempo.

Kortnik *et al.* (2008) pesquisaram uma camada de cobertura final composta por resíduos, lodo de papel, como barreira de baixa permeabilidade em aterros sanitários. O estudo foi baseado em experimentos de laboratório e de campo e a escolha do material para a cobertura teve como objetivo minimizar a infiltração de águas pluviais e combater a erosão. Devido aos materiais utilizados não apresentarem resultados esperados, os autores adicionaram as misturas cinzas volantes, bentonita e cimento. Com isso, houve uma melhora nas propriedades de resistência à camada com lodo após essa incorporação, porém ocorreu um pequeno incremento no coeficiente de permeabilidade.

A utilização de *biocovers* apresenta-se com boas perspectivas como absorvedor da emissão de metano, quando comparado a outros materiais convencionais como solo compactado. É importante destacar a tendência na reutilização de materiais, que geralmente iriam parar dentro das células de aterro sanitário e que agora estão sendo utilizados como materiais alternativos em aplicações de engenharia, dentre elas em cobertura final de aterro sanitário.

O segundo tipo de material mais empregado em cobertura final foi o CCL devido a sua aplicabilidade, tendo como principal característica um solo argiloso compactado, de baixa permeabilidade, e que funciona como uma barreira resistiva, minimizando a infiltração de água de chuva para o interior da massa de resíduos.

Os 13 artigos apresentaram o uso de CCL como composição única da cobertura final de aterro, ou seja, a camada de argila compactada como única proteção entre os RSU e o meio ambiente.

Os trabalhos de Nolasco *et al.* (2008), Bogner *et al.* (2011), Wickramarachchi *et al.* (2011), Obulisamy *et al.* (2016), Wei *et al.* (2016) estudaram o uso de CCL para a mitigação da emissão do gás metano, que são fontes críticas de poluição quando se trata de aterros sanitários. Os autores apontam que a compactação do solo da cobertura final altera os processos emissão, destino e transporte de substâncias tóxicas, além de outros parâmetros como umidade do solo de cobertura,

porosidade, permeabilidade e retenção água e difusão do gás, sendo importante uma investigação mais profunda *in loco*.

Ainda em cobertura formada com o uso de CCL, outra metade dos artigos abordaram a investigação do uso de solo compactado para minimizar a infiltração de água de chuva, com destaque a pesquisas relacionadas com o balanço hídrico. Os trabalhos como Mijares *et al.* (2012), , Udoh (2012), Genelle *et al.* (2014), Zhang e Sun (2014), Zhan *et al.* (2016) investigaram por meio de simulação, soluções analíticas, ensaios geofísicos e ensaios geotécnicos de laboratório o comportamento do solo compactado de cobertura mediante a ações hidrológicas com ênfase em padrões de chuvas definidas.

Os outros três artigos abordaram o uso de CCL e mais camadas drenantes de chuva e gás na composição de coberturas finais de aterros (Keelson, 2015; Shaikh *et al.*, 2019; Sobti e Sing, 2017), tendo como referência o estudo de balanço hídrico.

Tanto Zhang e Sun (2014) quanto Zhan *et al.* (2016) verificaram que na maioria das pesquisas que houve uma escolha de coberturas monolíticas em regiões áridas e semi-áridas, por apresentarem melhores resultados. No entanto, Zhang e Sun (2014) investigaram a influência da espessura da cobertura final, o tipo de solo, nível de vegetação e distribuição da precipitação no desempenho das coberturas do tipo monolíticas e barreira capilar em áreas úmidas. Como conclusão do trabalho, verificou-se que a cobertura final do tipo barreira capilar (formada por camadas de vegetação, camada de solo argiloso e abaixo com solo arenoso) são mais eficientes que as coberturas monolíticas, formadas por uma camada vegetal sobreposta a um solo fino em regiões úmidas.

Como destaque de um total de 12 trabalhos, os autores investigaram materiais diversos em camadas de cobertura (outros), têm-se os trabalhos que pesquisaram misturas de solos com várias granulometrias, variando as proporções de argilas com areia, e até solo glacial com bentonita e solo argiloso com compostos orgânico (He *et al.*, 2008; Kamon *et al.*, 2003; Keelson, 2015; Mijares *et al.*, 2012; Soh; Hettiaratchi, 2009; Tanthachoon *et al.*, 2008; Udoh, 2012; Wei *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2017; Yargicoglu; Reddy, 2017 Zhang; Sun, 2014).

O uso GCL esteve presente como material de uso em coberturas de aterro sanitário em 11 artigos, sendo 7 trabalhos com foco no emprego do balanço hídrico para o estudo (Genelle *et al.*, 2014; Keelson, 2015; Shan *et al.*, 2002; Koerner; Soong, 2005; Sobti; Singh, 2017; Yesiller *et al.*, 2019; Zhang; Sun, 2014).

Os outros quatro artigos referiram-se a avaliação das propriedades físicas e hidráulicas do GCL com aplicação em cobertura final de aterro sanitário, por meio de ensaios de laboratório e também simulação numérica (Banar *et al.*, 2016; Gourc; Ramírez, 2004; Scalia; Benson, 2010b; Gapak *et al.*, 2017).

Poucos artigos como de Shaikh *et al.*, (2019) e Sobti e Singh (2017) abordaram o estudo de cobertura final de aterro sanitário com a utilização de bentonita, e esses trabalhos apresentaram uma comparação em relação ao balanço hídrico quando se usa a bentonita e o emprego de CCL.

Apenas os trabalhos de Gourc e Ramírez (2004) , Koerner *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2017) abordaram a aplicação de geossintético em cobertura final de aterros sanitários. Entretanto, os três trabalhos tiveram abordagens diferentes, o primeiro estudo teve como objetivo avaliar o desgaste da geomembrana de modo a determinar a vida útil. O segundo trabalho investigou a mitigação da emissão de metano com a utilização de geomembrana em comparação a outros dois materiais naturais geotécnicos, e o último trabalho objetivou avaliar o parâmetro de resistência ao cisalhamento com a inclinação da geomembrana que compõem o sistema de cobertura de aterro.

Quatorze artigos versaram sobre avaliar materiais que atendessem critérios hidráulicos do ponto de vista do balanço hídrico, ou seja, as camadas de cobertura final funcionam como elementos componentes elementares nas equações clássicas do balanço hídrico. Para essa abordagem, os materiais mais empregados foram 8 estudos que avaliaram CCL como cobertura final de aterro e 7 artigos que investigaram o GCL como camada final de aterro sanitário. Apenas 5 artigos vincularam o uso de materiais de cobertura com legislações ambientais locais (Genelle *et al.*, 2014; Keelson, 2015; Kortnik *et al.*, 2008; Udoh, 2012; Zhang; Sun, 2014). Oito artigos tiveram outras abordagens, sem ser emissão de gás metano e balanço hídrico, como avaliação geotécnica, hidráulica e mecânica do material de cobertura e não mencionaram legislações ambientais.

De modo a se ter uma visão geral dos 36 artigos, aceitos e abordados nesta pesquisa, o Quadro 1 apresenta informações quanto a autores, ano de publicação, País, composição, material(is) de cobertura(s), especificação e detalhes do material, abordagem, se cita ou não relação com legislação ambiental de cada país e descrição e assunto sucinto do artigo.

Quadro 1. Resumo técnico dos artigos aceitos sobre cobertura final de aterro sanitário

Autor (es)	País	Sistema de Cobertura	Material(ais)	Detalhes do Material	Abordagem	Cita Legislação	Assunto Abordado no Artigo
Yesiller <i>et al.</i> (2019)	USA	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila	Balanço Hídrico	Não	Estudo da Sucção em GCLs expostos em aterro e GCLs nunca antes utilizado. E comportamento da migração de água.
Shaikh <i>et al.</i> (2018)	Índia	Multicamadas	CCL	Revestimento de argila compactada	Balanço Hídrico	Não	Verifica a histerese de um equipamento chamado de perfil de sonda utilizado para determinar teor de água proveniente de chuva, em materiais de cobertura de aterro como solo e Bentonita.
			Bentonita	Bentonita Natural com baixa permeabilidade			
Sobti e Singh (2017)	Índia	Multicamadas	CCL	Revestimento de argila compactada	Balanço Hídrico	Não	Comparar propriedades mecânicas e hidráulicas utilizando três materiais diferentes e misturas compostas por eles, para aplicação em cobertura e base de aterro sanitário.
			GCL	Revestimento de geossintéticos com argila			
			Bentonita	Bentonita Natural com baixa permeabilidade			
Yargicoglu e Reddy (2017)	USA	Multicamadas	<i>Biocover</i>	Biochar, Biochar + solo, aglomerado de madeira não queimado com solo	Emissão de Gás	Não	Avaliação da remoção de metano com uso de coberturas de aterros com materiais compactados.
			Outro	Solo obtido de camada intermediária de aterro sanitário			
Koerner <i>et al.</i> (2017)	USA	Única camada	Geossintético	Geomembranas; geotêxtis	Outra	Sim	Avaliação da degradação de 5 geomembranas e 7 geotêxtil a exposição em coberturas de aterro.
Wang <i>et al.</i> (2017)	China	Única camada	Geossintético	Geomembranas de alta densidade	Emissão de Gás	Sim	Avaliar a comparação de coberturas de aterros com três materiais diferentes para retenção CH <sub>4</sub>
			<i>Biocover</i>	Mistura com palha, cascas e resíduos pulverizado			
			Outro	Sem cobertura, resíduos da célula a mostra			
Yang <i>et al.</i> (2017)	China	Única camada	Outro	Lodo de Esgoto	Outra	Não	Avaliação geotécnica do uso do lodo de esgoto como cobertura de aterro.
Gapak <i>et al.</i> (2017)	Índia	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintético com solo vermelho (RS) disponível localmente, RS com teor de finos modificado e mistura de RS e cinzas volantes (FA)	Outra	Não	Avaliar as propriedades hidráulicas de um GCL composto por solo modificado com incorporação de cinzas volantes e mais finos combinados com 4 tipos de geossintéticos.
Obulisamy <i>et al.</i> (2016)	Cingapura	Única camada	CCL	Revestimento de argila compactada	Emissão de Gás	Não	Avaliação de materiais compactados para mitigação de metano.
			<i>Biocover</i>	Composto de leira de resíduos; Vermicompostagem.			
Zhan, Qiu, Xu (2016)	China	Única camada	CCL	Revestimento de argila compactada	Balanço Hídrico	Não	Simulação e modelagem de camada de CCL em padrões diferentes de chuva.
Wei <i>et al.</i> (2016)	China	Única camada	Outro	Areia Fina; Mistura areia com composto de esterco; Mistura de Argila com composto de esterco; resíduos de arroz e esterco	Emissão de Gás	Não	Avaliação da oxidação do gás metano em 7 tipos de coberturas de aterro sanitário.
			CCL	Revestimento de argila compactada			
			<i>Biocover</i>	Composto de esterco; Resíduo de Arroz.			

Banar <i>et al.</i> (2016)	Turquia	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila	Outra	Não	Estudo de uma proposta ambiental do emprego de GCL utilizando bentonita + argila e com resíduos de boro como geossintético com a matéria prima de resto de pneu. Avaliação mecânica e hidráulica do novo material.
Sadasivam e Reddy (2015)	USA	Única camada	<i>Biocover</i>	Sete diferentes proporções de um material orgânico rico derivado da madeira, adubo ou biomassa vegetal.	Emissão de Gás	Sim	Avaliação da adsorção do metano em 7 diferentes materiais de biocoberturas.
Pariatamby <i>et al.</i> (2015)	Malásia	Única camada	<i>Biocover</i>	Misturas de resíduos orgânico com solo preto e resíduos de frutas; Mistura de Resíduos orgânicos com serragem; Mistura de Resíduos orgânicos e Lodo.	Emissão de Gás	Sim	Mitigação do gás metano com cobertura rica em microorganismo que formam composições de biocoberturas de aterros sanitários.
Keelson (2015)	Gana	Multicamadas	CCL	Revestimento de argila compactada	Balanço Hídrico	Sim	Estuda por meio de simulação numérica no Help diferentes configurações de cobertura de aterro, para avaliação de parâmetros hidráulicos para estimação do balanço hídrico para cada material.
			GCL	Revestimento de geossintéticos com argila			
			Outro	Camada Evapotranspirativa com granulometrias diversas			
Genelle <i>et al.</i> (2014)	França	Única camada	CCL	Revestimento de argila compactada	Balanço Hídrico	Sim	Trata de estudo com ensaios geofísico para investigação de coberturas de aterro quando a infiltração de água de chuva, e minimizar a quantidade de lixiviados.
		Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila			
Zhang e Sun (2014)	China e USA	Única camada	CCL	Três tipos de cobertura com solos finos diferentes compactada	Balanço Hídrico	Sim	Análise de armazenamentos de água em coberturas de aterros sanitários (resistiva e evapotranspirativa) em regiões úmidas.
			Outro	Mistura de solo grosso e solo fino			
		Multicamadas	Outro	Dois tipos de coberturas evapotranspirativas			
He <i>et al.</i> (2012)	China	Única camada	<i>Biocover</i>	Mistura de Solo coletado da célula de aterro com resíduos; Resíduos provenientes de um biorreator de resíduos orgânicos	Emissão de Gás	No	Estudo da mitigação de emissão de metano com utilização de biocoberturas.
Udoh (2012)	Nigéria	Única camada	CCL	Solo glacial compactado, Argila local compactada	Balanço Hídrico	Sim	Avaliação e simulação para análise de diferentes configurações de cobertura para minimizar a infiltração para o interior da célula com resíduos sólidos.
			Outro	Misturas de solo glacial com bentonita			
			<i>Biocover</i>	Resíduos Finos; resíduos finos com bentonita			
Mijares <i>et al.</i> (2012)	USA	Única camada	Outro	<i>Topsoil</i>	Balanço Hídrico	No	Estudo de hidráulico e hidrológico de duas coberturas de aterro reais com utilização de lisímetros.
			CCL	Revestimento de argila compactada			
Wickramarachch <i>et al.</i> (2011)	Japão	Única camada	CCL	Revestimento de argila compactada. Solo argiloso proveniente de camada intermediária de um aterro.	Emissão de Gás	Não	Avaliação de fluxo de metano em cobertura composta por solos diferentes.
			<i>Biocover</i>	O solo residual foi coletado de um reator de aterro simulado de 3 anos de idade			
Tintner e Klug (2011)	Áustria	Única camada	<i>Biocover</i>	Composto de madeira; compostos de resíduos tratados mecanicamente; Substratos argiloso e orgânicos; escoria da incineração dos RSU com lodos	Emissão de Gás	Não	Uso da bioindicação para avaliar as condições do habitat cobertura de aterro e a vegetação.

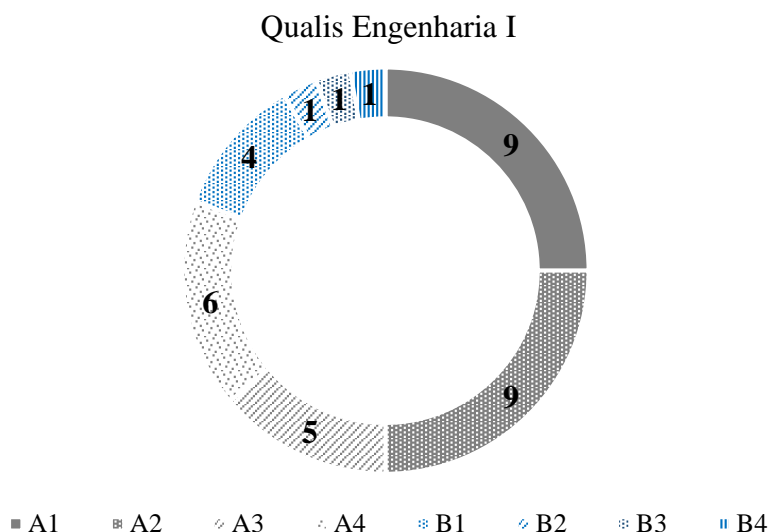
Bogner <i>et al.</i> (2011)	USA	Única camada	<i>Biocover</i>	Materiais de cobertura alterados por biossólidos	Emissão de Gás	Sim	Comparação de emissão de metano em diversos aterros sanitários, em diferentes regimes de hidrológicos e climáticos
			CCL	Revestimento de argila compactada			
Angermeier <i>et al.</i> (2011)	Áustria	Única camada	<i>Biocover</i>	Resíduo tratado mecanicamente e biologicamente e posterior coberturas com plantações diferentes.	Outra	Não	Avaliação da umidificação e mineralização do solo de cobertura dependendo da plantação.
Scalia e Benson (2011)	USA	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila	Outra	Não	Avaliação de condutividade hidráulica em GCLs aplicados a 4,6 7 e 8 anos em coberturas de aterro
So e Hettiaratchi (2009)	Canadá	Única camada	Outro	Mais de dez misturas com proporções diferentes do material argila, silte e argila e resíduos para camadas diárias e intermediária e final. Experimental.	Balanco Hídrico	Não	Avaliação de migração de líquidos para interior de células com uso de camadas finais, intermediárias e diárias.
Rannaud <i>et al.</i> (2009)	Canadá	Multicamadas	<i>Biocover</i>	Camada de solo grosso para a drenagem de gás, solo de média grosso e Areia com composto orgânico	Emissão de Gás	Não	Simulação numérica de biocobertura para oxidação de gás metano.
He <i>et al.</i> (2008)	China	Única camada	<i>Biocover</i>	Solo residual com resíduo estabilizado em Reator	Emissão de Gás	Não	Avaliação da oxidação do gás metano em dois tipos de cobertura <i>Biocover</i> e solo de outra cobertura por meio de bioindicadores.
			Outro	Solo argiloso retirado da cobertura do aterro na célula existente a 6 anos			
Kortnik <i>et al.</i> (2008)	Eslovênia	Multicamadas	<i>Biocover</i>	Mistura de solo com lodo da produção de papel	Balanco Hídrico	Sim	Experimental laboratório e campos para avaliação de biocobetrura a base de lodo da indústria de papel como cobertura de aterro.
Tanthachoon <i>et al.</i> (2008)	Tailândia	Única camada	<i>Biocover</i>	1-Composto de folhas	Emissão de Gás	Não	Estudo da mitigação de metano com cobertura de aterro do tipo <i>biocover</i> e com mistura de solos com granulometrias diferentes.
			Outro	Mistura de 80% areia, 12% argila e 8% silte			
Nolasco <i>et al.</i> (2008)	Espanha	Única camada	CCL	Revestimento de argila compactada	Emissão de Gás	Não	Avaliação da emissão de gás em várias posições geográficas do aterro
Koerner e Soong (2005).	USA	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila	Balanco Hídrico	Sim	Análise de cenários da estabilidade do uso de solos sobre tipos de geossintéticos, desde só revestido como geomembrana e geotêxtil
Gourc e Reyes (2004)	França	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila	Outra	Não	Avaliação de materiais com geossintético e GCL a fim de determinar parâmetros de resistência a cisalhamento, variando cenários e inclinações.
			Geossintético	Geomembrana; Geomembrana com geotêxtil			
Kamon <i>et al.</i> (2003)	Japão	Única camada	Outro	Lodo de papel compactado; Lama de construção	Balanco Hídrico	Não	Simulação do balanço hídrico no UH-SAT para os dois materiais de cobertura de aterro.
Shan e Lai (2002)	Taiwan	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila	Balanco Hídrico	Não	Avaliação de GCL previamente hidratada de forma a retardar as infiltrações
Kamon <i>et al.</i> (2002)	Japão	Única camada	<i>Biocover</i>	Lodo de papel compactado; Lama de construção	Outra	Não	Avaliação da condutividade hidráulica para os dois materiais de biocoberturas.

Fonte: Autora (2023).



Com o propósito de evidenciar a qualidade dos artigos, que fizeram parte desta pesquisa, segundo a avaliação da qualis na plataforma Sucupira, verificou-se que 80,55% dos 36 artigos aceitos estão classificados com qualis A1, A2, A3 ou A4, 19,44% apresentaram qualis B1, B2, B3 e B4 (Figura 16).

Figura 16. Qualis dos artigos aceitos.



Fonte: Autora (2023).

### 2.3.3. CONSTATAÇÕES DA RSL E RB

De acordo com a pesquisa realizada, uma grande maioria das camadas de cobertura de aterro no mundo é composta por uma única camada, sendo o CCL o material mais empregado e as *biocovers*. Dentre essas coberturas finais, destaca-se a tendência à utilização de *biocovers*, geralmente associadas a um melhor desempenho na absorção do gás metano, oriundos da decomposição dos resíduos.

Quando se trata de emprego de CCL, esse tipo de cobertura aparece de maneira bem versátil. Metade dos artigos apresentam pesquisas sobre este uso como forma de mitigar a emissão de gás metano para o meio ambiente e a outra parte como emprego de barreira resistiva, servindo como um elemento importante na composição do balanço hídrico.

Assim como ocorre em coberturas com CCL a utilização de GCL, para compor cobertura com mais de uma camada, a maior abordagem foi para pesquisas envolvendo balanço hídrico, e a determinação dos parâmetros físicos e mecânicos e hidráulicos desses materiais.

Do total de 36 artigos, apenas 11 artigos fizeram alusão a escolha de materiais de cobertura de aterro com alguma legislação ambiental, em destaque o USA, com 5 artigos que mencionaram a legislação como documento prioritário no que concerne projeto de cobertura de aterro sanitário.

Com a *string* de busca utilizado na base Scopus não foram encontrados artigos científicos sobre cobertura de aterro sanitário, tendo como área de estudo o Brasil, tão quanto autores brasileiros. Por isso, se fez necessário a busca de outra base de dados para investigação de trabalhos desenvolvidos no Brasil.

## **2.4. COBERTURA FINAL DE ATERRO SANITÁRIO NO BRASIL**

O levantamento da revisão bibliográfica, RSL e RB, sobre cobertura final de aterro sanitário no Brasil e América Latina, foi semelhante ao desenvolvido e detalhado no item 2.2., só que na base de dados Scielo. Nessa base de dados constam acessos a 1.149 periódicos, e mais de 500 milhões de artigos publicados no Brasil e América Latina.

Na primeira tentativa de acesso aos artigos utilizou-se a string *cover landfill\* and type of materials*, entretanto, não houve resultados. Com isso, escolheu-se entrar na base de dados com a palavra-chave *cover landfill*, e como resultados foram obtidos 17 artigos científicos. Ao realizar a etapa de leitura de título e resumo dos 16 artigos, 8 artigos brasileiros foram aceitos e 8 artigos foram rejeitados, sendo 5 brasileiros e 3 artigos da América Latina. Cabe comentar que, esses procedimentos foram também realizados com auxílio da ferramenta StArt.

Sendo assim, para os 8 artigos aceitos, executou-se a leitura completa do trabalho, de forma a extrair informações como a composição do sistema de cobertura, autores, local de publicação, tipo de material de cobertura, a abordagem do artigo (balanço hídrico ou emissão de gás), se há alusão a legislação quanto a escolha do sistema de cobertura final do aterro sanitário.

De forma a contrastar e verificar a tendência, na América Latina, do tipo de sistema de cobertura de aterro sanitário e materiais mais utilizados (item 2.2.), apresenta-se o Quadro 2 com informações relevantes dos 8 artigos aceitos.

Verificou-se uma tendência do uso de uma única camada tipo CCL. Com exceção de Pitanga *et al.* (2016), que investigaram o GCL e tiveram como objetivo determinar experimentalmente a permeabilidade ao gás metano de maneira rápida e confiável, com o equipamento permeâmetro de fluxo transiente modificado.

Diferentemente do restante dos países, no Brasil tem-se investigado a potencialidade de cobertura de CCL para a redução da emissão de gás metano, proveniente da degradação dos resíduos (Costa *et al.*, 2018; Mariano; Jucá, 2010; Moreira *et al.*, 2020; Rose *et al.*, 2012; Teixeira *et al.*, 2009).

Destacam-se os trabalhos Rose *et al.* (2012) e Costa *et al.* (2018) que além da pesquisa com CCL, investigaram o uso de dois tipos de *biocover*, a base de misturas em proporções diferentes de composto de RSU com solo, como cobertura final de aterro, convergindo com a tendência apontada no item 2.2., do uso de *biocovers* para a redução da emissão de gás metano. Rose *et al.* (2012) concluíram que as *biocovers* tiveram uma taxa de oxidação de gás metano de 97,57%, ou seja, bem maior quando comparada a cobertura final de CCL (que foi de 20%) e com a mistura 3:1 (solo: composto).

Dos outros artigos aceitos, apenas 3 deles tiveram abordagem de cobertura final de aterro sanitário com balanço hídrico, tendo como material de cobertura uma única camada de CCL e multicamadas de solo compactado com mistura de solo e composto de RSU como o trabalho de Costa *et al.* (2018).

Dois artigos abordaram sobre cobertura final de aterro sanitário utilizando materiais classificados como “outros”, para diferir de materiais mais tradicionais. Destacam-se os trabalhos de Souza *et al.* (2019) que pesquisaram quatro materiais diferentes como cobertura, sendo eles formados por materiais isolados de solo e cinza de carvão e misturas em proporções diferenciadas com os dois materiais; e o estudo de Izzo *et al.* (2013) que avaliaram o comportamento de uma cobertura final evapotranspirativa barreira capilar na região sudeste do Brasil.

Quadro 2. Resumo técnico dos artigos aceitos sobre cobertura de aterro sanitário no Brasil

Autor (es)	País/ Estado	Sistema de Cobertura	Material(ais)	Detalhes do Material	Abordagem	Cita Legislação	Assunto Abordado no Artigo
Moreira <i>et al.</i> (2020)	Brasil/ Paraíba	Única camada	CCL	Solo compactado da cobertura de aterro sanitário já executada	Emissão de Gás	Sim	Investigar locais com maiores fluxos de metano no aterro sanitário e avaliação da espessura de cobertura a fim de diminuí-la sem prejuízos a retenção do gás metano.
Souza <i>et al.</i> (2019)	Brasil/ Ceará	Multicamadas	Outro	3 misturas com as proporções: 30cm de solo natural e 30 cm de mistura (70% de solo e 30% de cinza de carvão mineral). 30cm de solo natural e 30 cm de mistura com 50% de solo e 50% de cinza de carvão mineral. 30cm de solo natural e 30 cm de mistura com 30% de solo e 70% de cinza de carvão mineral.	Balanço Hídrico	Não	Avaliação de desempenho por meio do ensaio de infiltração em laboratório para investigar o quanto de geração de percolado é elevado dependendo do tipo e material de cobertura de aterro sanitário.
			Outro	30cm de solo natural e 30 cm de mistura de material impermeabilizante com de cinza (Cinza Composta)			
		Única camada	CCL	30 cm de solo compactado da cobertura do aterro sanitário			
			Outro	Cinza Composta			
Costa <i>et al.</i> (2018)	Brasil/ Pernambuco	Multicamadas	<i>Biocover</i>	Camada oxidativa: uma camada de 0,30 m de solo compactado com GC=80%, sobreposta por uma camada de 0,30 m de solo misturado com material compostado na proporção de 1:1 em volume, compactado com GC=75%.	Balanço Hídrico e Emissão de Gás	Não	Trabalho experimental, por meio do ensaio de coluna avaliou o desempenho de duas camadas de cobertura de aterro sanitário, no que se refere a infiltração de água para o interior da célula e emissão de gás metano.
		Única camada	CCL	Solo compactado com grau de compactação (GC)=80%, com espessura de 0,60 m.			
Pitanga <i>et al.</i> (2016)	Brasil/ São Paulo	Multicamadas	GCL	Revestimento de geossintéticos com argila	Emissão de Gás	Não	Estimar de forma rápida e confiável o gás permeabilidade da GCL (com bentonita) usadas em sistemas de cobertura de aterros
Izzo <i>et al.</i> (2013)	Brasil/ Rio de Janeiro	Multicamadas	Outro	Cobertura Evapotranspirativa do tipo barreira capilar, composto por duas camadas com granulometrias diferentes. Sendo eles, solo e RSU tratado mecanicamente.	Balanço Hídrico	Não	Estudo da utilização cobertura barreira capilar construída com resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente
Rose <i>et al.</i> (2012)	Brasil/ Rio de Janeiro	Única camada	CCL	Solo compactado (argissolo, da mesma jazida do material de uma cobertura de aterro sanitário já executada.	Emissão de Gás	Não	Estudar uma alternativa econômica de minimizar a emissão desses gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. Com uso de solo, composto de RSU e misturas de solo com composto.
			<i>Biocover</i>	Camada oxidativa com um composto de RSU (MO 55%;40% recicláveis papel, plástico, vidro e metal)			
			<i>Biocover</i>	Duas misturas com proporções diferentes de solo com composto de RSU (1Solo:1Composto; 3Solo:1Composto)			
Mariano e Jucá (2010)	Brasil/ Pernambuco	Única camada	CCL	Solo argiloso compactado e já executado em campo, como cobertura final de aterro sanitário.	Emissão de Gás	Não	Emissões de biogás através das camadas de cobertura de aterros de RSU, por meio de ensaios simples, diretos e de baixo custo.
Teixeira <i>et al.</i> (2009)	Brasil/SP e Rio Grande do Sul	Única camada	CCL	Solo compactado proveniente de coberturas de três aterros sanitários (5 a 15 cm de profundidade)	Emissão de Gás	Não	Avaliar a oxidação biológica do metano em três coberturas aterros brasileiros.

Fonte: Autora (2023).

Os artigos com abordagem sobre balanço hídrico foram experimentais, tendo como um dos principais ensaios o de coluna, além de ensaios de caracterização geotécnica dos materiais. Destarte, o estudo de Izzo *et al.* (2013) que desenvolveu um modelo em escala de laboratório para estudar as variáveis envolvidas no processo de funcionamento de uma barreira capilar construída com RSU pré-tratado mecânica e biologicamente.

## 2.5. FLUXO DE ÁGUA SOLO E INFILTRAÇÃO

A primeira experiência que quantificou o fluxo num meio poroso saturado foi publicada por Darcy (1856). Essa lei permitiu expressar o fluxo de água através de um meio poroso, por unidade de comprimento, em função da condutividade hidráulica do material e do gradiente hidráulico (Wendland; Pizarro, 2010). Entende-se que na natureza, o solo pode ficar provisoriamente saturado próximo a superfície, quando a taxa de precipitação pluviométrica supera a taxa de infiltração.

Darcy (1856) publicou uma equação simples para determinação da velocidade de percolação de água no meio poroso, que pode ser expressa pela Equação (1):

$$v = k \cdot i \quad (1)$$

$v$ =velocidade de percolação, a quantidade de água fluindo por unidade de tempo por uma área unitária de seção transversal de solo normal ao fluxo (m/s);

$k$ = Condutividade hidráulica do material (m/s);

$i$ = Gradiente hidráulico (adimensional).

Essa equação baseou-se principalmente nas observações de Darcy sobre quantificação de fluxo através do filtro de areia e que revelou à Equação (2), consagrada como a Lei de Darcy (Sousa Pinto, 2016):

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (2)$$

$Q$ = Vazão (m<sup>3</sup>/s)

$k$ = Condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (m/s)

$\Delta h$ = Perda de carga (m)

$L$ = Comprimento do fluxo no qual ocorreu a perda de carga (m)

$A$ = Área da seção transversal do solo (m<sup>2</sup>)

Quando a infiltração de água precipitada ocorre em meio não saturado, com grau de saturação inferior a 100%, o cálculo de parâmetro de condutividade hidráulica proposta por Darcy (1856) já não é suficiente e, portanto, é necessário o estudo de solos não saturados, que primordialmente trata do conhecimento da curva de retenção de água no solo (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Sugiram outros trabalhos que originaram a Lei de Buckingham-Darcy ou Lei de Darcy-Buckingham, sendo a Equação (3) a que trata do fluxo de água em meios porosos não saturados pela equação de Richards (Richards, 1931), além de pesquisas relacionadas a retenção de água no solo e a determinação da sucção (Fredlund; Rahardjo, 1993; Fredlund, 2006), que foram fundamentais para o estudo de fluxo em solos não saturados e entendimento da capacidade de armazenamento de água no interior dos vazios (poros) de cada tipo de solo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (3)$$

Em que:

$\theta$ = Teor de umidade ou conteúdo volumétrico de água (L<sup>3</sup>L<sup>-3</sup>)

$t$ = Tempo (T)

$x$ = Coordenada espacial (L)

$h$ = Pressão de água ou Potencial matricial (L)

$k$ = Coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (m/s)

$S$ = Volume de água removido pelas plantas (L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup> T<sup>-1</sup>)

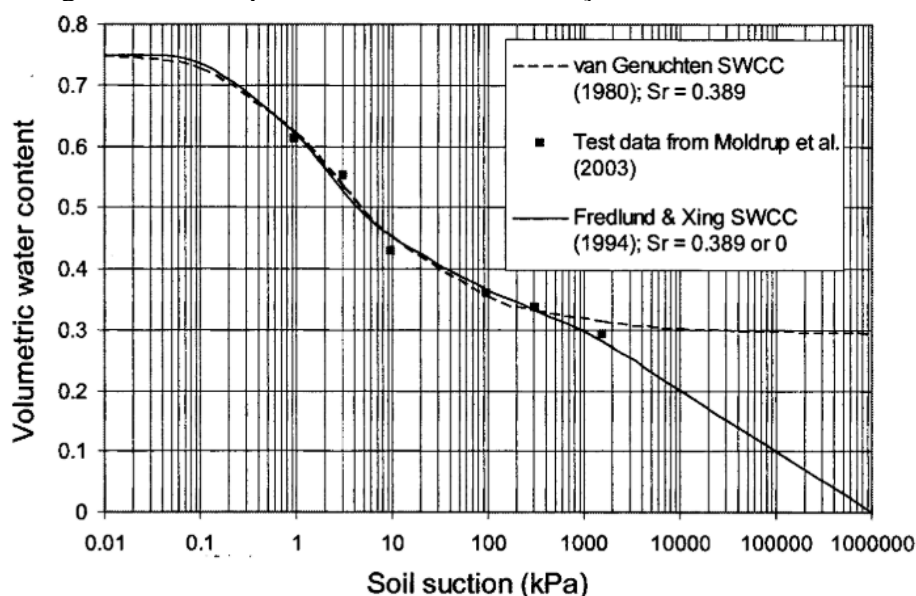
$\alpha$  = ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical (graus)

O teor de umidade volumétrico é utilizado nas curvas de retenção e na previsão da permeabilidade de solos na condição não saturada. A partir da década de 90, esse parâmetro  $\theta$  passou a ser muito mais empregado em análises de percolação em meios não saturados, sendo comum seu emprego nas formulações

de balanço de massa de água, como de cobertura final de aterro sanitário e outras considerações ambientais (Huang; Wu, 2012).

Autores como Van Genuchten (1980), Mualem (1976) e Fredlund (2006) em suas pesquisas objetivaram equacionar matematicamente e por meio da curva de retenção de água em solos não saturados submetidos a um fluxo de água. Na Figura 17 mostra-se uma curva característica do solo-água para areia presente no trabalho de Fredlund (2006).

Figura 17. Exemplo de uma curva de retenção de um solo arenoso



Fonte: Fredlund (2006)

A previsibilidade de armazenar mais ou menos da água nos micros e macroporos dos solos, primordialmente, dependerá da tensão superficial, que é a atração maior da água a superfície do solo comparada ao ar e também a capilaridade, que é a atração da água em direção a partícula do solo por adesão ou adsorção (Feddes *et al.*, 1988; Fredlund, 2006; Fredlund *et al.*, 2012).

Basicamente, o comportamento hidromecânico dos solos se relaciona com sua estrutura, e essa pode se apresentar em macro e microporos. A macroestrutura trata-se de um retrato mais do todo e a microestrutura ao arranjo estrutural das partículas e também das agregações entre os componentes que formam os solos (Silva *et al.*, 2020). Os microporos caracterizam a estrutura interior dos agregados e os macroporos constituem os vazios entre os agregados, e ainda assim os

microporos podem se encontrar interconectados e se ligando aos macroporos ou isolados (Silva *et al.*, 2020).

Outro aspecto é a capacidade de retenção dos solos em relação a granulometria, haja vista que em solo mais arenosos, com abundância de poros capilares de tamanhos médios a grandes, permite um rápido aumento inicial da ascensão capilar, mas com limitação na altura final de capilaridade. Enquanto em solo mais finos, como os argilosos, apesar da ascensão ser mais lenta, com o passar do tempo a altura capilar excede, geralmente, os solos mais grossos (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015; Fredlund *et al.*, 1994).

A matriz do solo é a responsável por reter a água, esse fenômeno é definido como potencial matricial ou sucção. Então, quando a água está retida no solo com alguma tensão de sucção, entende-se que essa água não poderá mover-se livremente e quanto maior a sucção, mais difícil será a sua movimentação pelo meio poroso.

Quando chove em uma determinada região terrestre e a água precipitada chega ao solo, primeiramente ela é absorvida pelo macroporos do solo e se infiltra mais rapidamente para o lenço freático pela ação da gravidade. Caso a água se encaminhe para um microporo de um solo ficará retida, o que é chamado de capacidade de campo (Costa *et al.*, 2018). Assim, à medida que vai secando a água dos microporos, a água residual ficará cada vez mais retida, ganhando cada vez mais força, até ficar presa e não se movimentar mais em direção a atmosfera e/ou raízes nas plantas (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015; Lopes, 2012; Santos, 2015; Fredlund, 2019).

A água precipitada se desloca por ação da gravidade para o interior do solo, sujeita a pressão atmosférica, de uma cota com potencial energético maior para um menor no interior do solo. Camapum de Carvalho *et al.* (2015) ressaltam que para o entendimento da energia de um fluxo ocorrer em meio poroso é necessário o conhecimento da termodinâmica, conceito da energia livre de Gibbs, sobre o potencial total de água no solo e sucção.

Fredlund e Rahardjo (1993) explicam que uma parcela da precipitação infiltra no solo e em seguida percola através do maciço em solos saturados e não saturados, considerando que a fase ar é contínua e está em equilíbrio com a atmosfera. Este conceito considera que o ar dos poros pode escapar livremente e instantaneamente para a atmosfera e as pressões nos poros de ar são mantidas constantes e iguais a zero.



Os estudos apontam que há necessidade de realizar uma análise da percolação da água no solo, pois se trata de um processo complexo devido às variações climáticas, de temperatura (ressecamento da superfície do solo) e de pressões de ar entre outras alterações (Fredlund; Rahardjo, 1993).

O processo de infiltração é representado pelas variáveis taxa de infiltração, que inicialmente é elevada e diminui com o decorrer do tempo até o valor da permeabilidade saturada do solo; pela infiltração acumulada, variações do volume infiltrado em determinada superfície do início do processo até um tempo final considerado (Fredlund; Rahardjo, 1993; Pham; Fredlund, 2008).

A infiltração e armazenamento de água no solo podem ser estimados pelo ensaio de sucção, a partir de diversos métodos, mas todos com a finalidade de determinar a curva característica de retenção de água. Essa curva é função da estrutura do solo e depende, em igual grau, de sua composição química e mineralogia, que evolui com a atuação do processo de intemperismo.

O índice de vazios reflete a história de tensões do solo e que afeta diretamente nos resultados da curva de retenção de água (Marinho, 2005).

A sucção é definida como o estado e a tensão expressa à propriedade do solo em reter ou armazenar água e composta por duas parcelas, a sucção matricial e a sucção osmótica (Jucá, 1990). A sucção matricial está relacionada às propriedades físicas e mineralógicas do solo, sendo um fenômeno físico em consequência da tensão superficial que ocorre na interface água-ar (Pham; Fredlund, 2008). A sucção osmótica está relacionada com a concentração química da água do solo.

A sucção aumenta ou diminui de acordo com a presença de água nos macroporos ou microporos que formam os vazios do solo, ou seja, quando o solo está com baixa umidade, a condição em absorver água é grande, logo a sucção é alta. Caso o solo esteja saturado ou com umidade elevada este efeito é reduzido e com isso, a sucção consequentemente diminui (Fredlund; Rahardjo, 1993; Fredlund; Xing, 1994; Fredlund, 2019).

O componente matricial depende da estrutura e da composição do solo, que é definido como a diferença entre a pressão de ar ( $u_a$ ) e a pressão de água ( $u_w$ ) nos vazios ( $u_a - u_w$ ), e tende a desaparecer com a saturação (Fredlund; Rahardjo, 1993).

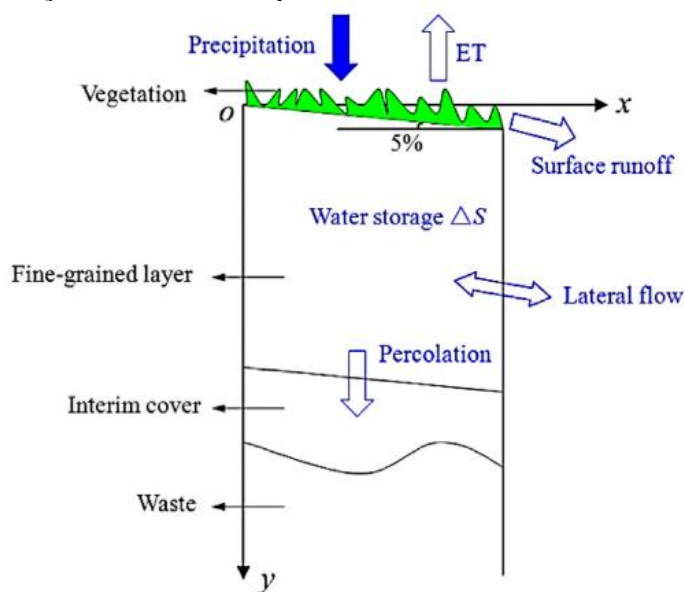
Para Fredlund e Rahardjo (1993), a condutividade hidráulica de um solo não saturado ( $k_{(\theta)}$ ) é na maioria das vezes expresso como função da condutividade hidráulica saturada ( $k$ ), podendo ser obtido através de equações empíricas ou

mesmo através de modelos estatísticos para a predição da condutividade hidráulica não saturada a partir da determinação experimental da curva de retenção de água no solo (Fredlund *et al.*, 1994).

O comportamento hidráulico e mecânico do solo dependem de sua estrutura e de sua composição química e mineralógica para um solo no estado natural ou compactado (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

No caso do fluxo proveniente precipitação pluviométrica em um meio poroso, como é caso em cobertura final de aterro sanitário, o escoamento ocorre na zona não saturada e redistribui-se ao longo da chamada zona de aeração, que é o elemento mais próximo a superfície (Figura 18). A zona de aeração é dependente das características físicas, químicas e mineralógicas do material constituinte da cobertura final de um aterro.

Figura 18. Seção transversal esquemática de um aterro e o balanço hídrico



Fonte: Zhang e Sun (2014)

Para definir o percentual de água que vai ser retido na(s) camada(s) que formam a cobertura final, ou que será drenado superficialmente e/ou evapotranspirado, ou migrar para as camadas de RSU em uma porção inferior é necessário o estudo experimental e/ou analítico e/ou modelagem numérica para se obter o quantitativo contributivo na geração de lixiviado no interior das células do aterro sanitário.

O clima da terra está em contínua mudança, que se desenvolve em termos de meses, anos e milhões de anos (Marinho, 2002) em escala de território mundial, regional e local, esse último como no caso de obras de aterro sanitário.

As mudanças climáticas globais ou mesmo a variação climática sazonal tem sérios efeitos na infraestrutura de cobertura final existente e a projetar (Stock *et al.*, 2020) e ocorrem durante a vida útil das obras de um aterro sanitário, podendo afetar em muitos casos, a sua execução, operação e no seu fechamento definitivo (Catapreta, 2008; Stock *et al.*, 2020).

A variação do regime de precipitação pluviométrica pode levar a situações de parâmetros geotécnicos, que antes eram satisfatórios e agora não são mais, por isso a importância da avaliação de desempenho de cobertura final de aterro sanitário ao longo do ciclo de vida ativo e pós-fechamento (Stock *et al.*, 2020). Os autores explanaram que a pedogênese altera os parâmetros hidráulicos dos solos da cobertura final de aterro, principalmente a condutividade hidráulica saturada, podendo até aumentar a permeabilidade ao longo do tempo, tendo como consequência, o não atendimento aos prescritos em normas técnicas locais e/ou resoluções ambientais, que antes estava classificado como material apto.

Os efeitos climáticos sobre a cobertura final de aterro sanitário incidem diretamente na mudança do fluxo em meio poroso interferindo na infiltração de água de chuva até os RSU (Costa 2015; 2018). Destaca-se o estudo de Catapreta (2008) que possibilitou quantificar o líquido gerado com o incremento de chuva infiltrada até os RSU, baseado no balanço hídrico local de um aterro sanitário localizado em Belo Horizonte - MG.

São Matheus (2008) entende que efeitos climáticos como a intensidade e duração das chuvas são fundamentais para o estudo da infiltração na camada de cobertura de aterros. No que tange aspectos geotécnicos, destaca-se a condutividade hidráulica e a capacidade de infiltração do solo e que esses parâmetros relacionados ao clima podem exprimir três tipos de comportamento nas coberturas, sendo eles:

- a. Intensidade de chuva  $< k_{sat}$  do solo: toda a água de chuva irá infiltrar no solo.
- b. Intensidade de chuva  $> k_{sat}$  do solo, porém menor que a capacidade de infiltração do solo: inicialmente o solo absorverá toda a chuva, com uma taxa de infiltração constante, a qual irá diminuindo a partir do

momento que a capacidade de infiltração reduzir para um valor igual à intensidade de chuva. O excedente de chuva escoará superficialmente.

c. Intensidade de chuva  $> k_{sat}$  do solo e maior que a capacidade de infiltração (ou infiltrabilidade) do solo: neste caso, a taxa de infiltração será decrescente e a parcela de chuva que exceder a condutividade hidráulica saturada do solo escoará superficialmente.

Em obras de engenharia onde o solo é o principal material de construção, como no caso de cobertura final de aterro sanitário, a qualidade da compactação e questões relacionadas a fluxo e retenção de água em meio poroso ganham destaque, pois o produto final permanecerá em campo ao longo da sua vida útil e estará submetido a efeitos climáticos, como a secagem e umedecimento (Mendes;Marinho, 2020).

Por isso, os cálculos de comportamento hidrogeotécnicos torna-se uma ferramenta na condução da investigação experimental para avaliação dos solos utilizados em cobertura final.

Neste contexto, aspectos como clima e o estado do solo são extremamente importantes em obras que requerem solos compactados, principalmente em climas em regiões tropicais e úmidas (Perotti *et al.*, 2022). Que por sua vez, são regiões onde há principalmente disponibilidade de solos residuais nas jazidas e que mesmo compactados ainda estarão em condição não saturada, muitas vezes, necessitando de ensaios específicos de laboratório, como o de curva de retenção de água (sucção). Por isso, é de extrema importância estudar e caracterizar esses materiais, não só na condição saturada, mas também no estado não saturado.

Para avaliação de um solo não saturado submetido a um fluxo de água, deve-se levar em consideração a água que se move para o intra ou inter do solo por alteração no estado de tensões do solo e/ou por questões ambientais como infiltração e/ou evaporação (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015), e que faz parte do objeto desta pesquisa. A forma como o solo e vazios encontram-se diante da presença de água pode ser mensurada e representada pela curva de retenção de água no solo (Marinho, 1995; Fredlund *et al.*, 2002; Fredlund; Delwyn, 2006).

Vieira (2005) concluiu que o projeto das camadas de cobertura final de aterro sanitário está relacionado diretamente com a interação solo-atmosfera, ou seja, está

sujeito ao balanço hídrico local e as características geotécnicas do material de cobertura.

Apesar dos avanços significativos na modelagem e projeto de sistemas de cobertura, faltam estudos a respeito do uso de coberturas em climas tropicais (Perotti *et al.*, 2022).

## **2.6. BALANÇO HÍDRICO**

O balanço hídrico é a contabilização de água no solo em um determinado período de tempo, permitindo inferir a quantidade de água que entra e sai deste sistema (Koerner; Daniel, 1997; São Mateus; Machado; Barbosa, 2012; Sobrinho *et al.*, 2020) . Apesar da definição simplista, o balanço hídrico envolve a mensuração de variáveis que geralmente são de difícil avaliação em campo.

O estudo do balanço hídrico pode ser considerado em várias escalas espaciais, e isso dependerá do objetivo da pesquisa (Rodrigues, 2018). Ou seja, em escala macro, o “balanço hídrico” é o próprio “ciclo hidrológico”, cujo resultado nos fornecerá a água disponível no sistema (no solo, rios, lagos, vegetação úmida e oceanos). Já o balanço hídrico em escala intermediária pode ser representado por uma microbacia hidrográfica, e na escala local, o balanço hídrico se objetiva estabelecer a variação de armazenamento e disponibilidade de água no solo (Silveira; Tucci, 1998), sendo o último o caso em estudos de aterros sanitários.

A quantificação de água em solo também conhecida como balanço hídrico climatológico (Lopes Sobrinho *et al.*, 2020), torna-se importante desde aplicação para o cálculo de conteúdo de água em cobertura final de aterro sanitário (Oliveira; Braga, 2017; São Mateus *et al.*, 2012; Vieira, 2005), até no monitoramento da sazonalidade do volume de água armazenada no solo amplamente utilizado como ferramenta na atividade agropastoril , assim como para planejamento, uso e conservação dos recursos hídricos (Cassettari; Queiroz, 2020).

Em obras como aterros sanitários, comumente, as entradas e saídas de água são consideradas no balanço hídrico do aterro sanitário e incluem as mudanças na água com a atmosfera (precipitação pluviométrica e evapotranspiração), escoamento superficial, infiltração e a capacidade de armazenamento de água na cobertura de solo (capacidade de campo).

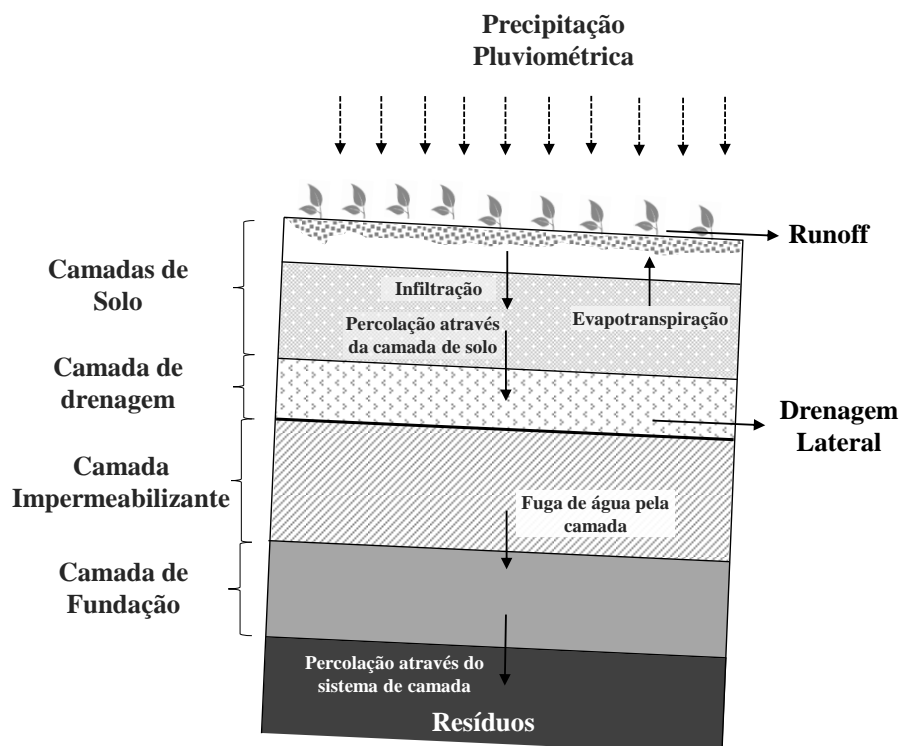
Os dados gerados a partir da análise do balanço hídrico vêm sendo aplicados em diversas áreas do conhecimento, dentre elas destaca-se a análise do balanço

hídrico em coberturas de aterro sanitário. Ademais, até os dias atuais, o balanço hídrico é um método adotado pelos profissionais que analisam o comportamento hidrológico/hidráulico e o desempenho de coberturas de aterro sanitário (Albright *et al.*, 2004; Albright; Benson; Apiwantragoon, 2013; Apiwantragoon; Benson; Albright, 2015; Koerner; Daniel, 1997; Perotti *et al.*, 2022; São Mateus *et al.*, 2012; Stock *et al.*, 2020), com abordagens mais comuns para:

- “I. Comparar perfis e materiais composições alternativas.
- II. Ajudar a entender como a cobertura funcionará e qual mecanismo de fluxo de água é mais importante.
- III. Estimar as taxas de fluxo, os componentes do sistema (por exemplo, tubos de drenagem e geossintéticos) para dimensionamento adequado.
- IV. Estimar a quantidade de líquido contaminado que será gerado; este valor pode ser usado como entrada para um modelo de destino e transporte de lixiviado que promoverá impactos na água subterrânea. A modelagem de destino e transporte é muitas vezes um componente crítico de ação corretiva baseada em risco para projetos de remediação de local.” (Koerner; Daniel, 1997, p.112).

Em relação aos caminhos preferenciais do movimento da água através de uma cobertura final de um aterro sanitário pode ser entendido com mais facilidade ao observar a Figura 19.

Figura 19. Caminho da água na seção transversal de uma cobertura final de aterro sanitário



Fonte: Adaptado de Koerner e Daniel (1997).

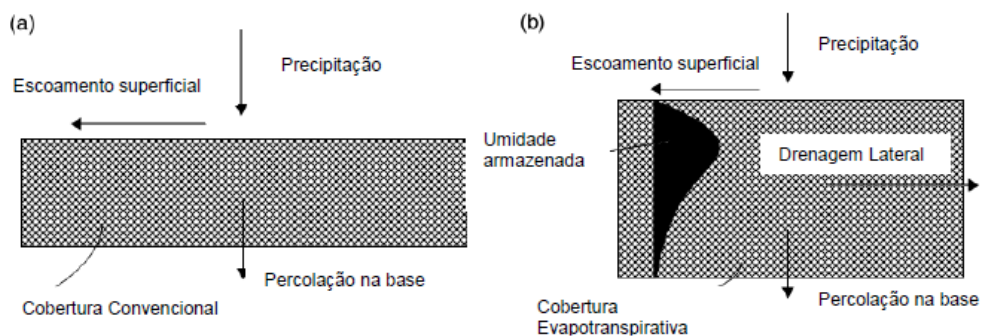
Observa-se que a precipitação pluviométrica pode ser entendida como o parâmetro de entrada do sistema de fluxo de água em uma cobertura final e a saída da água do sistema como sendo a drenagem através da percolação da água para fora da cobertura (Koerner; Daniel, 1997).

No interior da cobertura, a água pode ser armazenada nos poros, drenada lateralmente, infiltrada para camadas inferiores ou devolvida à atmosfera por evapotranspiração, o percentual de cada componente citado dependerá do tipo de material e o sistema de cobertura adotado.

Um dos princípios do balanço hídrico é a conservação de massa, ao ponto da quantificação da água que flui para a cobertura seja igual à quantificação do fluxo da saída cobertura mais a variação na quantidade de água armazenada dentro da cobertura (Koerner; Daniel, 1997; São Mateus *et al.*, 2012).

Com a adoção de cobertura convencional, formada por solos compactados de baixa permeabilidade e/ou a combinação com uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), a força da infiltração é conduzida pelo volume de água que é drenado pelo escoamento superficial. Todavia, em cobertura alternativa ou também chamada de evapotranspirativa, a infiltração passa a ser controlada prioritariamente pela capacidade do solo de reter/armazenar a água precipitada (Figura 20). A palavra alternativa cabe por ser uma cobertura diferente da cobertura convencional.

Figura 20. Componentes do balanço hídrico em coberturas finais de aterros



Fonte: USEPA, 2007.

É senso comum da literatura que o objetivo principal do estudo do balanço hídrico em cobertura de aterro é que a infiltração seja minimizada em direção aos

RSU. Mas caso ocorra que seja em quantidade apenas para favorecer a biodegradação dos RSU e a geração de lixiviados dentro dos níveis aceitáveis ambientalmente e previstos para o tratamento (Cui; Zornberg, 2008; MC Cartney; Zornberg, 2002).

Monteiro (2003) destaca que nem toda água precipitada alcança a superfície do aterro sanitário e entrará no cálculo do lixiviado, já que parte da água de chuva se perde por escoamento superficial e outra parte se perde por evaporação e transpiração. Ressalta ainda, que a quantidade de água infiltrada deve-se descontar o volume armazenado no solo da cobertura.

Um dos modelos de balanço hídrico mais difundido na literatura é o proposto por Thornthwaite e Mather (1955), que pode ser justificado por não requerer parâmetros diretos das condições do solo em campo e apresentar-se mais preciso às variações do regime hídrico e térmico, levando em conta diversos processos que ocorrem no limiar entre o solo e atmosfera (Galvani, 2008a).

Todavia, o modelo citado necessita definir outras componentes do balanço hídrico, tais como: a reserva ou armazenamento máximo de água no solo (capacidade de água disponível) que para muitos autores é adotado o valor de referência de 100 mm (Passos *et al.*, 2017; Rosa *et al.*, 2017) e de 125 mm de precipitação mensal para alguns autores como Dias *et al.* (2013) e Hoffmann *et al.* (2018), e a estimativa da evapotranspiração potencial em cada período e de outras variáveis como a temperatura média do ar, coordenadas geográficas e altitude.

A partir dessas informações básicas, o balanço hídrico possibilita a quantificação da evapotranspiração real, infiltração, percolação e vazão do percolado (Catapreta, 2008; Oliveira; Braga, 2017).

Baseado no método de Thornthwaite e Mather (1955), os autores Koerner e Daniel (1997) produziram uma planilha didática para o desenvolvimento de balanço hídrico em cobertura final de aterro sanitário, que necessita das características geotécnicas do material de cobertura, dados meteorológicos como a precipitação, temperatura e luz solar média, que são considerados como dados de entrada.

Sendo assim, a Equação geral proposta por Thornthwaite e Mather (1955) e que pode ser aplicada para o balanço hídrico, em cobertura de aterro sanitário, pode ser expresso numericamente pela Equação (4):

$$P = INF + R + ETP + Q + CAD \quad (4)$$



P=Precipitação (mm);  
 INF= Infiltração (mm);  
 R= Escoamento superficial ou Runnoff (mm);  
 ETP= Evaporação/Evapotranspiração (mm);  
 Q= Drenagem lateral (L<sup>3</sup> T);  
 CAD= Capacidade de armazenar/reter a água no solo (L<sup>3</sup> T).

Para determinar cada uma das componentes do balanço hídrico é necessário ter um roteiro de cálculo definido. Dentre eles destaca-se o roteiro proposto por Oliveira e Braga (2017) que dividiu o cálculo do balanço hídrico em 4 etapas, sendo elas: evapotranspiração potencial (EP); balanço de infiltração e evapotranspiração potencial (IN-EP); evapotranspiração real (ET); e, cálculo do fluxo de percolação para a camada inferior (Q).

Já no modelo proposto por São Mateus *et al.* (2012), também baseado na Equação geral do balanço hídrico (Equação 4), houve a inclusão de considerações quanto aos aspectos construtivos e operacionais de aterros de RSU e, sobretudo, contou-se com a expulsão de líquidos devido à compressão desses resíduos, a sua umidade inicial e a perda de massa por decomposição dos resíduos foi mensurada.

São Mateus *et al.* (2012) entendem que na camada de cobertura final, o teor de umidade do material utilizado, associado à quantidade de água infiltrada, podem ser disponibilizados na forma de evaporação, armazenamento na própria camada e/ou infiltração por parte dos RSU, caso haja excedente de água. Por conseguinte, a Equação (5) traz o balanço hídrico da camada de cobertura.

$$I_{(RSU)} = I + w_i - ER - \Delta w \quad (5)$$

Onde:

$I_{(RSU)}$ = Infiltração no RSU (m<sup>3</sup>);

I= Infiltração no material de cobertura (m<sup>3</sup>);

$w_i$ = Umidade inicial do material de cobertura, convertida em volume de água (m<sup>3</sup>);

ER= Evaporação (m<sup>3</sup>);

$\Delta w$ =Umidade acumulada no material de cobertura (m<sup>3</sup>).

Nas Equações (6), (7) e (8),  $(I - ER)$  representa a quantidade de água adicionada ou retirada da cobertura (São Mateus *et al.*, 2012) . Portanto, para o balanço hídrico realizado na cobertura, convencionou-se que:

- Se  $[(I - ER) + w_i] < \text{umidade na capacidade de campo } (w_{cc})$ , então toda a umidade permanecerá retida no solo, ou seja:

$$[(I - ER) + w_i] = \Delta w \quad (6)$$

$$I_{(RSU)} = 0 \quad (7)$$

- Caso contrário, considera-se que  $\Delta w = w_{cc}$  , então:

$$I_{(RSU)} = [(I - ER) + w_i] - w_{cc} \quad (8)$$

Sendo “ $w_i$ ”, a umidade gravimétrica inicial da camada de solo, para cada intervalo de tempo “ $\Delta t$ ”, considerado no balanço hídrico; e “ $I$ ” será calculada conforme Philip (1957).

O cálculo do balanço hídrico é um dos métodos mais adotados para análise de desempenho de cobertura final de aterros sanitários e estimativas de geração de lixiviado, tendo como trabalhos seminais (originais) o Fenn *et al.* (1975), Dass *et al.* (1977), Perrier e Gibson (1980) e Gee (1981), todos dos USA com a criação modelagem de fluxo de água em aterros sanitários, até a quantificação de lixiviados.

Em relação a essa modelagem de balanço hídrico em cobertura de aterro sanitário normalmente se utiliza programas como o Help - avaliação hidrológica do desempenho do aterro (Schroeder *et al.*, 1994), nas versões 2 e 3, além dos softwares MODUELO (Moduelo, 2009) desenvolvido por pesquisadores da Universidade Catambria na Espanha e do UNSAT-H.

Ahmed *et al.* (1992) pesquisaram a estimativa da taxa e distribuição temporal do lixiviado, com base no método balanço hídrico para determinação da porção de água que escoar superficialmente, evapotranspira e que se infiltra até os RSU. Porém, os autores refutam que nenhum dos modelos mencionados por Fenn *et al.* (1975), Dass *et al.* (1977), Perrier e Gibson (1980) e Gee (1981), incluiu o cálculo do lixiviado acumulado no fundo do aterro.

Ahmed, Benson, Albright, Apiwantragoon relacionaram o desenvolvimento de pesquisas de balanço hídrico e fluxo de água de chuva em solo desde a década 90, com os trabalhos de Wang e Benson (1995) e Kraus, Benson *et al.* (1997), desenvolvido por Khanbilvardi e Ahmed (1995) de um modelo bidimensional de fluxo não estacionário para descrever o processo de fluxo de lixiviado em um aterro sanitário e outro sobre fluxo em cobertura em solos não saturados (Meerdink; Benson *et al.*, 1997).

Com o passar dos anos, os autores passaram a estudar especificamente o comportamento e desempenho das coberturas de aterro sanitário mediante ao balanço hídrico local, por meio de modelagem no help e UNSAT-H em coberturas em solo (Khire; Benson, *et al.*, 1997) e com dados de campo de uma cobertura do tipo barreira capilar (Khire; Benson; Bosscher, 1999).

Após os anos 2000, os autores percursores traçaram uma linha de pesquisa mais aplicada com estudos de balanço hídrico em diversos tipos de coberturas de aterros sanitários, que estão destacados a seguir pela importância e aderência a temática, de acordo com a temporalidade.

No início do século XXI, os trabalhos sobre análise de balanço hídrico contavam com aparato experimental de campo com os lisímetros (Albright; Benson *et al.*, 2004) e a modelagem em software com o HELP, para identificar os caminhos preferenciais da água em cobertura de CCL em região úmida e detectar que a permeabilidade aumentava após um ciclo de 4 anos, de  $10^{-7}$  para  $10^{-5}$  cm/s (Albright; Benson *et al.*, 2007).

Bohnhoff *et al.* (2008) compararam os resultados obtidos em ensaios de campo com lisímetros e uma modelagem de balanço hídrico com três softwares *Leachm*, *Hydrus* e *Unsat-H*, em cobertura final de aterro sanitário do tipo barreira capilar, localizados em clima sub-úmido. Nesse trabalho foi possível identificar que os três softwares capturaram, com precisão razoável, o efeito da sazonalidade da precipitação nos cálculos dos elementos do balanço hídrico no solo.

Neste contexto de trabalho que envolveram avaliação do comportamento de cobertura de aterro sanitário com uso de lisímetro ainda pode-se citar as pesquisas desenvolvidas por Mijares *et al.* (2012) que também contou com programa experimental completo com uso de 35 sensores para medição de teor de umidade volumétrico, temperatura do solo e pressão de água. A principal contribuição foi a

determinação da condutividade hidráulica com lisímetros das coberturas finais testadas formadas por argila compactada e argila somente lançada.

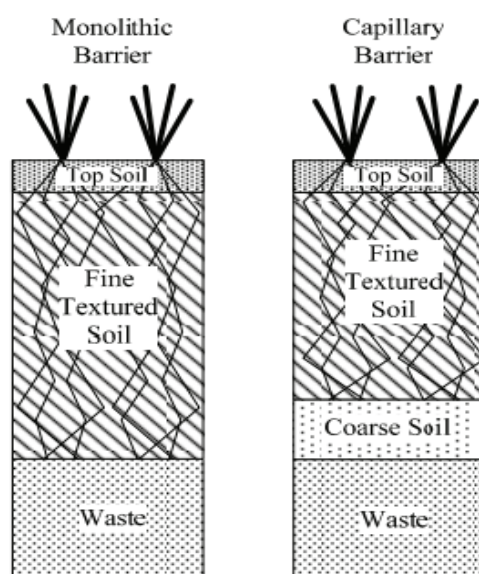
Diante dos estudos com a temática de comportamento e desempenho das coberturas evapotranspirativas (ET), desenvolvidos nos Estados Unidos, há indícios de aumento no uso de ET, ao longo das últimas duas décadas no país.

Na avaliação hidrológica em escala de campo de coberturas de ET requer método direto ou indireto para quantificar a infiltração através das coberturas de solo por ensaios com lisímetros (Mijares *et al.*, 2012), ainda ensaios de laboratório, análise dos resultados da geração de lixiviado via modelagem no Help (Berger, 2015), com comparação dos dados obtidos pelo método de Balanço Hídrico (Alslaibi; Abustan *et al.*, 2013).

Em países desenvolvidos que utilizam aterros sanitários para a disposição final dos seus RSU, o clima e processos hidrológicos locais são apontados como fatores mais relevantes durante a escolha da cobertura final de um aterro sanitário, principalmente ao se buscar opções que levam em consideração as variáveis do balanço hídrico no seu dimensionamento (Benson; Bareither, 2012), onde a espessura da camada que armazena a água proveniente da infiltração é fator primordial para o êxito do sistema, principalmente durante a estação mais chuvosa (Benson; Albright *et al.*, 2002).

A cobertura evapotranspirativa, dos tipos monolítica e barreira capilar (Figura 21), ganham destaque ao seu uso, principalmente em regiões áridas e semiáridas, por ter precipitação pouco acentuada e evaporação favorável e também por empregarem processos hidrológicos naturais congruentes com a paisagem circundante, o que reduz os requisitos de manutenção a longo prazo (Benson; Bareither, 2012).

Figura 21. Tipos de cobertura final evapotranspirativas



Fonte: Benson e Bareither (2012)

Ressalta-se que o objetivo do uso de coberturas evapotranspirativas não é somente impedir a entrada da água da chuva, mas sim montar um sistema de camadas de solo capaz de armazená-la até a ocorrência da evapotranspiração, através de espécies vegetais implantadas em sua superfície (Rios, 2016).

Outro trabalho que quantificou a infiltração em locais úmidos que variou de 0,1 a 6,2 mm/ano, enquanto que em regiões áridas e semi-áridas, a infiltração foi menor que 0,1mm/ano, para cobertura GCL (Albright; Benson; Apiwantragoon, 2013b), e maior quantidade de drenagem lateral em até 240 mm/ano, sendo a precipitação anual média de 915 mm.

O artigo de Zhang e Sun (2014) apresenta inúmeras lacunas de pesquisa, dentre elas, destaca-se a necessidade de estudar materiais com alta capacidade de armazenamento de água em regiões úmidas, onde as coberturas ET são mais eficazes em áreas onde a estação chuvosa coincide com a estação quente, sendo esse aspecto bem diferente comparado o que ocorre na Amazônia (Rocha *et al.*, 2017).

Apiwantragoon, Benson e Albright (2015) pesquisaram a hidrologia em escala de campo de coberturas monolíticas e barreira capilar de 12 aterros sanitários dos USA, com precipitação anual de 119 a 1.263mm, utilizando método do balanço hídrico para mensuração da infiltração via lisímetros. A infiltração variou de 0 a 225

mm (0-34% da precipitação), e o componente mais significativo foi a evapotranspiração potencial com cerca de 60%.

Já o trabalho de Zhan, Qiu e Xu (2016) analisou o comportamento de infiltração de água de chuva em cobertura evapotranspirativa monolítica por meio de método de elementos finitos. Os resultados apontaram que quando a intensidade de chuva se concentra na primeira metade do período total de precipitação, ocorre mais rapidamente saturação do solo, não sendo capaz de armazenar em camadas mais superficiais, favorecendo a concentração de água na parte inferior da cobertura monolítica, ficando na iminência de percolar até os RSU.

No entanto, o uso de coberturas alternativas como, por exemplo, o uso de três camadas de solo com granulometria diferentes, composta por argila compactada (CCL) na porção mais inferior, acima dela uma camada de silte e superior a esta uma de areia de cascalho se mostraram eficaz em regiões úmidas. Todavia, apenas para chuvas com tempo de retorno até 35 anos (Ng *et al.*, 2016).

Por outro lado, sistema de cobertura de solo compactado também pode ser usado para minimizar a entrada de água no aterro devido à baixa permeabilidade da cobertura de solo (Beck-Broichsitter *et al.*, 2018; Rahardjo *et al.*, 2017) desde que cumpra critérios de propriedades do solo para evitar rachaduras por dessecação, ou complementadas com geotêxtil ou geossintéticos.

Por meio da execução de ensaios geotécnicos laboratoriais, ensaios de campo com sensores de umidade e modelagem bidimensional, Rahardjo *et al.* (2017) obtiveram resultados satisfatórios com o uso de solo residual compactado como cobertura de aterro sanitário em Cingapura.

Sendo assim, o desempenho da cobertura com solo compactado mostrou uma minimização da infiltração de água da chuva no aterro, diminuindo assim o movimento de lixiviado de materiais residuais para a área circundante (Moraci *et al.*, 2018; Rahardjo *et al.*, 2017).

No contexto de desempenho de cobertura final de aterro sanitário, inúmeras abordagens que contemplam modelagem de fluxo, com as mais variáveis composições de coberturas e tipo de materiais, geralmente utilizam suporte computacionais softwares, como destaque têm-se o Help, Hydrus e Vadose, todos com a base em Métodos de Elementos Finitos (MEF).

Beck-Broichsitter *et al.* (2018) desenvolveram um modelo no software Help, provando que a modelagem de fluxo pode ser útil para resolver balanço hídrico de

sistemas de coberturas de aterros. Ainda no trabalho foi possível verificar aplicabilidade de um modelo empírico-estatístico para prever a geração de lixiviado em sistemas de cobertura de aterros para as condições do local.

Já em relação ao uso do software Vadose e execução de ensaios laboratoriais foram necessários para avaliação de desempenho hidrológico em dois tipos de cobertura de aterro sanitário, convencional com CCL e evapotranspirativa, situadas em região semiárida dos Estados Unidos (Stock *et al.*, 2020).

Como resultado, ocorreu aumento da permeabilidade com o passar dos anos, consagrando a relação entre a pedogênese e a piora do parâmetro hidráulico dos materiais de cobertura de balanço hídrico. Nas coberturas convencionais, a evaporação foi o mecanismo mais eficaz na remoção de água para fora das coberturas. Já nas coberturas alternativas ou de balanço hídrico, a transpiração foi o mecanismo mais importante na remoção de água dos materiais, contribuindo com cerca de 58% a 73% para o balanço hídrico (Stock *et al.*, 2020).

Destarte, o trabalho de São Mateus *et al.* (2012) que desenvolveram um estudo proveniente de 44 meses de monitoramento de uma célula de aterro sanitário municipal em Salvador – BA. O estudo contou com ensaios de laboratório, equações analíticas e modelos unidimensionais do fluxo levando em conta o balanço hídrico baseado na variação de geração de lixiviado dentro de uma célula.

Os resultados de geração de lixiviado apontaram que esse volume tem contribuição 29% advindo das águas pluviais que entram entrar nas células de RSU, e 71% da quantidade é proveniente da biodegradação do RSU (São Mateus *et al.*, 2012).

Os autores ainda alegam que na prática, em regiões tropicais como o Brasil, a cobertura de aterro sanitário tem bastante influência na redução de volume gerado de lixiviado, por isso a necessidade da compreensão do balanço hídrico do aterro.

São Mateus *et al.* (2012) destacaram alguns trabalhos em âmbito mundial que, desenvolveram pesquisas de balanço hídrico em aterros sanitários (Quadro 3).

Quadro 3. Alguns artigos que tratam do balanço hídrico em aterros sanitários

<b>Autor - Data</b>	<b>País</b>
Blight and Fourie (1999)	África do Sul
Capelo Neto <i>et al.</i> (1999)	Brasil
Monteiro <i>et al.</i> (2001)	Brasil
Dwyer (2001)	USA
Gomes <i>et al.</i> (2002)	Brasil
Pessin <i>et al.</i> (2002)	Brasil
Medeiros <i>et al.</i> (2002)	Brasil
Lange <i>et al.</i> (2002)	Brasil
Cortázar <i>et al.</i> (2003)	Espanha
Visvanathan <i>et al.</i> (2003)	Tailândia
Marques e Manzano (2003)	Brasil
Fellner <i>et al.</i> (2003)	Áustria
Gisbert <i>et al.</i> (2003)	França
Blight <i>et al.</i> (2003)	África do Sul
Albright <i>et al.</i> (2003)	USA
Hadj-hamou and Kavazanjian (2003)	USA
Marques e Vilar (2003)	Brasil
Simões <i>et al.</i> (2003)	Brasil
Padilla <i>et al.</i> (2007)	Brasil
Coelho <i>et al.</i> (2007)	Brasil
São Matheus (2008)	Brasil
Catapreta (2008)	Brasil

Fonte: Adaptado São Mateus *et al.* (2012)

Ainda no cenário nacional, destacam-se os trabalhos com a abordagem na avaliação do balanço hídrico em coberturas evapotranspirativas (Izzo *et al.*, 2013), camadas oxidativas com mistura de solo e material compostado e cobertura CCL (Costa *et al.*, 2018), e mais recentemente o trabalho de Souza *et al.* (2019) com estudos de balanço hídricos do tipo convencional CCL e com multicamadas com misturas em proporções diferenciais de solo e rejeito de cinza de carvão.

O trabalho de Izzo *et al.* (2013) também contou com um modelo em escala de laboratório para estudar as variáveis envolvidas no processo de funcionamento de uma cobertura evapotranspirativa do tipo barreira capilar, onde era possível variar a inclinação da cobertura e aplicar volume de água, simulando precipitação.

Ainda no Brasil, pesquisas baseadas na análise das vazões de lixiviados provenientes do estudo do balanço hídrico em três tipos de coberturas distintas de aterro sanitário em uma região com clima úmido amazônico (Oliveira; Braga, 2017), que empregou um material alternativo, resíduos da construção civil, em substituição aos convencionalmente utilizados em sistema de drenagem de água (na



cobertura) e de gás em aterros sanitários, em função da semelhança dos coeficientes de permeabilidade dos materiais.

Neste contexto, para avaliação de desempenho de sistemas e materiais de cobertura final de aterro sanitário é fundamental a investigação das propriedades hidráulicas para o dimensionamento, projeto e segurança quanto a mensuração de cada componente do balanço hídrico individual de cada aterro sanitário.

De modo projetar uma cobertura final de aterro sanitário, que necessita de um fechamento para minimização de infiltração de água de chuva para dentro dos RSU e consequentemente diminua a geração de lixiviado (Moraci *et al.*, 2018).

Todavia, muitas vezes é necessário simulações hidrológicas nessa cobertura final de aterro sanitário a longo prazo, prevendo períodos de sazonalidade de chuva e fenômeno climáticos, para garantir a efetividade dessa obra civil.

Contudo, esses designers de coberturas estão atrelados a soluções simples, porém onerosas com alteração das espessuras das camadas de cobertura e disposição dessas camadas.

Outro ponto importante que deve ser avaliado durante a construção são as propriedades hidráulicas *in loco*, pois geralmente são normalmente determinadas em amostras compactadas em laboratório e podem não refletir a condição dos solos de cobertura após a exposição de longo prazo às condições ambientais locais (Albright; Benson *et al.*, 2007).

Outrossim, ao longo do ciclo de vida útil de um aterro sanitário, os processos de umedecimento e secagem e a cobertura final como o elemento mais próximo ao meio ambiente, pode ocasionar alterações até em pedogênese do material natural (Stock *et al.*, 2020), e consequente, mudanças no coeficiente de permeabilidade que antes estava a favor da segurança, além da mudança do balanço hídrico da cobertura (Albright; Benson *et al.*, 2007).

Diante desse cenário apontado, o estudo de como ocorre o fluxo de água de chuva sazonal em cobertura final de aterro sanitário, de em um município de uma região típica da Amazônia Paraense, são primordiais para identificar o desempenho da camada que será inserida ao final de vida útil desse aterro.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia foi dividida em quatro etapas para o estudo:

ETAPA 1 – Realização de um tratamento estatístico dos dados hidrológicos das séries históricas de precipitação pluviométrica e temperatura.

ETAPA 2 – Coleta e caracterização, de acordo com as normas da ABNT de dois solos do Marabá-Pará, sendo um solo fino argilo-siltoso (SF) e outro solo granular arenoso (SG) que compuseram a cobertura final do aterro sanitário fictício. Em seguida, foram determinadas as propriedades físicas, mineralógicas e geotécnicas dos solos.

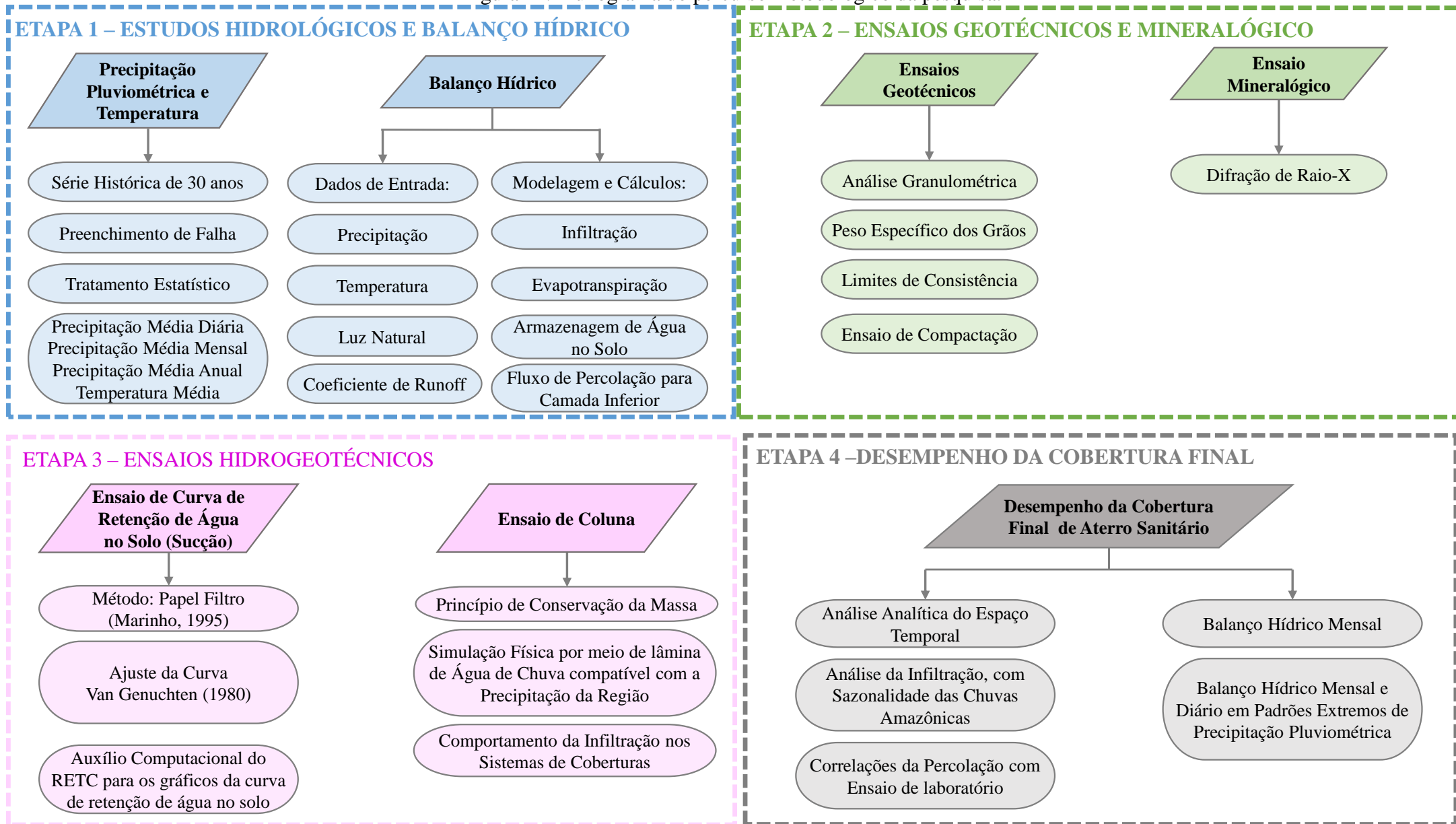
ETAPA 3 – Realização de ensaios hidrogeotécnicos para obtenção da curva de retenção de água nos solos (ensaio de sucção), ensaios de coluna e permeabilidade.

ETAPA 4 – Comparar o comportamento o balanço hídrico nos dois tipos de cobertura final de aterro sanitário, denominada no estudo como desempenho das coberturas. A referida análise consistiu em verificar a infiltração de água de chuva ao longo do tempo, em região úmida, quantificando e analisando o balanço de água, entrada e saída de água.

A escolha dos ensaios realizados com os materiais de coberturas baseou-se desde a literatura clássica e nos trabalhos científicos publicados nos últimos 30 anos assim como a disponibilidade de equipamentos de laboratório e infraestrutura.

Na Figura 22 apresenta-se um fluxograma geral contendo o percurso metodológico desta pesquisa.

Figura 22. Fluxograma do percurso metodológico da pesquisa.



Fonte: Autora (2023).

Baseado na Figura 22, são necessários alguns esclarecimentos. Os dados de precipitação pluviométrica e temperatura foram oriundos de bases oficiais (ANA e INMET) e no caso da armazenagem de água no solo foi proveniente do ensaio de sucção com papel filtro (utilizado o  $\theta_{33}$  de cada solo).

Na Etapa 3, os valores de lâminas de água no ensaio de coluna foram baseados nos resultados de precipitação pluviométrica diárias de maior ocorrência, calculadas durante a Etapa 1.

A Etapa 4 dependeu dos resultados da Etapa 1 que trata da estatística descritiva do balanço hídrico mensal e diário, tanto para análise temporal e quanto da infiltração relacionada a questões de sazonalidade.

Ainda na Etapa 4, o critério de desempenho foi baseado, prioritariamente, nos resultados do ensaio de coluna pertencente a Etapa 3.

No estudo convencionaram-se duas nomenclaturas para os dois tipos de cobertura final de aterro sanitário, de acordo com a composição e dos solos, a fim de reduzir a repetição de palavras (Quadro 4).

Quadro 4. Tipos de cobertura final, composições e nomenclaturas adotadas

<b>Tipos de Cobertura Final</b>	<b>Composição</b>	<b>Nomenclatura Adotada</b>
Convencional	Formada por uma única camada de solo fino compactado com baixa permeabilidade	CONV
Evapotranspirativa Barreira Capilar	Formada por um sistema de multicamadas, sendo uma camada com solo fino e outra com solo grosso na porção inferior	BARCAP

Fonte: Autora (2023).

Ensaio, testes e análises foram realizados em laboratórios da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa): Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas (Instituto de Geociências e Engenharias), no Laboratório de Resíduos Sólidos da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, e outros laboratórios da Universidade Federal do Pará (UFPA) e da Unifesspa.

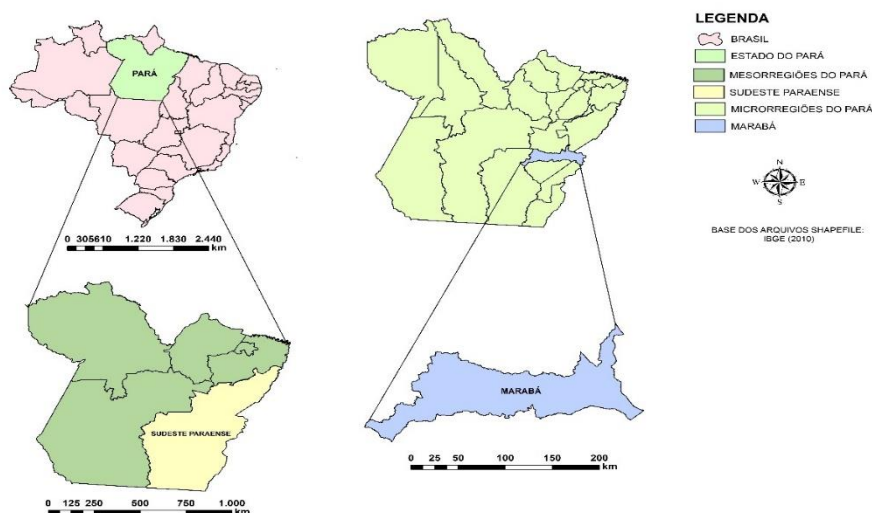
### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi selecionado um perfil de solo predominante e abundante em termos quantitativos no município de Marabá, situado na região sudeste do Pará, na Amazônia Oriental, que dista 554 km da capital paraense Belém.

Á área de estudo é o município de Marabá que possui uma área de 15.128,058 km<sup>2</sup> e, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2010 contava com uma população de 233.669 habitantes, sendo a população estimada para o ano de 2022 de 266.536 habitantes (IBGE, 2021).

Na Figura 23 apresenta-se a localização do município ambientado em zona úmida da Amazônia.

Figura 23. Localização da área de estudo aplicada na Pesquisa



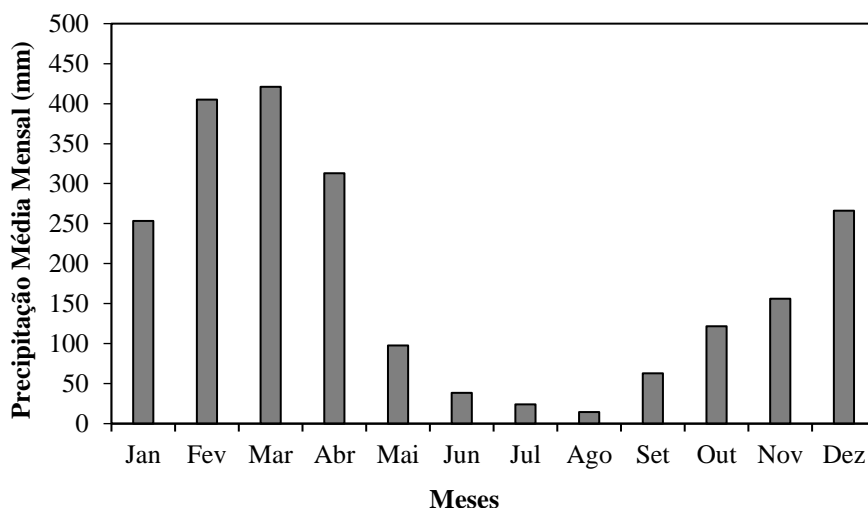
Fonte: Autora (2023).

#### 3.1.1. CLIMA E ASPECTOS FISIOGRAFICOS

A região estudada apresenta clima dos tipos Am (tropical úmido e de monção) e Aw (tropical úmido), segundo a classificação de Köppen, com base, principalmente, em suas precipitações pluviométricas e em suas temperaturas. O período invernos com chuvas que vai de janeiro a maio, com as mais elevadas precipitações no mês de março. Segundo a classificação climática de Thorntwaite, Marabá-PA enquadra-se em uma região de clima úmido e subúmido, com pequena ou nenhuma deficiência de água (CPRM, 2001).

Para isso, utilizou-se o banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Na Figura 24, têm-se os valores médios mensais de precipitação acumulada de 1961 até 1990.

Figura 24. Precipitação Média Mensal de Marabá - 1961 a 1990

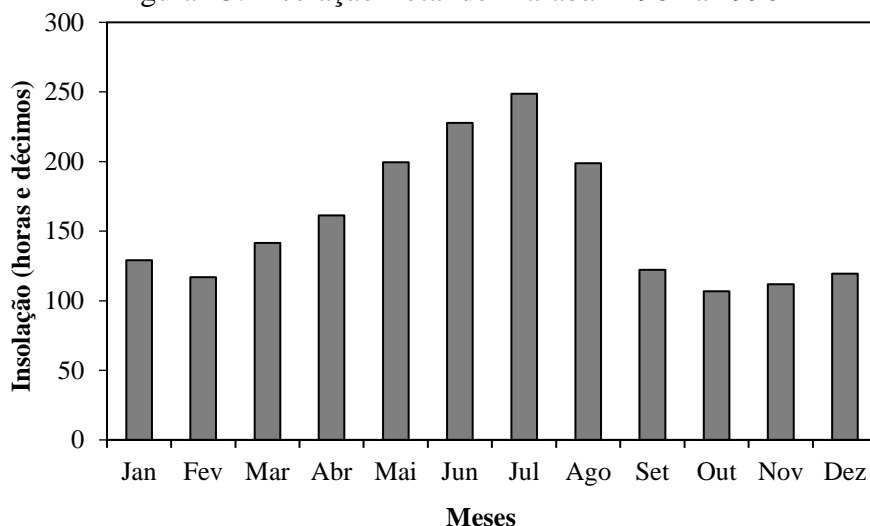


Fonte: Adaptado do INMET.

Observa-se que março é o mês mais chuvoso. Além disso, evidencia-se que o mês de agosto como o mais seco da série. Com isso, é possível inferir que a lâmina de água de chuva que chegará até a camada de cobertura final no mês de março tende a ser maior que aos dos outros meses.

Em contrapartida, a partir da observação da Figura 25, nota-se que as maiores insolações do ano acontecem nos meses de junho e julho, que, de acordo com a Figura 24, também são os meses de menor precipitação do ano, ficando abaixo somente do mês de agosto.

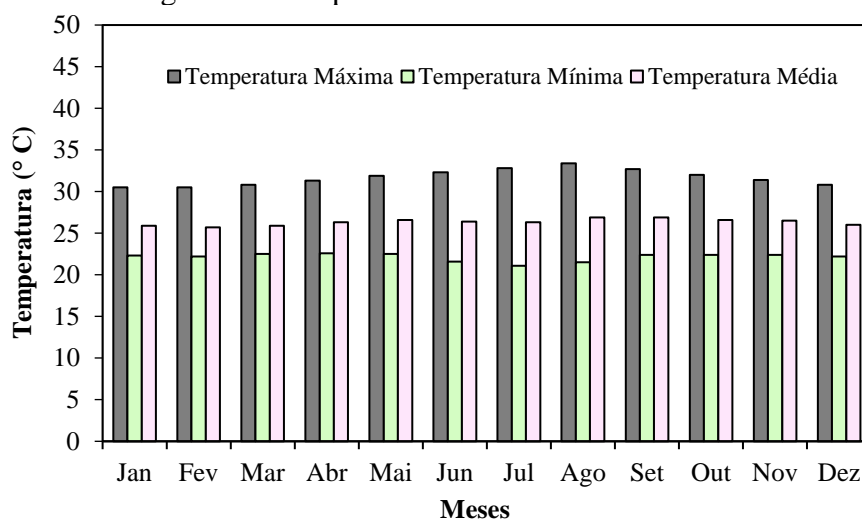
Figura 25. Insolação Total de Marabá - 1961 a 1990



Fonte: Adaptado do INMET.

Já em relação à temperatura, evidencia-se que as temperaturas máxima, mínima e média apresentam variações ao longo do ano, uma vez que estas correspondem a valores de aproximadamente 32°C, 22°C e 26° C, respectivamente. Entretanto, comparando as temperaturas máximas e mínimas, nota-se uma variação de aproximadamente 10° C (Figura 26).

Figura 26. Temperatura de Marabá - 1961 a 1990



Fonte: Adaptado do INMET.

### 3.2. MATERIAIS

Os solos selecionados foram coletados em uma jazida situada a aproximadamente 2 km de distância, em linha reta, do Aeroporto João Correa da Rocha (Figura 27), no município de Marabá-PA. As coordenadas do local de coleta

possuem latitude 5,38° S, longitude 49,15° W e altitude de 98m, e encontra-se às margens da Rodovia Federal Transamazônica (BR-230), km-8, sentido Marabá-Itupiranga.

Figura 27. Localização da jazida de solo



Fonte: Adaptado de Google Earth.

Nos mapas geológicos do Estado do Pará produzidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2001), o local da jazida são depósitos sedimentares aflorantes em cortes da rodovia BR-230 de Marabá, considerados de idade cretácea superior, pertencentes à Formação Itapecuru. A Formação Itapecuru é caracterizada pela presença de Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo, textura fina a média, composta por silte-argila proporcionalmente superior à porção areia (CPRM, 2001), e bem representativo do tipo de solo presente em Marabá-PA.

A escolha da jazida foi motivada pelo fato de tratar-se de um ponto já explorado economicamente para matéria-prima em construção civil da região. A Figura 28 apresenta-se uma visão geral da jazida e os dois pontos de coleta do material utilizado nesse estudo. Também foi possível constatar às ranhuras recentes realizadas pela escavadeira na coleta de materiais para aplicação em obras de pavimentação e de infraestrutura realizadas pela prefeitura do município.



Figura 28. Visão geral do local de coleta das amostras de solo na jazida



Fonte: Autora (2020).

A coleta das amostras de solos, do perfil geológico, foi de uma camada subjacente a uma camada superficial, rica em matéria orgânica. Foram coletados aproximadamente 150 kg de solo (ponto 1) entre as profundidades 1,00 m a 2,20 m, em relação à superfície natural do terreno. Ao analisar de maneira expedita em campo o solo fino (SF) foi classificado como argilo-siltoso. Também foi coletado em um horizonte inferior, entre 2,20 m e 3,20 m de profundidade (ponto 2), abaixo de um veio de seixo branco rolado, também presente no ponto 1, cerca de 100kg de um solo mais grosso (SG) classificado como areno-siltoso.

As análises expeditas em campo dos solos coletados revelaram muitas feições e que permitiram inferências, nem sempre possíveis nas análises de laboratório. A análise de campo permitiu identificar a granulometrias e umidade dos dois solos, por meio de análise tátil visual, de acordo com o previsto no manual de descrição e coleta de solo de campo da Sociedade Brasileira de Ciência dos Solos (Santos *et al.*, 2015). E deste modo, possibilitou-se ter informações úteis na escolha dos materiais para compor a cobertura final de aterro sanitário, preliminarmente, de forma mais assertiva.

Após a coleta as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa). Em seguida, as amostras foram

dispostas em lonas para secar ao ar, homogeneizadas e armazenadas em recipientes plásticos tampados.

### 3.3. ESTUDOS HIDROLÓGICOS

O município está localizado em uma área próxima à linha do equador e sofre influência de fatores climáticos como altas temperaturas que originam elevada evaporação, e precipitações que podem influenciar significativamente na entrada e saída de água de chuva em meio poroso.

Um aprofundamento na análise das componentes e parâmetros viabilizaram o cálculo do balanço hídrico, como: precipitação pluviométrica, temperatura do ar, infiltração, evapotranspiração e armazenamento.

Na Tabela 3 encontram-se os dados climáticos que foram levantados e utilizados no estudo, e a fonte correspondente.

Tabela 3. Composição dos dados climáticos		
Variáveis	Fonte e Estação	Série Histórica
Precipitação pluviométrica diária (mm)	INMET (Convencional 82562)	1991-2020
Precipitação pluviométrica mensal (mm)		
Temperatura máxima (°C)		
Temperatura mínima (°C)		
Temperatura média (°C)	ANA Chuvas_C_00549002)	
Insolação (h)	(Clima_C_00549002)	
Umidade Relativa do Ar (%)		
Vento (km/dia)		
	Koerner e Daniel	-
Luz solar média (N)	(1997)	

Fonte: Autora (2023).

O tratamento estatístico dos dados de precipitação pluviométrica de Marabá foi realizado de duas estações pluviométricas (INMET 82562 e ANA C\_00549002) oficiais da Agência Nacional das Água e Saneamento Básico (ANA) e INMET, com série histórica de 30 anos, para obtenção das precipitações médias diárias, médias mensais e total anual.

Além disso, foram utilizados os dados consistidos (tratados) de precipitação pluviométrica total diária, mensal e anual; e na ausência destes foram usados os dados brutos (não tratados), devido à significativa ausência de estações com dados consistidos na região norte. Em situações de ausência de dados diários, foi feito o preenchimento de falhas de acordo com a regressão linear simples (Equação 9). De acordo com Bertoni e Tucci (2001), a técnica de preenchimento de falha por meio da regressão linear é a mais aperfeiçoada em relação à ponderação regional.

$$\hat{y} = a + bx \quad (9)$$

Em que:

$\hat{y}$  = valor estimado da variável dependente (chuva da estação com falhas);

$a$  = coeficiente linear;

$b$  = coeficiente angular da correção;

$x$  = Valor observado da variável independente (chuva da estação com série completa).

Para estimar os coeficientes de regressão do modelo foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Os parâmetros para análise da eficiência do modelo foram o coeficiente de correlação (Pearson) e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ).

O coeficiente  $r$  de Pearson pode ser determinado a partir da Equação (10) e pode variar de -1 (correlação perfeita negativa), +1 (correlação perfeita positiva), passando pelo valor 0 referente a ausência de correlação (Shiker, 2012):

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (10)$$

Em que:

$n$  = número de dados medidos;

$x$  = dado da variável independente observada;

$y$  = dado da variável dependente observada.

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) é uma medida descritiva que mede a proporção da variação de  $Y$  (variável dependente) que pode ser explicada pela

variável X (variável independente), calculado de acordo com a Equação (11). O valor de  $r^2$  pode variar de 0 a 1 (Shiker, 2012):

$$r^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

Em que:

$\hat{y}_i$  = valor simulado da variável dependente;

$\bar{y}$  = média da variável dependente observada;

$y_i$  = valor calculado da variável dependente.

Após o preenchimento das falhas (quando da ausência de valores de precipitação pluviométrica) foram determinados os parâmetros da estatística descritiva, como a média, média móvel, mínimos, máximos, amplitude, variância, desvio de padrão e quartis da série completa de precipitações pluviométricas (mensais e diárias) com a elaboração também de gráfico do tipo box plot. A estatística descritiva foi desenvolvida com software XLStart da Microsoft Excel, de acesso livre.

Construíram-se histogramas de frequência de lâminas de chuvas diárias da série histórica de janeiro a dezembro, assim como histograma específico do mês com maior média mensal de precipitação pluviométrica que foi março.

Para verificação e quantificação dos dias com chuva e sem chuva ao longo dos meses, e com 30 anos de dados, utilizou-se a ferramenta de formatação condicional que compõem o software Excel, e como definição de critério como dia com chuva aquele que em sua estação meteorológica acusou episódios, além de determinar o espaçamento médio de dias sem chover.

Com a mesma ferramenta também se verificou como estão distribuídos os anos de maiores dias com chuvas por mês. Com isso, possibilitou atestar o ano que mais choveu, ou seja, mais dias com chuva e se ao longo dos anos essa existe uma tendência de ter mais dias com chuva ou mais dias sem chuva.

### 3.3.1. BALANÇO HÍDRICO

A análise do balanço hídrico de Marabá-PA potencializou ao entendimento do comportamento hidrológico da cobertura final para aterro sanitário ao longo dos meses, ao ser imposta por padrões de precipitações pluviométricas e sazonalidade.

Estimou-se a quantidade de água precipitada, armazenada no solo de cobertura, escoada superficialmente, evapotranspirada, infiltrada e percolada até os RSU, com dados climatológicos de 30 anos de série histórica do INMET e ANA.

Para esta pesquisa, o cálculo do fluxo de entrada e saída água de chuva na cobertura de aterro sanitário adotado foi o método do balanço hídrico climatológico normal, com aplicação da metodologia de Thornthwaite e Mather (1955) com estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite (1948) e com auxílio de uma planilha eletrônica Excel elaborada e proposta por Koerner e Daniel (1995).

Entende-se que o método de Thornthwaite e Mather (1955) apresenta-se mais sensível às variações do regime climático e característica do meio poroso hídrico, pois considera, não somente as entradas e saídas de água no sistema, assim como aquela armazenada no perfil do solo e passível de ser utilizada nos diversos processos que ocorrem na interface solo-atmosfera (Galvani, 2008), mostrando assim adesão ao tipo de problema de pesquisa desse trabalho.

Os autores Koerner e Daniel (1995), Catapreta (2008), Oliveira e Braga (2017) apresentaram um roteiro para o cálculo do balanço hídrico em cobertura final de aterros sanitário, de acordo com as premissas e métodos de Thornthwaite e Mather (1955), porém com dados secundários climáticos e do material de cobertura.

Todavia, este trabalho objetiva mensurar as componentes do balanço hídrico com dados primários relacionados as características geotécnicas dos materiais naturais que compõem os dois tipos de cobertura final de aterro sanitário, sendo eles o SF e SG da região de Marabá-PA, e com dados climáticos secundários provenientes da Agência Nacional de Água (ANA) e Inmet.

Os dados climáticos de entrada foram: precipitação (P), temperatura (T) e luz solar média mensal (N). O método ainda necessita de dados dependentes do solo como o coeficiente de Runoff (R), altura de alcance das raízes e características geotécnicas dos solos ( $\theta_{cc}$ ), esse obtido em laboratório pelo ensaio de sucção com papel filtro.

- Precipitação pluviométrica

Foram usados os dados de precipitação pluviométrica diária e mensal, médias e totais, consistidos e não consistidos, bem como os resultantes do preenchimento de falhas da série histórica de 30 anos (1991 a 2020), sendo que as estações de onde

foram tirados os dados estão apresentadas na Tabela 3. Com acesso de todos os dados nas plataformas digitais da ANA e do INMET.

- Temperatura

Os dados de temperaturas utilizados no cálculo do balanço hídrico são em quesitos médios mensais, e a origem dos dados está presente na Tabela 3.

Esse parâmetro é importante por ter influência direta no cálculo da evapotranspiração e no cálculo do índice de calor ( $H_m$ ).

- Luz Natural (N)

A luz natural (N), proveniente do sol, corresponde a quantidade de duração média de luz solar que ocorre em um mês, que tem como variáveis independentes a latitude e o mês do ano a que se refere a análise hidroclimática. Sendo assim, N pode ser obtido por Tabelas de Thornthwaite e Mather (1957), para o hemisfério norte e para o Hemisfério Sul.

Na Tabela 4 pode-se verificar a duração média mensal possível da luz solar no hemisfério sul, apresentada por Thornthwaite e Mather (1957). Para Marabá, que possui a latitude 5,38° S, será feita a interpolação entre os valores 5°S e 6°S.

Tabela 4. Valores mensais de luz natural para o hemisfério sul baseado na latitude.

Graus	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	31,2	28,2	31,2	30,3	31,2	30,3	31,2	31,2	30,3	31,2	30,3	31,2
1	31,2	28,2	31,2	30,3	31,2	30,3	31,2	31,2	30,3	31,2	30,3	31,2
2	31,5	28,2	31,2	30,3	30,9	30,0	31,2	31,2	30,3	31,2	30,6	31,5
3	31,5	28,5	31,2	30,0	30,9	30,0	30,9	31,2	30,0	31,2	30,6	31,5
4	31,8	28,5	31,2	30,0	30,9	29,7	30,9	30,9	30,0	31,5	30,6	31,8
5	31,8	28,5	31,2	30,0	30,6	29,7	30,6	31,5	30,0	31,5	31,5	31,8
6	31,8	28,5	31,2	30,0	30,6	29,4	30,6	30,9	30,0	31,5	31,5	32,1
7	32,1	28,8	31,2	30,0	30,6	29,4	30,3	30,6	30,0	31,5	31,5	32,4
8	32,1	28,8	31,5	29,7	30,3	29,1	30,3	30,6	30,0	31,8	31,2	32,4
9	32,4	29,1	31,5	29,7	30,3	29,1	30,0	30,6	30,0	31,8	31,2	32,7
10	32,4	29,1	31,5	29,7	30,3	28,8	30,0	30,3	30,0	31,8	31,5	33,0
11	32,7	29,1	31,5	29,7	30,0	28,8	29,7	30,3	30,0	31,8	31,5	33,0
12	32,7	29,1	31,5	29,7	30,0	28,5	29,7	30,3	30,0	31,8	31,8	33,3
13	33,0	29,4	31,5	29,4	29,7	28,5	29,4	30,0	30,0	32,1	31,8	33,3
14	33,3	29,4	31,5	29,4	29,7	28,2	29,4	30,0	30,0	32,1	32,1	33,6
15	33,6	29,4	31,5	29,4	29,4	28,2	29,1	30,0	30,0	32,1	32,1	33,6
16	33,6	29,7	31,5	29,4	29,4	27,9	29,1	30,0	30,0	32,1	32,1	33,9
17	33,9	29,7	31,5	29,4	29,1	27,9	28,8	29,7	30,0	32,1	32,4	33,9
18	33,9	29,7	31,5	29,1	29,1	27,6	28,8	29,7	30,0	32,4	32,4	34,2
19	34,2	30,0	31,5	29,1	28,8	27,6	28,5	29,7	30,0	32,4	32,7	34,2
20	34,2	30,0	31,5	29,1	28,8	27,3	28,5	29,7	30,0	32,4	32,7	34,5
21	34,5	30,0	31,5	29,1	28,6	27,3	28,2	29,7	30,0	32,4	32,7	34,5
22	34,5	30,0	31,5	29,1	28,5	27,0	28,2	29,4	30,0	32,7	33,0	34,8
23	34,8	30,3	31,5	28,8	28,5	26,7	27,9	29,4	30,0	32,7	33,0	35,1
24	35,1	30,3	31,5	28,8	28,2	26,7	27,9	29,4	30,0	32,7	33,3	35,1
25	35,1	30,3	31,5	28,8	28,2	26,4	27,9	29,4	30,0	33,0	33,3	35,4
26	35,4	30,6	31,5	28,8	28,2	26,4	27,6	29,1	30,0	33,0	33,6	35,4
27	35,4	30,6	31,5	28,8	27,9	26,1	27,6	29,1	30,0	33,3	33,6	35,7
28	35,7	30,6	31,8	28,5	27,9	25,8	27,3	29,1	30,0	33,3	33,9	36,0
29	35,7	30,9	31,8	28,5	27,6	25,8	27,3	28,8	30,0	33,3	33,9	36,0
30	36,0	30,9	31,8	28,5	27,6	25,5	27,0	28,8	30,0	33,6	34,2	36,3
31	36,3	30,9	31,8	28,5	27,3	25,2	27,0	28,8	30,0	33,6	34,5	36,6
32	36,3	30,9	31,8	28,5	27,3	25,2	26,7	28,5	30,0	33,6	34,5	36,9
33	33,6	31,2	31,8	28,2	27,0	24,9	26,4	28,5	30,0	33,9	34,8	36,9
34	33,6	31,2	31,8	28,2	27,0	24,9	26,4	28,5	30,0	33,9	34,8	37,2
35	36,9	31,2	31,8	28,2	26,7	24,6	26,1	28,2	30,0	33,9	35,1	37,5
36	37,2	31,5	31,8	28,2	26,7	24,3	25,8	28,2	30,0	34,2	35,4	37,6
37	37,5	31,5	31,8	28,2	26,4	24,0	25,5	27,9	30,0	34,2	35,7	38,1
38	37,5	31,5	32,1	27,9	26,1	24,0	25,5	27,9	30,0	34,2	35,7	38,1
39	37,8	31,8	32,1	27,9	26,1	23,7	25,2	27,9	30,0	34,5	36,0	38,4
40	38,1	31,8	32,1	27,9	25,8	23,4	25,2	27,6	30,0	34,5	36,0	38,7
41	38,1	32,1	32,1	27,9	25,8	23,1	24,9	27,6	30,0	34,5	36,3	39,0
42	38,4	32,1	32,1	27,6	25,5	22,8	24,6	27,6	30,0	34,8	36,6	39,3
43	38,7	32,4	32,1	27,6	25,5	22,5	24,6	27,3	30,0	34,8	36,6	39,6
44	39,0	32,4	32,1	27,6	24,9	22,2	24,3	27,3	29,7	34,8	36,9	39,9
45	39,3	32,7	32,1	27,6	24,9	21,9	24,0	27,3	29,7	35,1	37,2	40,2
46	39,6	32,7	32,1	27,3	24,6	21,6	23,7	27,0	29,7	35,1	37,5	40,5
47	39,9	33,0	32,1	27,3	24,3	21,3	23,4	27,0	29,7	35,1	37,8	40,8
48	40,2	33,0	32,4	27,0	24,0	21,0	22,8	26,7	29,7	35,4	38,1	41,1
49	40,5	33,3	32,4	27,0	23,7	20,7	22,5	26,7	29,7	34,5	38,4	41,7
50	40,1	33,6	32,4	26,7	23,1	20,1	22,2	26,4	29,7	35,7	38,7	42,3

Fonte: Adaptado Thornthwaite e Mather (1957).

- Coeficiente de *Runoff* (C) e Escoamento Superficial (R)

O C é o componente do balanço hídrico correspondente a quantidade de água de chuva precipitada e escoada superficialmente num meio poroso, anteriormente a infiltração e que não evaporou (Koerner; Daniel, 1997; Oliveira; Braga, 2017; Rios, 2016; Tucci, 2004). O valor resultante do escoamento superficial (R) depende de parâmetros do meio poroso, tais como: umidade do solo, tipo de solo, inclinação do talude, densidade da vegetação, intensidade e duração da chuva.

Entende-se que nos primeiros minutos de chuva, o fluxo de água que tenderá a infiltrar mais ao solo, obviamente dependendo de várias condicionantes, como cota, declividade, e grau de saturação do solo, de modo que certa parcela de água ainda deve ser evaporada também, e de acordo com os parâmetros citados e presentes naquela área de estudo, ocorre o escoamento superficial (Tucci, 2004).

O coeficiente de *Runoff* é adimensional e de difícil mensuração com precisão em casos como o de cobertura de aterro sanitário (Koener; Daniel, 1997), sendo muitas vezes adotados os valores propostos por Fenn *et al.* (1975) como valores de coeficiente de escoamento, que dependem do tipo de solo e da declividade do terreno receptor da precipitação (Tabela 5).

Tabela 5. Valores do coeficiente de Runoff			
Tipo de Solo	i-Declividade (%)	C	
		Estação de Estiagem	Estação Úmida
Arenoso	$i \leq 2$	0,05	0,10
	$2 < i < 7$	0,10	0,15
	$i \geq 7$	0,15	0,20
Argiloso	$i \leq 2$	0,13	0,17
	$2 < i < 7$	0,18	0,22
	$i \geq 7$	0,25	0,35

Fonte: Fenn *et al.* (1975)

O R foi contabilizado em função da precipitação (P), mensais e diárias, e do coeficiente de Runoff (C), segundo a Equação (12) (Fenn *et al.*, 1975):

$$R = (P) \cdot (C) \quad (12)$$



Para os cálculos de balanço hídrico, os valores de C utilizados nesta pesquisa foram de 0,18 e 0,22, respectivamente, para os meses com menos chuva e para os meses com mais chuvosos.

- Infiltração (IN)

O conceito de infiltração, desde Richards (1960) pouco se diferencia, sendo considerada a entrada descendente de água em meio poroso como por exemplo um perfil de solo natural ou compactado. Para o estudo do caminho da água de chuva em um aterro sanitário torna-se necessária a quantificação da infiltração para verificação da parte contributiva na geração de lixiviado (Koerner; Daniel, 1997; Lopes, 2011).

A IN pode ser mensurada em campo ou no laboratório e ainda de forma indireta, como adotado nesta pesquisa, segundo a modelagem de Thornthwaite e Mather (1955) e Koerner e Daniel (1997). Nela, a infiltração calculada de acordo com a Equação (13), como sendo a precipitação (P) menos o escoamento superficial (R), ambos com unidade em mm.

$$IN = P - R \quad (13)$$

De posse dos dados de entrada, iniciou-se o cálculo do balanço hídrico para as duas configurações de cobertura de aterro sanitário e operacionalizada em seis etapas: evapotranspiração potencial diária (UPET), evapotranspiração potencial (EP); balanço de infiltração e evapotranspiração potencial (IN-EP); armazenagem (WS); evapotranspiração real (ET); e, cálculo do fluxo de percolação para a camada inferior (Q).

- Evapotranspiração Potencial Diária (UPET)

A UPET é referente à quantidade máxima de evapotranspiração que ocorreria se o solo estivesse saturado com água, porém sabe-se que muitas vezes o meio poroso estará não saturado, sendo necessário esse ajuste ao valor da evapotranspiração potencial (Koerner; Daniel, 1997; Thornthwaite; Mather, 1955). Os autores complementam que para a aplicação da Equação (4) há necessidade de se obter primeiramente os valores dos índices de calor mensal ( $H_m$ ), indicados na

Equação (14), e parâmetro empírico usado para estimativa da evapotranspiração (Catapreta, 2008; Koerner; Daniel, 1997; Oliveira; Braga, 2017).

$$H_m = (0,2 \cdot T)^{1,514} \quad (\text{para } T \geq 0^\circ \text{ C}) \quad (14)$$

Em que T é a temperatura média mensal da série histórica de temperatura, com pelo menos 30 anos de duração. Em seguida foi calculada a média anual dos 30 anos de chuva que correspondeu ao índice de calor anual ( $h_a$ ), sendo a somatória do índice de calor ( $h_m$ ) dos doze meses.

Dando prosseguimento ao método, a evapotranspiração potencial diária (UPET) foi calculada de acordo com as recomendações sugeridas pela Equação (15), para  $0^\circ < T < 27^\circ \text{C}$  e pela Equação (16), quando  $T \geq 27^\circ$ .

$$UPET = 0,53 \cdot (10 \cdot T / H_a)^a \quad (15)$$

$$UPET = 0,015 \cdot T^2 + 1,093T - 14,208 \quad (16)$$

Em que:

T = a temperatura em  $^\circ \text{C}$ ;

$h_a$  = índice de calor anual (adimensional).

E o fator empírico adimensional foi calculado de acordo com a Equação (17).

$$a = (6,75 \cdot 10^{-7}) \cdot H_a^3 - (7,71 \cdot 10^{-5}) \cdot H_a^2 + 0,01792H_a + 0,49239 \quad (17)$$

#### • Evapotranspiração Potencial (EP)

Para Koerner e Daniel (1997) a evapotranspiração de um meio poroso refere-se à transferência de água do solo diretamente para a atmosfera (evaporação), e à retirada de água pelos planos e transferência dessa água para a atmosfera por essas mesmas plantas (transpiração). Os autores destacam que a quantidade de evapotranspiração se eleva com o aumento do conteúdo de água do solo, temperatura da superfície, velocidade do vento, assim como Rossato *et al.* (2004) apontam que a evapotranspiração das plantas depende da quantidade de água armazenada no solo.

A mensuração de dados primários de evapotranspiração entre o meio poroso e atmosfera se torna bastante onerosa, devido ao alto custo de equipamentos. Sendo assim, estudos na área de hidrologia e balanço hídrico (Cassettari; Queiroz, 2020; Koerner; Daniel, 1997; Oliveira; Braga, 2017; Sobrinho *et al.*, 2020), assim como neste trabalho, adotou-se o cálculo da evapotranspiração, por planilhas eletrônicas, baseadas no método proposto empírico de Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955), pois demanda menor custo e tempo. Assim, emprega-se a Equação (18) para sua mensuração.

$$EP = UPET \cdot N \quad (18)$$

Sendo:

UPET = evapotranspiração potencial diária (mm);

N = Luz solar média mensal (Tabela 4)

- Balanço de Infiltração e Evapotranspiração Potencial (IN - EP)

O balanço de infiltração e evapotranspiração consistiram no cálculo da subtração algébrica entre os valores de água infiltrada e água evaporada da cobertura do aterro sanitário. Caso essa subtração promova um resultado positivo indica-se um acúmulo potencial (capacidade de armazenamento) de água no solo de cobertura, ou seja, o fluxo de água de chuva no meio poroso está mais intenso do que a medida da água evapotranspirada na superfície do solo.

Por outro lado, se o resultado for negativo da Equação do balanço IN – EP, f considerou-se que o solo está secando e, portanto, há saída de água dos vazios do solo de cobertura final, tornando-o com grau de saturação menor.

A perda acumulada de água ( $W_L$ ) ao longo do tempo também foi calculada. O procedimento de cálculo segundo Koerner e Daniel (1997) dar-se-á da seguinte maneira, para o primeiro mês de cálculo:

- a) Se o valor de IN-PET for  $\geq 0$ ,  $W_{L1} = 0$
- b) Se o valor de IN-PET for  $< 0$ , adicione esse valor negativo ao  $W_L$ , ou seja,  $W_{L1} = (I-EP)$ .

Já para o cálculo da perda acumulada de água para os meses subsequentes, o  $WL_{i+1}$  performou-se conforme as equações (19) e (20).

$$(IN - EP) \geq 0, (WL)_i = (WL)_{i-1} \quad (19)$$

$$(IN - EP) < 0, (WL)_i = (WL)_{i-1} + (I - EP)_i \quad (20)$$

- Armazenagem de Água no Solo (WS)

Um perfil de solo natural é dividido basicamente em duas zonas, sendo a primeira chamada de zona não saturada, zona de aeração ou zona vadosa possuidora de poros (macro e microporos) preenchidos parcialmente por gases (ar e vapor d'água) e por água, e está localizada entre a superfície do terreno até a zona freática (Fredlund; Xing, 1994; Koerner; Daniel, 1997). A segunda porção mais imediatamente abaixo da zona freática é denominada de zona saturada.

Portanto, à medida que ocorre a infiltração de água no solo, as camadas superiores ficam mais úmidas, alterando de forma gradativa o perfil de umidade (Broedel, 2012). Esse fluxo impõem as camadas superficiais se tornarem saturadas, e então a água começa a percolar em maiores profundidades. Esse fenômeno é decorrente da existência da diferença de potencial hídrico entre as duas regiões e também da força gravitacional.

A armazenagem de água no solo ou retenção de água no solo, que se dá quando a percolação é cessada, e então os macroporos do solo secam e boa parte da água fica retida nos microporos do solo.

Para o cálculo da armazenagem de água no solo (WS), primeiramente foi determinada a umidade volumétrica do solo ou conteúdo volumétrico ( $\theta$ ), considerando a metodologia proposta por Rossato *et al.* (2004), cujos resultados serviram de base para o cálculo da variação espaço temporal da umidade no solo e em seguida o cálculo de WS.

O cálculo de  $\theta$  foi realizado pelo Método do Papel Filtro (Marinho, 1995), e os dados resultantes serviram para a modelagem baseada na Equação (21) de retenção de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980), dada por:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi^n)]^m} \quad (21)$$

Em que:

$\theta$  = é o conteúdo volumétrico de água ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$  = é o conteúdo de água saturada( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$  = o conteúdo de água residual( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\psi$  = é o potencial matricial (kPa);

$\alpha$  = sucção de entrada de ar ( $\text{kPa}^{-1}$ );

$n$  e  $m$  são os parâmetros empíricos. Van Genuchten (1980) assumiu que  $m = 1 - 1/n$ .

De posse dos resultados da umidade volumétrica de cada solo a ser utilizado na cobertura final de aterro sanitário, a profundidade de alcance máximo das raízes ( $H_{R\text{máx}}$ ) considerada e as condições do balanço  $IN - EP$ , a sequência final de cálculo da água armazenada no solo mensal ( $\Delta WS$ ) foi calculada de acordo com Koerner e Daniel (1997), apresentada na Equação (22):

$$\Delta WS = (WS_i - WS_{i-1}) \quad (22)$$

$\Delta WS$ = Parcela de água retida no solo ao longo do mês (mm).

- Evapotranspiração real mensal (ET)

A evapotranspiração real é a quantidade de água que, em condições ambientais reais, é evaporada dos vazios do solo e transpirada pelas raízes e vegetação (Koerner; Daniel, 1997; Thornthwaite; Mather, 1955). E quanto a evapotranspiração real mensal (ET) é da pelas seguintes condições:

a.  $(IN - EP) \geq 0$  logo,  $ET = EP$

b.  $(IN - EP) < 0$  logo,  $ET = EP + [(IN - EP) - \Delta WS]$

- Fluxo de percolação para a camada inferior (Q)

O fluxo de percolação refere-se à quantidade de água de chuva que atravessa da camada superior para a camada inferior. A percolação só vai existir quando o balanço entre  $IN - EP$  for maior que zero, configurando assim um fluxo em meio poroso. Portanto, Koerner e Daniel (1997) sugerem que o estudo de percolação seja feito mensalmente e conforme as condições abaixo especificadas.

a. Para meses em que  $IN - EP$  for menor ou igual a zero, não há percolação (o volume de água evaporado excede a quantidade de água infiltrada), e adiciona-se 0, Equação (23) (Koerner; Daniel, 1997):

$$PERC = 0, \text{ se } [(IN - EP) \leq 0] \quad (23)$$

b. Para meses em que  $IN - EP$  é maior que zero, o cálculo é dado de acordo com a Equação (24) (Koerner; Daniel, 1997):

$$PERC = (IN - EP) - \Delta WS, \text{ se } [(IN - EP) > 0] \quad (24)$$

Sendo que, a percolação mensal deve ser somada para se obter o valor anual de percolação.

Koerner e Daniel (1997) relembram que o balanço hídrico em escala local leva em consideração toda a precipitação, como no caso de cobertura de aterros sanitários, e por isso os cálculos assim que chegam nesse estágio devem ser checados a cada mês (CK). Essa etapa de checagem deve ser com o uso da Equação (25), e posteriormente realizou-se a conferência com o somatório dos valores mensais (Equação 26) (Koerner; Daniel, 1997):

$$CK (PERC + ET + \Delta WS + R) = P \quad (25)$$

$$\sum CK = \sum P \quad (26)$$

Posteriormente, com a checagem e a verificação dos cálculos mensais do balanço hídrico foram então quantificado o fluxo de percolação médio mensal  $Q$  (em  $m^3/s$ ), conforme a Equação (27) (Koerner; Daniel, 1997):

$$Q = \frac{(PERC \cdot 0,001)}{t} \quad (27)$$

$t = 2.592.000$  é o tempo de um mês em segundos. Caso seja um dia  $t$  será igual a 86400s  
 $PERC$  = percolação em unidades de mm.

### **3.4. ENSAIOS GEOTÉCNICOS**

#### **3.4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA**

Os dois tipos de solo foram caracterizados, de acordo com os procedimentos normatizados pela ABNT e apresentados a seguir. As amostras seguiram as orientações prescritas na Norma Técnica Brasileira (NBR), apresentados a seguir:

- Análise granulométrica para solos (NBR-7181/2016);
- Determinação do limite de liquidez (NBR-6459/2016);
- Determinação do limite de plasticidade (NBR-7180/2016);
- Determinação da massa específica dos grãos (NBR-6508/84);
- Classificação dos solos (SUCS).

#### **3.4.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO**

A compactação de um solo proporciona a redução rápida do índice de vazios por meio de processo mecânico, por meio da expulsão do ar dos vazios, tornando o solo mais resistivo perante uma situação de fluxo de água, o que consequentemente, minimiza a infiltração para as porções inferiores.

Por se tratar do estudo de cobertura final de aterro sanitário, onde se almeja minimizar a infiltração de água de chuva, seja por tornar um solo menos permeável, ou que tenha uma maior capacidade de armazenar a água, ou impor ao sistema hidrológico que ocorram fenômenos como evapotranspiração e escoamento superficial, é primordial que ocorra o estudo da compactação dos solos que irão compor a cobertura de aterro sanitário, para a avaliação de desempenho hidráulico e hidrológico posteriormente.

Para isso, o procedimento a ser efetuado, nesta pesquisa, para os dois solos corresponde ao ensaio de compactação com reuso de material, na Energia Proctor Normal e secagem prévia até a umidade higroscópica, conforme o prescrito na NBR 7182 (ABNT, 2016).

Com os resultados da curva de compactação e a definição do teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima foi possível calcular a massa da amostra (em gramas) e a quantidade de água (em gramas) necessária para a confecção dos corpos de provas na condição ótima para realização dos ensaios de permeabilidade, curva de retenção de água e ensaio de coluna, e também avaliar se os solos a serem empregados devem ser compactados abaixo dos valores máximos

de compactação, de forma a contar com a parcela de armazenagem e maior quantidade de água nos vazios do solo.

### **3.5. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

As identificações mineralógicas dos constituintes do solo foram obtidas por difração de raios-X, no equipamento Miniflex600 da marca Rigaku, e são importantes para auxiliar a análise da capacidade de retenção de água nos solos. Essas análises também foram executadas com objetivo de retenção de água em materiais que compõem coberturas de aterros sanitários em trabalho como Costa (2015), Costa *et al.* (2018), Lopes (2011) e Santos (2015).

As amostras dos solos enviadas para execução da difração do raios-x foram destorroadas, homogeneizadas e passadas na peneira 0,075mm.

A caracterização mineralógica foi realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural localizado no Instituto de Geociências e Engenharias da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa).

### **3.6. ENSAIOS HIDROGEOTÉCNICOS**

A metodologia adotada para mensuração do comportamento do solo mediante ao fluxo de água foi determinada pelo ensaio de permeabilidade (já descrito), e nesta seção apresenta-se os procedimentos para realização ensaio de curva de retenção de água pelo Método do Papel Filtro, proposto por Marinho (1995), e pelo de ensaio de coluna com base nos trabalhos de Vieira (2005), Lewis e Sjostrom (2010), Costa (2015), Cunha *et al.* (2015), Costa *et al.* (2018) e Lira (2018).

#### **3.6.1. CURVA DE RETENÇÃO PELO MÉTODO DE PAPEL FILTRO**

Os materiais naturais que compõem as coberturas finais de aterros sanitários encontram-se a maior parte do tempo em condições não saturadas, por isso é importante se estabelecer técnicas de mensuração de infiltração e armazenagem de água de chuva nas características dos solos ao longo do tempo, dentre essas técnicas destaca-se a curva de retenção de água obtida pelo ensaio de sucção.

As curvas de retenção de água das amostras dos dois solos desta pesquisa foram determinadas pelo processo de secagem (drenagem) e molhagem (umedecimento) pelo Método do Papel Filtro, proposto por Marinho (1995), com a utilização do papel filtro do tipo Whatman nº 42.



Assim como Mendes e Marinho (2020) e Souza (2014), às equações de calibração utilizadas para o papel filtro foram as propostas por Chandler *et al.* (1992), destacadas a seguir:

- Para o teor de umidade do papel filtro  $> 47\%$ , a sucção foi calculada de acordo com a Equação (28), de Chandler *et al.* (1992):

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \cdot \log w)} \quad (28)$$

- Para o teor de umidade do papel filtro  $\leq 47\%$ , a sucção foi calculada de acordo com a Equação (29), de Chandler *et al.* (1992):

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 w)} \quad (29)$$

$w$  = teor de umidade do papel filtro.

Os dados das curvas de retenção foram ajustados por meio de modelos propostos por Van Genuchten (1980) e Mualem (1986), com auxílio computacional do programa RETC.

Com a curva de retenção ajustada para cada solo foram avaliados os padrões de sucção em função da umidade, além de analisar a influência de sucção no comportamento da camada de cobertura final frente à permeabilidade à água.

A escolha do método de papel filtro se motivou pelo aparato de laboratório necessário para realização do ensaio e pelo método possibilitar obter medidas de sucção matricial e total dos solos (Fredlund *et al.*, 2012).

A obtenção da curva de retenção se deu pelo processo de secagem, de acordo com a metodologia da D5298 (ASTM, 2016) e descritas por Lopes (2011), Souza (2014), Costa (2015) e Menéndez (2016) e pelo processo de umedecimento abordado por Marinho (1995), Lopes (2011) e Souza (2014).

O procedimento do ensaio de retenção de água ou sucção foi realizado com amostras de SF e SG compactadas com valores em torno de 80 a 90% da densidade seca aparente máxima, de acordo com recomendações das pesquisas de Albright, Benson, Waugh (2010), Maciel e Jucá (2011) e Stock *et al.* (2020). Recomendam esses valores para maior ganho no percentual de água armazenada e diminuição de escoamento superficial.

A compactação dos corpos de prova (CPs) foi realizada dentro da faixa da umidade ótima, na energia Proctor normal, e do CP extrudado talharam-se CPs destinados ao ensaio de sucção. De cada CP compactado no cilindro Proctor, foram retirados três CPs de solo, com auxílio de anéis de PVC e de aço inox, cada CP apresentou dimensões de 5 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura.

A curva de retenção de água foi formada por doze CPs, almejando-se seis CPs com umidades para o ramo seco (no intervalo da umidade hidrocópica até próximo a  $W_{ótima}$ ), e os outros seis CPs com umidades para ramo úmido (da  $W_{ótima}$  para umidades bem elevada).

Os CPs correspondentes ao ramo seco do ensaio de sucção inicialmente foram expostos ao ar e aqueles que não atingiram as umidades pré-estabelecidas foram secos em estufa com temperatura de 50°C. Os procedimentos adotados foram semelhantes aos de Lopes (2011):

- a. Colocação dos CPs em uma caneleta (PVC) para secagem ao ar até atingir o peso calculado em planilha, tomando-se como referência umidades menores que o teor de umidade ótimo, obedecendo intervalos de pelo menos 1% da umidade anterior medida;
- b. Conforme os CPs atingissem as umidades requeridas, por processo de pesagem, em balança de precisão de resolução de 0,0001g;
- c. Após a secagem eram colocados cuidadosamente três papéis filtros, tipo Whatman nº 42, sobrepostos as faces dos CPs para a determinação da sucção matricial. O primeiro deles colocava-se em contato direto com o CP que pode ser passível de impregnação (por partículas de solo), já o segundo papel filtro, de diâmetro menor, não houve contato direto com o solo e o terceiro, colocado sobre o segundo papel filtro central, que ficou em contato com filme plástico de PVC, utilizado para embalar os CPs. Para determinação da sucção do corpo de prova, leva-se em conta apenas dois papéis filtros mais externos, ou seja, que não têm contato direto com o solo;
- d. a amostra com os papéis filtro foi cuidadosamente embrulhada com várias camadas de filme PVC, e depois foi revestida com papel alumínio e envolta com fita adesiva como proteção final do conjunto;
- e. O conjunto amostra e papel filtro foram armazenados em caixa isolante térmica (do tipo isopor) garantindo-se que os anéis não entrem em contato com a umidade e a luz do ambiente externo, deixando-os em repouso por 7

dias, em laboratório climatizado com temperatura variando entre 21° a 23°C;

- f. após o tempo de repouso, os papéis de cada amostra eram cuidadosamente retirados com uma pinça metálica e imediatamente pesados em balança de precisão de 0,0001g para determinação de peso úmido do papel (esse procedimento deve levar poucos segundos para evitar a perda de umidade do papel por evaporação);
- g. o papel filtro foi então colocado em cápsulas e levados para secagem em estufa a uma temperatura de 40 a 55°C por 4 horas;
- h. após as 4h, o conjunto cápsula e papel filtro seco foram pesados em balança de precisão e determinado o teor de umidade;
- i. para a determinação da umidade do papel filtro e a respectiva sucção do solo utilizaram-se as equações (1) e (2) propostas por Chandler *et al* (1992), citadas anteriormente;
- j. Retirou-se o CP do anel de PVC e partiu-se ao meio; metade do CP serviu para determinar a umidade via estufa e a outra metade determinou-se o volume dos sólidos e densidade por balança hidrostática;
- k. Para cada metade de CP, foi feita a pesagem antes e depois da colocação da parafina, sendo a última pesagem com o CP parafinado e submerso em água.
- l. Determinou-se o volume e densidade para todos os CPs.

Para os CPs acima da umidade, o roteiro das etapas do processo de umedecimento também foi realizado de acordo com Lopes (2011), demonstrado a seguir:

- m. as amostras de solo compactado foram retiradas do cilindro de Proctor, e com auxílio de anéis de inox, com diâmetro de 50 mm e altura de 25 mm;
- n. com auxílio de um conta-gotas efetuou-se a molhagem dos corpos de prova, até atingirem o teor de umidade desejado, para isso foi necessário calcular previamente o volume de água a ser adicionado no umedecimento da amostra.
- o. Para o controle do teor de umidade, foi necessário a pesagem contínua dos corpos de prova;
- p. Foi cessado o umedecimento quando a umidade desejada foi alcançada. Em seguida, os anéis foram colocados em equilíbrio por 24h, envoltos por papel

- filme e papel laminado com identificação externa de cada CP com o nome da amostra, e nome do CP. Os CPs foram posicionados no interior de um isopor, com o objetivo de que ocorresse a homogeneização e estabilização da umidade no interior de cada corpo de prova. Após 24 h, era mensurada novamente a umidade com o método da pesagem em balança de precisão.
- q. A partir daí, formaram-se os conjuntos formados por 3 (três) papéis filtro, similar a etapa do ramo seco. Os dois papéis que não tiveram contato direto com o solo foram usados para determinar a sucção do corpo de prova, pós umedecimento.
  - r. O conjunto amostra e papel filtro em caixa isolante térmica (do tipo isopor) garante que os anéis não entrem em contato com a umidade e a luz do ambiente externo, deixando-os em repouso por 7 dias, em laboratório climatizado com temperatura variando entre 21° a 23°C;
  - s. após o tempo de repouso, os papéis de cada amostra eram cuidadosamente retirados com uma pinça metálica e imediatamente pesados em balança de precisão de 0,0001g para determinação de peso úmido do papel (esse procedimento deve levar poucos segundos para evitar a perda de umidade do papel por evaporação);
  - t. o papel filtro era então colocado em cápsulas e levados para secagem em estufa a uma temperatura de 40 a 55 °C por 4 horas;
  - u. após as 4h, o conjunto cápsula e papel filtro seco foram pesados em balança de precisão e determinado o teor de umidade;
  - v. para a determinação da umidade do papel filtro e a respectiva sucção do solo foram utilizadas as equações (1) e (2) propostas por Chandler *et al* (1992).
  - w. Retirou-se o CP do anel de PVC e partiu ao meio, onde metade do CP serviu para determinar a umidade via estufa e a outra metade realizou-se ensaio de balança hidrostática para determinação do volume dos sólidos e densidade.
  - x. Quanto a balança hidrostática, para cada metade de CP, foi feita a pesagem dele anteriormente a colocação da parafina, e pesou-se novamente após ser parafinado, e por último pesa-se o CP parafinado e submerso em água. Depois mediante a cálculo foi determinado volume e densidade. Esse procedimento foi executado para todos os corpos de prova

Por meio da confecção e ajuste da curva de retenção de água no solo foi realizada a modelagem, com base em modelos já consagrados pela literatura, para estimar o coeficiente de permeabilidade do solo não saturado ( $K_{nsat}$ ). Assim, como no trabalho de Almeida (2011), o estudo também adotou o modelo proposto por Van Genuchten (1980) que aplica a Equação da curva de retenção de água sistematizada com a integral descrita no modelo de Mualem (1986).

Para isso, foi necessária a adoção da hipótese de  $m=1-1/n$  e a partir da integral do modelo de Mualem (1986) para previsão de  $K_{nsat}$ , Van Genuchten (1980) derivou uma expressão analítica para previsão da função permeabilidade não saturada.

O *RETention Curve* (RETC) é um software utilizado para ajustar os parâmetros da curva de retenção de água no solo e pode ser empregado para analisar a retenção de água no solo e as funções de condutividade hidráulica de solos não saturados (Van Genuchten; Leij; Yates, 1991). O software permite que se encaixem funções analíticas simultaneamente aos dados observados de retenção de água e dados de condutividade hidráulica do solo (Van Genuchten; Leij; Yates, 1991).

O software RETC recomenda a inclusão de dados que são considerados de entrada como a granulometria dos solos, separadas nas frações de areia, silte e argila (em percentuais) e o peso específico dos grãos. Esses dados servem para prever os parâmetros de ajustes das curvas conhecidos como  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ , e  $k_s$  que é a condutividade hidráulica saturada estimada via curva de retenção de água.

Dentro do software RETC, foram incluídos os resultados obtidos do ensaio de sucção com papel filtro, como umidade volumétrica e resultados de sucção, em kPa, dos solos SF e SG. Posteriormente a inclusão dos resultados do ensaio de sucção e dados complementares de ajuste das curvas de retenção como já mencionado, o software RETC performa em linguagem C, os gráficos com abordagem da sucção com umidade volumétricas e demais gráficos pertinentes de análise sobre água no solo.

### 3.6.2. ENSAIO DE COLUNA COM SENSORES DE UMIDADE

Nesta seção encontram-se os materiais, montagem e procedimento de execução do ensaio de coluna e instrumentação composta por sensores de umidade;

bem como os dados empregados como parâmetros de entrada de chuva e quais resultantes se almejou em obter do referido ensaio.

No artigo de revisão sistemática da literatura sobre os tipos de ensaio de coluna, Lewis *et al.* (2010) destacam que historicamente o solo do interior das colunas está em regime não saturado, e geralmente em campo as colunas são chamadas de lisímetros, que são instrumentos utilizados até hoje em aterros sanitários para acompanhamento da infiltração de água de chuva em toda seção transversal das células. Portanto, os autores legitimam a execução desse ensaio e destacam como uma grande vantagem das colunas de solo compactado a sua reprodutibilidade.

A justificativa desse ensaio nesta pesquisa foi motivada por perceber que em campo, após a execução da cobertura final de um aterro sanitário, em que somente a água infiltrada, que passa pelos vazios, ou seja, a parcela de água percolada é que entrará em contato com os RSU, sendo essa água responsável pela maior geração do lixiviado, e essa simulação física é viável de executar via ensaio de coluna.

#### 3.6.2.1. *Preparação de Amostras*

A matéria prima das colunas foi em policloreto de polivinila (PVC), que foi o mesmo material utilizados nas colunas dos ensaios realizados em pesquisas desenvolvidas por Vieira (2005), Oliveira e Marinho (2007), Costa (2015; 2018), Lira (2017), Lopes (2011), com diferença nas dimensões das colunas.

O segmento das colunas foi confeccionado com dimensões de 100 mm para o diâmetro interno, de 150 mm de altura e 50 mm de altura do CAP utilizado na base da coluna. A montagem das colunas foi executada na sequência a seguir:

1. Fez-se um orifício com auxílio de estilete no centro do cap para drenagem inferior;
2. Acoplou-se o cap na base da coluna de PVC;
3. Colocaram-se 500g de pedrisco para colocação e ocupação total da região do CAP;
4. Inclusão de geotêxtil não tecido de separação acima pedrisco, para evitar o carreamento de solo para o pedrisco;
5. Solo compactado na energia Proctor Normal, seguindo todos os procedimentos prescritos pela NBR 7182 (ABNT, 2016), só com a diferença de ser compactado já no interior da coluna de PVC. Um detalhe

importante é que a quantidade de solo por camada foi calculada com base em equações de índices físicos e testes preliminares, para que fosse possível incluir a instrumentação com sensores imediatamente sobre a camada compactada. Como esses sensores são onerosos financeiramente, foi produzido um artefato auxiliar que foi introduzido anteriormente ao sensor, que assim como o pesquisador e autor de trabalho Vieira (2005), denominamos de trado. A vantagem de usar o trado anteriormente aos sensores que são onerosos, é que ele que receberá o impacto durante os golpes de compactação e ao mesmo tempo como eles tem um diâmetro um pouco inferior ao sensor, ele abre o caminho justo para introdução dos sensores pós aplicação da energia de compactação. Preservando assim os sensores, e também impondo um ajuste técnico fino que permite uma adesão condizente entre o solo e as hastes dos sensores.

6. Realizou-se a compactação da primeira camada de solo e após isso houve a inclusão do trado do sensor situado a 12,5 cm do topo da coluna, após isso executou-se a compactação da segunda camada compactada e novamente a inclusão do trado agora do sensor localizado a 7,5 cm do topo e pôr fim a compactação da terceira última camada compactada no interior da coluna de PVC.
7. Retirada manual dos trados auxiliares e inclusão dos sensores de umidade do tipo Teros 10. Como essa pesquisa estudou dois tipos de cobertura CONV e BARCAP, para o primeiro tipo de cobertura os dois sensores ficaram aderidos ao solo SF, e no caso da coluna que era composta pela cobertura BARCAP, o sensor localizado a 12,5 cm do topo, ou seja, mais próxima a base estava inserido no solo SG, enquanto que o sensor de umidade localizado a 7,5 cm estava aderido ao SF.
8. Até o início do ensaio de coluna com a inclusão de lâmina de água no topo, as colunas eram fechadas com papel filme e colocadas em caixa de isopor para garantir a umidade de compactação. Não ultrapassou de 24h da montagem ao início do ensaio de coluna.
9. Anteriormente a execução do ensaio era feita a pesagem das colunas com todos os componentes em balança, com resolução 0,1g e anotado.

O ensaio de coluna permitiu a incorporação de uma lâmina de água equivalente ao volume precipitado na região de Marabá-PA, por meio do cálculo

de médias de precipitações, obtidas das estações pluviométricas da ANA e INMET e a medição de umidade do solo ao longo da sua espessura por meio de sensores de umidade, instalados em vários pontos do corpo de prova.

A montagem das colunas está presente na Figura 29.

Figura 29. Montagem das colunas.



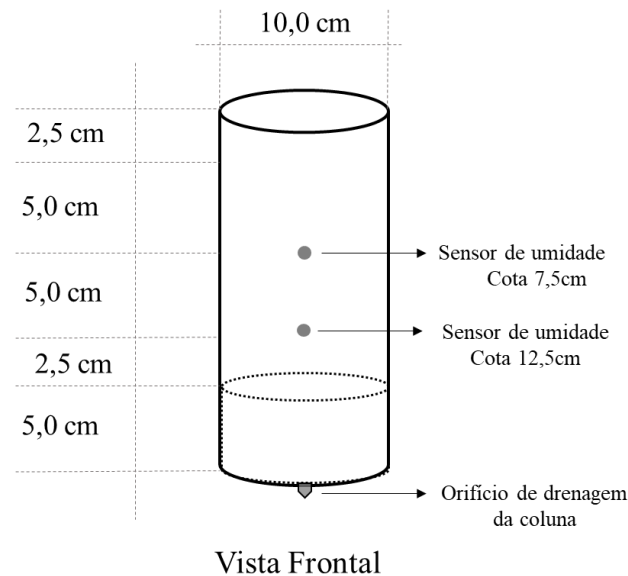
Fonte: Autora (2023)

Na Figura 30 consta-se um desenho esquemático da coluna com a posição dos sensores de umidade e na Figura 31 contemplam-se as dimensões do trado que foi



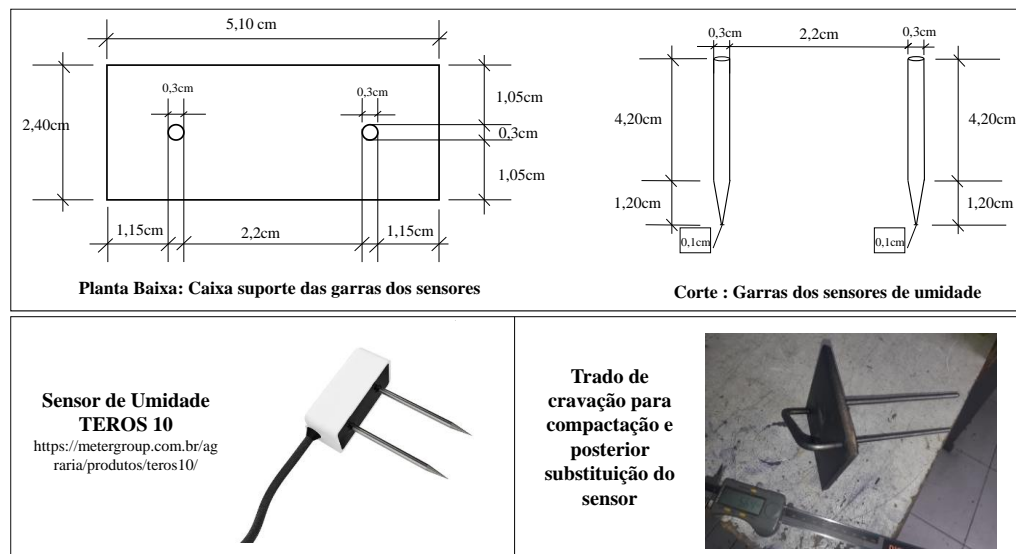
utilizado como artefato na calibração dos sensores e compactação dos solos nas colunas, com intuito de não danificar os sensores de umidade com a compactação.

Figura 30. Desenho esquemático das colunas 1 e 2, medidas em milímetros.



Fonte: Autora (2023).

Figura 31. Detalhe do trado e suas dimensões.



Fonte: Autora (2023).

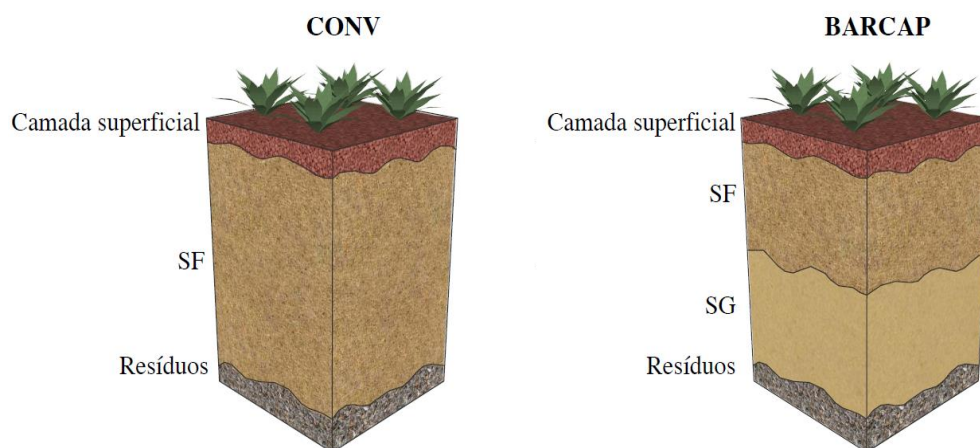
As colunas de PVC já apresentavam com furos de esperas para inclusão dos sensores nos corpos de provas, durante a compactação dos solos. Esses furos são compatíveis com a geometria dos sensores encontravam-se a 7,50 cm do topo da coluna e a 12,50 cm do topo da coluna, de forma a distar 5cm de cota entre os sensores em cada coluna. Na Figura 31 apresentam-se detalhes do sensor de

umidade e do trado feito para inclusão na coluna anteriormente ao sensor, de forma a não danificar durante a compactação dos solos.

O ensaio de coluna foi realizado com os solos SF e SG, sendo a coluna 1, formada pela CONV com SF compactado e a coluna 2 composta pelo BARCAP, com os SF e o SG compactados (Figura 32).

Em relação a compactação do solo no interior das colunas, os valores de grau de compactação foram aproximadamente de 80 a 90%, de acordo com recomendações das pesquisas de Albright, Benson, Waugh (2010), Maciel e Jucá (2011) e Stock *et al.* (2020), ambas voltadas para estudos de infiltração ou balanço hídrico em coberturas finais de aterros sanitários.

Figura 32. Esquema dos perfis das coberturas finais tipo CONV e BARCAP



Fonte: Autora (2023).

#### 3.6.2.2. Calibração dos sensores

De acordo com Vieira (2005), Mendes e Marinho (2020) para a execução da calibração dos sensores de umidades é necessário que as amostras sejam preparadas de forma semelhante as que seriam submetidas aos ensaios de coluna, com variabilidade em sua umidade de moldagem e compactação no interior das colunas. Na pesquisa, almejou-se retratar a resposta do sensor em conteúdo volumétrico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ), potencial elétrico (milivolts), e dados processados para CPs com umidades diferentes.

A calibração dos sensores foi o Teros 10 da empresa Meter Group realizada para os dois tipos de solos utilizados nesta pesquisa, e contou-se com 4 sensores de

umidade identificados como S2, S3, S4 e S5, sendo os dois primeiros para a coluna da cobertura tipo CONV e os dois últimos para a coluna da cobertura BARCAP.

O cálculo do incremento de água e sua umidade ( $w$ ) correspondente foi baseado em equações de índices físicos para atingir a umidade requerida (Equação 30) e a quantidade de solo ( $P$ ) para ocupar um volume conhecido (Equações 31 e 32), pois almejava-se que o SF atingisse um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) acima de 16 kN/m<sup>3</sup>, um grau de compactação (GC) entre 80 a 90% e índice de vazios ( $e$ ) 0,5. Já para o SG, buscava-se o mesmo índice de vazios de 0,5,  $\gamma_d$  acima de 17,5 kN/m<sup>3</sup>, para 80% < GC < 90%. Todas as equações mencionadas estão presentes no livro clássico de Sousa Pinto (2016).

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \left(\frac{w}{100}\right)} \quad (30)$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (31)$$

Sendo que,

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (32)$$

Onde:

$\gamma_d$  = Peso específico seco aparente (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma$  = Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)

$w$  = umidade do corpo de prova (%)

$\gamma_s$  = Peso específico dos grãos (kN/m<sup>3</sup>)

$P$  = Peso do solo (g)

$V$  = Volume do solo (m<sup>3</sup>)

Para cada amostra foi definido teor de umidade pré-determinado e contemplando um intervalo de uma umidade mais seca até valores acima da umidade ótima, e com base no incremento de água a partir da umidade higroscópica de cada solo estudado (Tabela 6 e Tabela 7).

Tabela 6. Índices físicos do SF para calibração dos sensores de umidade.

Dados/ CPs	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	27,1	27,1	27,1	27,1	27,1
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,9	18,4	19,1	19,7	19,8
$W_{\text{moldagem}}$ (%)	9,33%	12,82%	17,76%	21,21%	24,32%
$\gamma_{\text{moldagem}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,4	16,3	16,2	16,3	15,9
$\gamma_{\text{dmáx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
e	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
GC (%)	83	83	82	83	81
S (%)	38,74	52,72	71,75	86,42	93,63

$\gamma_s$ : Peso específico dos sólidos;  $\gamma$ : peso específico;  $W_{\text{moldagem}}$ : umidade de moldagem;  $\gamma_{\text{d moldagem}}$ : peso específico aparente seco de moldagem;  $\gamma_{\text{dmáx}}$ : peso específico aparente seco máximo; e: índice de vazios; GC: grau de compactação; S: saturação

Fonte: Autora (2023).

Tabela 7. Índices físicos do SG para calibração dos sensores de umidade.

Dados/ CPs	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,2	19,1	20,1	20,6	21,2
$W_{\text{moldagem}}$ (%)	4,00%	8,41%	11,71%	13,46%	16,30%
$\gamma_{\text{d moldagem}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,5	17,6	18,0	18,2	18,2
$\gamma_{\text{dmáx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3
e	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
GC (%)	86	87	89	90	90
S (%)	20,70	44,48	65,88	78,71	95,73

$\gamma_s$ : Peso específico dos sólidos;  $\gamma$ : peso específico;  $W_{\text{moldagem}}$ : umidade de moldagem;  $\gamma_{\text{d moldagem}}$ : peso específico aparente seco de moldagem;  $\gamma_{\text{dmáx}}$ : peso específico aparente seco máximo; e: índice de vazios; GC: grau de compactação; S: saturação

Fonte: Autora (2023).

A preparação da amostra iniciou-se com a confecção da coluna em material PVC, com diâmetro 100 mm e altura 160 mm, e na base foi fixado um CAP com um furo central para passagem da água. Na lateral foram abertos dois orifícios para instalação dos sensores, sendo um mais próximo da base e o outro na parte superior da coluna, conforme a Figura 29.

O solo das camadas foi compactado de acordo com a NBR 7182/2016, onde aplicou-se 26 golpes em cada uma das três camadas no interior da coluna de PVC, muito semelhante as dimensões do cilindro pequeno de Proctor Normal.

As três camadas no interior da coluna foram depositadas em termos de peso de solo, sendo a primeira camada de aproximadamente 600 g, ficando o topo deste

próximo ao local do sensor da base. Em seguida, a segunda camada de solo, que dependendo da umidade variou de 800 g a 900 g, executando-se mais 26 golpes. Neste ponto foi colocado o outro trado, similar ao primeiro. Por último lançava-se a terceira camada de solo com peso aproximado de 600 g e aplicava-se os últimos 26 golpes. Acima do topo do solo, ainda restava 3 cm de coluna de PVC (espaço vazio para colocação do chuveiro durante o ensaio de coluna relatado a seguir).

Todos os pesos de cada material, altura das camadas e volume ocupado era rotineiramente monitorados para o controle do índice de vazios de cada CP.

Finalizada a compactação, o conjunto era pesado em balança com resolução de 0,1g e anotado seu peso, e descontado a tara do conjunto formado por pedrisco, geotêxtil, trados e coluna previamente já mensurados. Confirmados os índices físicos,  $\gamma$ ,  $\gamma_d$ , índice de vazios, então iniciava-se a calibração dos sensores de umidade Teros 10.

A calibração dos sensores de umidade se deu da seguinte forma: primeiramente os sensores eram higienizados com álcool isopropílico para eliminar qualquer impureza; retiravam-se os dois trados e então eram colocados os dois sensores nos mesmos locais, um 7,5 cm do topo da coluna e outro a 7,5 cm da mesma referência. Os sensores eram ligados a um *datalogger* da mesma empresa Meter, e esse *logger* era então ligado a um computador por meio de um cabo USB para comunicação.

Essa comunicação dos dados entre o sensor e computador foi realizada via software da própria empresa, que permitia leituras imediatas de conteúdo volumétrico de água, potencial elétrico e dados processados.

Para isso, deixava-se estabilizar e realizava-se leitura das grandezas citadas anteriormente, e posteriormente trocava-se os sensores de lugares e sempre com a limpeza com álcool isopropílico. Isso foi realizado para os quatro sensores de umidade S2, S3, S4 e S5, calibrados para os dois tipos de solos desta pesquisa.

O processo de calibração dos sensores foi realizado separadamente para cada um dos sensores, para cada solo e com cinco umidades diferentes, nas próprias colunas. No total foram calibrados 4 sensores e todos foram utilizados nesta pesquisa. Os sensores S2 e S3 foram aplicados somente na coluna CONV, composto integralmente pelo solo SF, enquanto os sensores S4 e S5 ficaram acoplados na coluna BARCAP, sendo o sensor S4 no solo SF e o S5 no solo SG.

Na Tabela 8 observam-se os valores de umidades gravimétricas (estufa) para comparação e aferição dos sensores de umidade, utilizadas em cada para SF e SG.

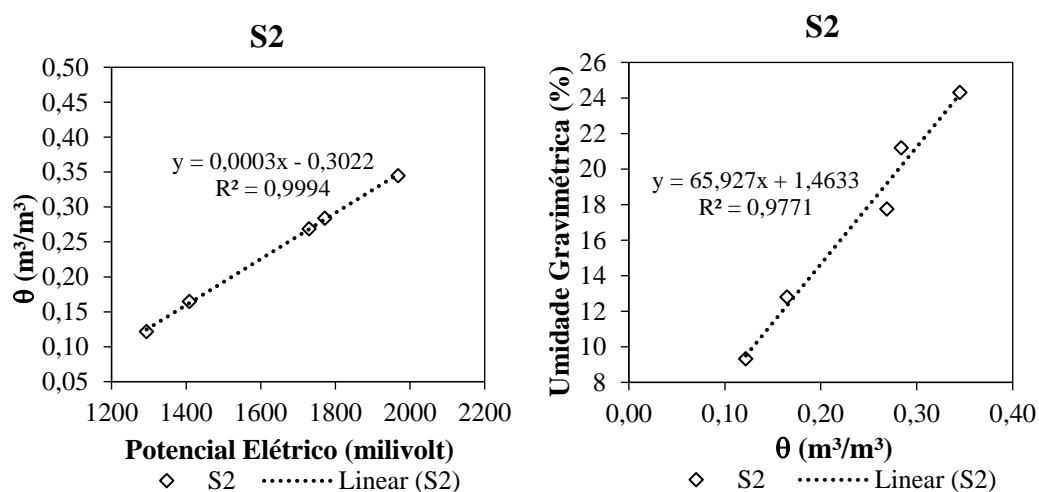
Tabela 8. Umidades dos corpos de provas para calibração dos quatro sensores

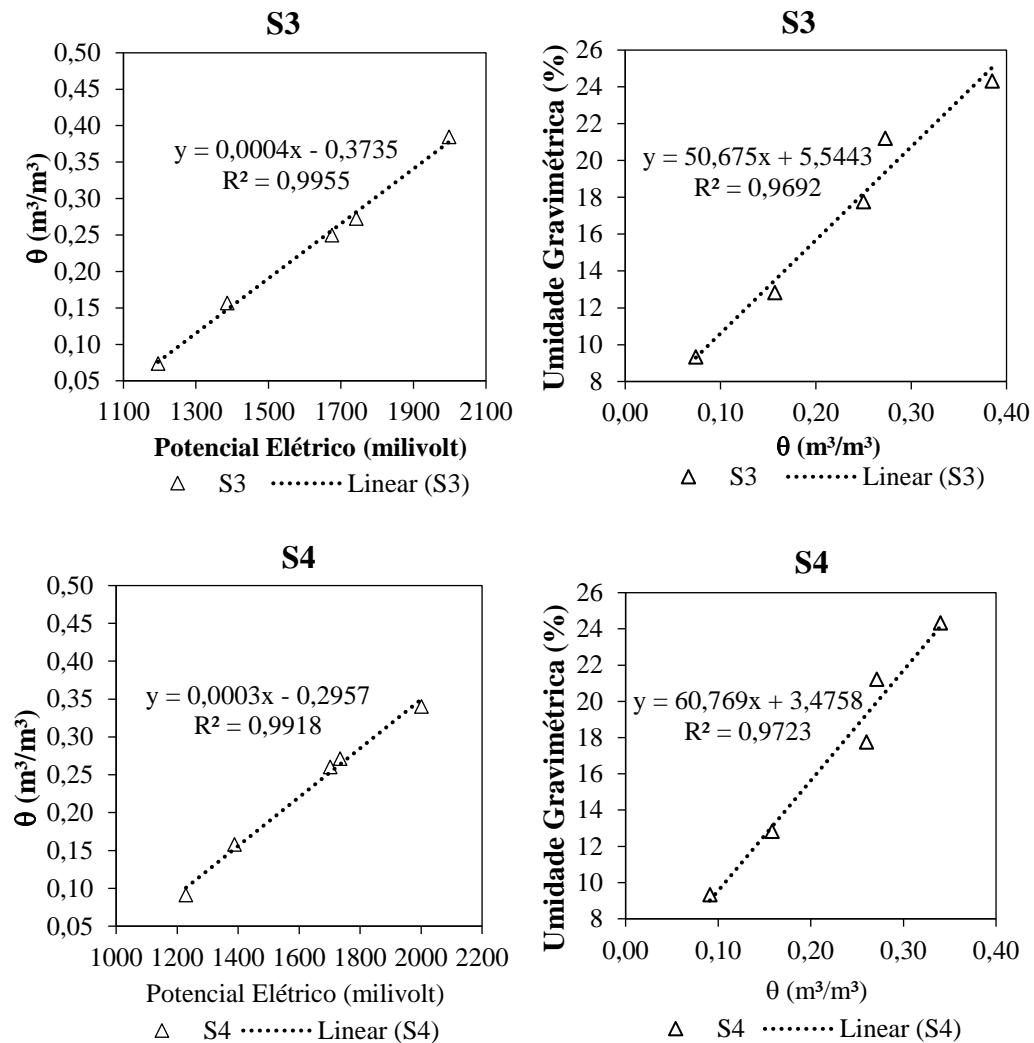
Amostra SF	Umidade gravimétrica Estufa (%)	Amostra SG	Umidade gravimétrica Estufa (%)
S2, S3 e S4	9,33	S5	4,0
	12,82		8,41
	17,76		11,71
	21,21		13,46
	24,32		16,30

Fonte: Autora (2023).

Nas Figura 33 e Figura 34 apresentam-se calibração dos sensores de umidade utilizados no solo SF e SG, respectivamente.

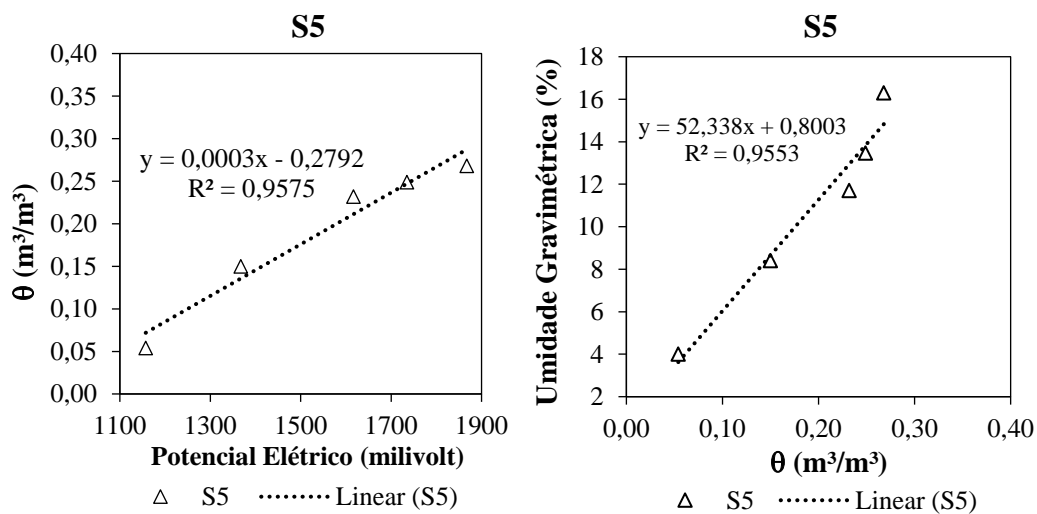
Figura 33. Curvas de calibração dos sensores S2, S3 e S4 aplicados para o solo SF.





Fonte: Autora (2023).

Figura 34. Curvas de calibração dos sensores S5 aplicados para o solo SG.



Fonte: Autora (2023).

Destaca-se que o menor coeficiente de determinação  $R^2$  encontrado foi do S5. As curvas de calibração dos sensores de umidade geralmente são expressas em termos de conteúdo volumétrico de água,  $\theta_w$ , *versus* potencial elétrico, mV, onde o fabricante dos sensores utilizados (Decagon Devices, 2008; Mendes, 2019) recomendam:  $\theta_w = 0,00085mV - 0,4810 [L^3L^{-3}]$ , para qualquer solo (genérico).

#### 3.6.2.3. Fluxo de Água nas Colunas

A metodologia da infiltração de água de chuva nos solos do interior das duas colunas foi baseada em trabalhos consagrados na área como Vieira (2004), Costa (2015; 2018) e Lira (2018), que se configura no fluxo de água descendente correspondente a lâmina de precipitação pluviométrica, em mm, de Marabá-PA.

Para determinar a lâmina de chuva imposta ao ensaio de coluna foi realizado um levantamento de série histórica da região de Marabá em plataformas oficiais de clima como o INMET e ANA. Esses cálculos estão descritos detalhadamente na seção 3.3 Estudos Hidrológicos.

Investigou-se quais lâminas de chuva em mm, são mais prováveis de acontecer no mês que tem a maior média de chuva para também ser um dado importante na hora de simular fisicamente o ensaio de coluna. Para obtenção desses dados utilizou-se a ferramenta Xlstart que funciona dentro software Excel.

Determinou-se para cada mês qual o espaçamento de dias que chove e que não chove, para isso utilizou-se o comando Formatação Condicional presente no menu da planilha Excel. Também se verificaram as diferenças do espaçamento de com chuva e sem chuva ao longo dos anos, e inclusive como se dá esse comportamento de chuva para cada mês ao longo período estabelecido. O intuito foi verificar por exemplo, se na primeira quinzena chove mais dias ou menos dias comparada à segunda quinzena de cada mês estudado.

O primeiro fluxo de água nas colunas foi realizado simulando uma chuva máxima ocorrida no mês mais chuvoso com uma lâmina de 86 mm (675 ml para área da coluna de 0,0079 m<sup>2</sup>) ao longo de um dia (distribuída em 24 h). Foi precipitada uma quantidade de água nas colunas, havendo o cuidado de controlar o volume de chuva por meio de um reservatório graduado e de uma bomba peristáltica, modelo Legrand 913234. Essa bomba permitia fluxo contínuo do volume a ser precipitado.



A sequência de lançamento do volume equivalente a 86 mm foi baseada na altura livre dentro da coluna, entre o topo do solo e o topo da coluna, de forma que ao impor a frente de precipitação na coluna não houvesse extravasamento e perda de água na parte superior da coluna. E, portanto, percebeu-se que o lançamento de água nas colunas não poderia ultrapassar volume superior ao equivalente a precipitação de 20 mm. As lâminas impostas nas colunas foram executadas nesta sequência 10 mm, 10 mm, 10 mm, 10 mm, 10mm, 20 mm e 16 mm. Só se lançava a sequência seguinte no momento posterior a infiltração total da lâmina situada sobre o solo da cobertura.

Além da infiltração da lâmina equivalente a precipitação de 86 mm, foi executado o ensaio de coluna com fluxo de lâmina de água de chuva (5 ciclos de 10 mm) de maior frequência de ocorrência no município por 5 dias, e por último a infiltração de lâmina equivalente a segunda maior frequência (5 ciclos de 20 mm).

Para que ocorresse o umedecimento de forma gradual e equacionada em todo o topo da camada de solo, foi utilizado um chuveiro de 100 mm de diâmetro para simular a chuva, e esse alimentado por um reservatório superior contendo água, semelhante ao esquema desenvolvido por Costa (2015), apresentado na Figura 35 .

Figura 35. Sistema de umedecimento das colunas.



Fonte: Autora (2023)

Durante a simulação física da chuva diária, foram realizadas as observações periódicas do comportamento dos materiais quanto a retenção de água.

Simultaneamente ocorria a mensuração do teor de umidade, através dos sensores de umidade que estavam acopladas as colunas, e com intervalo de leituras de umidade a cada 1 min, e depois das 4 primeiras horas de ensaio espaçava-se para 30 min.

Durante todo o ensaio de coluna além da umidade do material, também se registravam o tempo de precipitação pluviométrica por espessura de lâmina, a altura de lâmina após toda água precipitada com auxílio de paquímetro universal, e o instante do início da percolação de água pelo CP.

Verificou-se o tempo necessário que água infiltra em toda a camada de solo e mensurada a quantidade água que chegariam aos RSU com auxílio de uma balança com resolução 0,1 g, para a composição do balanço hídrico. O sistema de ensaio de coluna não permite e/ou não mensura evaporação e escoamento superficial.

A quantificação da água de chuva contributiva para a geração de lixiviado foi inferida ao impor uma lâmina de água (referente a parcela de precipitação) na parte superior do solo localizado no interior da coluna, o que permitiu verificar a parcela de água infiltrada do topo à base da(s) camada(s) de solo(s) que forma(m) a suposta cobertura final do aterro sanitário.

Essa quantificação da água de chuva contributiva para a geração de lixiviado, serviu para a composição do balanço hídrico, de modo a se ter o valor de entrada como a lâmina a ser precipitada, o volume infiltrado, o volume armazenado nos vazios do solo e o que foi percolado para parte inferior da cobertura.

De forma experimental com a execução do ensaio de coluna foi possível quantificar alguns termos que compõem o balanço hídrico como o dado de entrada que trata do volume de água precipitada, o volume de água armazenada no solo de cobertura e o volume percolado para o inferior da cobertura, onde havia um Becker de plástico milimetrado.

Identificou-se uma dificuldade de contabilizar o volume perdido por evapotranspiração em laboratório por falta de equipamentos apropriados e o volume perdido pelo escoamento superficial por se tratar de uma coluna sem drenagem superficial, esses dois componentes não foram usados durante o ensaio, mas entende ser parcelas importantes nos cálculos do balanço hídrico. Porém, admite-se que isso foi uma escolha a favor da segurança na hora de avaliar o desempenho da cobertura.

A quantificação de volume de água equivalente a lâmina de chuva ao ser inserida nas colunas foi baseada na metodologia adotada por Costa *et al.* (2018),

dadas as devidas proporções das dimensões das colunas, já que a utilizada nesta pesquisa o diâmetro e altura são inferiores ao do autor.

#### 3.6.2.4. Medição de Umidade nas Colunas

As medidas e leituras de umidade durante a execução do ensaio de coluna é peça fundamental no contexto de se entender o comportamento dos solos mediante a fluxo de água. Por isso, no tempo zero, na iminência de se iniciar o ensaio de coluna era lida a umidade inicial do solo e reservado em planilha eletrônica. Para leitura da umidade utilizou-se o software ECH20 da Meter Group, que é um registrador de dados de umidades compatível ao *datallogger* empregado.

Para realização dessa leitura é necessário conectar o cabo de transmissão de dados que está plugado no *datallogger*, e nesse mesmo dispositivo estão os cabos dos sensores que estão aderidos ao solo a ser ensaiado. Então ao clicar na barra de ferramenta *Scan* é aberta uma janela de diálogo onde aparecem de maneira simultânea as condições de umidade, podendo ser em umidade volumétrica, potencial elétrico e dados processados. Esse mesmo procedimento foi realizado para todos os inícios e/ou retomadas de ensaio de coluna.

Após isso era então definido no mesmo software ECH20 dos sensores de umidade, o intervalo de leitura de umidade feitas automaticamente com os sensores, definido para maior precisão de 1 em 1 min nas primeiras horas de ensaios e posteriormente aumentava-se para 30 a 30 min. Em seguida, o cabo de transmissão de dados era desconectado e o ensaio se iniciava para uma duração de 24 horas de simulação de chuva na coluna.

Após 24 horas, conectava-se o conjunto citado acima ao computador e coletavam-se todos os resultados de umidades, acionando o comando no ECH20, data, download new data, e então era salvo em pasta no computador. Posteriormente ao download, retomava-se o intervalo de leitura de 1 minuto, confirmavam-se as informações de dados iniciais da amostra para o novo ensaio a ser executado.

Com todos os dados organizado em planilhas eletrônicas, confeccionaram-se os gráficos de tempo (hora em hora outras em dias) versus umidade gravimétrica. Optou-se em trabalhar com a umidade gravimétrica por ser mais simples de correlacionar com a umidade ótima e fazer correlações.

Simultaneamente a execução do ensaio de coluna, com o mesmo aparato, também foi possível aferir a permeabilidade dos dois tipos de sistemas de cobertura

a CONV e BARCAP, de acordo com as premissas de ensaio de permeabilidade tipo carga variável, conforme pode ser visto no tem 3.6.3.

### 3.6.3. ENSAIO DE PERMEABILIDA VIA ENSAIO DE COLUNA

O estudo da condutividade hidráulica dos materiais corresponde a intensidade do fluxo de água no interior dos vazios do meio poroso (Marque *et al.*, 2008), além de permitir a avaliação da maior facilidade ou dificuldade do fluxo e infiltração de água no solo.

O ensaio de permeabilidade é baseado na Lei de Darcy, segundo a qual as velocidades de fluxo são diretamente proporcionais aos gradientes hidráulicos. Partindo desse pressuposto, é admitido que o escoamento ocorre de maneira contínua, o volume do solo não varia e o corpo de prova satura-se por completo.

O ensaio é normatizado pela NBR 14545 (ABNT, 2000) e possui dois métodos para sua execução, métodos A e B, de modo que a escolha do método a se utilizar depende da disponibilidade de equipamentos. Porém, nesta pesquisa utilizou-se o próprio aparato do ensaio de coluna, para determinação da permeabilidade das duas coberturas (CONV e BARCAP). Os CPs tinham formato cilíndrico, com medidas de  $L = 16$  cm,  $\phi = 10$  cm e  $A = 78,54$  cm<sup>2</sup>.

Para que o fluxo de água passe integralmente pelo corpo de prova de solo, o roteiro de montagem do corpo de prova (CP) no cilindro de PVC seguiu a sequência descrita na NBR 14545 (ABNT, 2000):

Com a montagem finalizada, o ensaio foi iniciado e a cada variação de água nas colunas eram aferidos valores de coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), no total de 10 medições, sendo determinados pela Equação de Darcy (Equação 33), presente na obra de Sousa Pinto (2016).

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log \frac{h_f}{h_i} \quad (33)$$

Sendo:

$k$  = Coeficiente de permeabilidade do solo (L T<sup>-1</sup>)

$a$  = Área da bureta (L<sup>2</sup>)

$L$  = Distância ao longo da qual a carga se dissipa (L)

$A$  = Área do permeâmetro (L<sup>2</sup>)

$t$ =Instante qualquer para sair do ponto  $h_i$  e chegar em  $h_f$  (T)

$h_f$ = Altura final da água na bureta (L)

$h_i$ = Altura inicial da água na bureta (L)

Após o tratamento estatístico dos dados foram plotados gráficos relacionando a permeabilidade com o tempo para cada um dos sistemas de cobertura.

### 3.7. DESEMPENHO DAS COBERTURAS

A quantidade de infiltração de água é um dos principais parâmetros utilizados para quantificar o desempenho em um sistema de cobertura (Perotti *et al.*, 2022) e a essa infiltração depende tipo de solo usado, espessura de cada camada, comportamento hidráulico do solo e condições climáticas locais (Albridht; Benson; Apiwantragoon, 2013; Stock *et al.*, 2020).

Em se tratando de Amazônia, as condições climáticas locais têm bastante interferência nas coberturas construídas como forma de minimizar as infiltrações de água de chuva para o interior dos RSU.

O objetivo principal desta pesquisa é a avaliar a influência do balanço hídrico no comportamento de dois sistemas cobertura final de aterro sanitários foram realizadas análises detalhadas quanto as condições climáticas locais, características geotécnicas e hidráulicas para comparação do desempenho dessas coberturas.

O desenvolvimento do balanço hídrico possibilitou comparar o desempenho hidrológico das coberturas finais, tipo CONV e BARCAP, quando submetidas aos padrões de chuvas de um município da região da Amazônia, onde se considerou a cobertura final mais eficiente àquela que minimizar o potencial de infiltração e consequente menor geração de volume de lixiviado. Esse quesito de desempenho e eficiência foi adotado nas pesquisas de São Matheus *et al.* (2012), Alsiaibi *et al.* (2013), Zhang e Sun (2014); Costa *et al.* (2018); Stock *et al.* (2020).

Para a mensuração da água da percolação proveniente da precipitação pluviométrica nos dois tipos de cobertura em estudo, foi considerado o pior cenário de condições climáticas com a média e máxima quantidades de infiltração, mensal e diária.

#### **4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Nesta seção, os resultados estão apresentados, analisados e discutidos de forma a responder individualmente cada objetivo específico nesta pesquisa.

**Resultados do objetivo específico a): quantificar cada componente do balanço hídrico climatológico, especialmente a parcela de percolação introduzida na cobertura final de um aterro sanitário.**

---

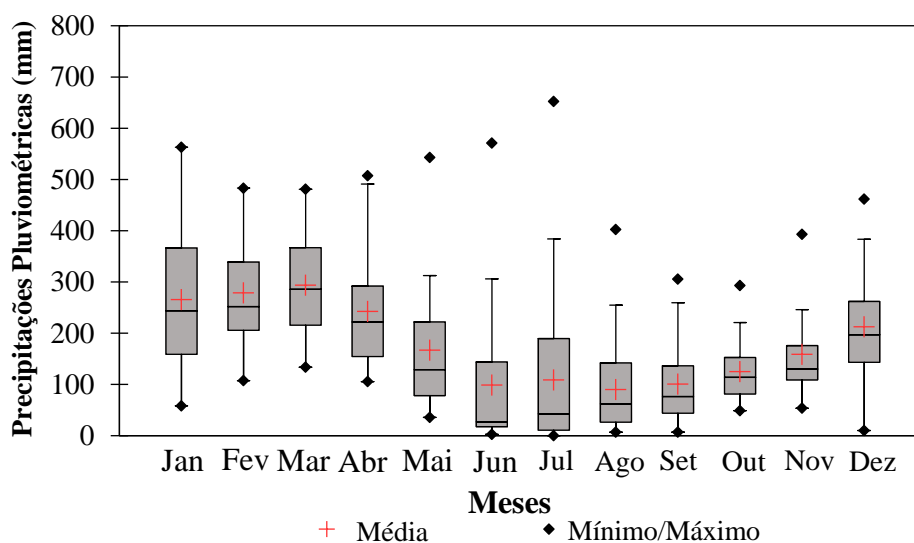
#### 4.1. ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Para responder questões relacionadas a influência do balanço hídrico em cobertura final de aterros sanitários foi necessário conhecer as variáveis climáticas da região da área de estudo situada no município de Marabá-PA. Os dados de precipitação pluviométrica, variabilidade temporal e lâmina de água chuva também serviram como dados de entrada para o ensaio de coluna.

Os dados atmosféricos foram obtidos por meio dos sites dos órgãos federais ANA (chuvas C 00549002 e clima C 00549002) e INMET (convencional 82562) e realizado o preenchimento de falha por regressão linear, onde os valores de precipitação pluviométricas da estação do INMET foram consideradas variáveis independentes. Após execução da regressão linear, o valor encontrado de  $r^2$  foi de 0,876, cerca de 87,6% da variação dos dados do modelo utilizado pela regressão linear são relacionadas com as variáveis independentes.

Os primeiros resultados obtidos foram relativos à estatística descritiva das precipitações pluviométricas e temperatura, baseado em série histórica de 30 anos, entre os anos de 1991 e 2020. Na Figura 36 apresentam-se os resultados da média, máximos e mínimos da precipitação pluviométrica mensal (PPM), de Marabá-PA.

Figura 36. Box plot da média PPM, entre 1991 a 2020.



De acordo com a Figura 36, percebeu-se que o mês com a maior média mensal de precipitação pluviométrica é o mês de março com 293,65 mm e com menor média mensal é agosto com 90,13 mm ao longo de 30 anos de dados pluviométricos. Observou-se que a precipitação pluviométrica mínima do mês de março é superior à média dos meses de maior estiagem, que vai de junho a novembro, com exceção da média do último mês mencionado.

Em relação a variabilidade temporal ao longo dos 30 anos dos dados hidrológicos pesquisados, os meses que apresentaram maior intervalo dos valores de precipitações pluviométricas foram os meses de janeiro e julho. No caso do mês de janeiro, as precipitações pluviométricas ficaram entre 158 mm e 366 mm (50%) e julho variando de 10 mm a 189 mm (50%).

Destaca-se no gráfico box plot o mês de março, que apresentou o primeiro quartil (Q1) correspondente ao valor de 215,5 mm, sendo que 25% dos valores das precipitações pluviométricas mensais ocorridas foram menores (25%) e 75%, maiores. Já o segundo quartil (Q2), equivalente a mediana, no qual foi de 285,9 mm, em que 50% dos valores de precipitações pluviométricas foram menores, e outros 50% maiores. Por fim, constatou-se no terceiro quartil (Q3), que se igualou a 367,1 mm, sendo que 75% dos valores da precipitação foram menores(Q3). Os meses de março e agostos foram destacados por serem meses com maior média de chuva mensal e menor média mensal de chuva, respectivamente.

O mês de agosto que foi o de menor média mensal de precipitação pluviométrica. No gráfico box plot o mês de agosto, apresentou o Q1 correspondente ao valor de 10,5 mm, sendo que 25% dos valores das precipitações pluviométricas mensais ocorridas são menores (25%) e 75%, maiores. Já o Q2, equivalente a mediana, foi de 62,05 mm, em que 50% dos valores de precipitações pluviométricas foram menores que o mencionado, e outros 50% maiores. Por fim, constatou-se no Q3 igualou-se a 189,6 mm, sendo que 75% dos valores da precipitação foram menores(Q3).

Ainda comparando os valores de PPM de março e agosto, esse último apresentou como Q3 inferior (189,6 mm) ao comparar com o limite inferior do mês de março que foi de 215 mm.

Percebe-se, de imediato, um valor extremo (*outlier*) no conjunto de dados das precipitações pluviométricas, que foi o mês de julho, com valor de 652,3 mm

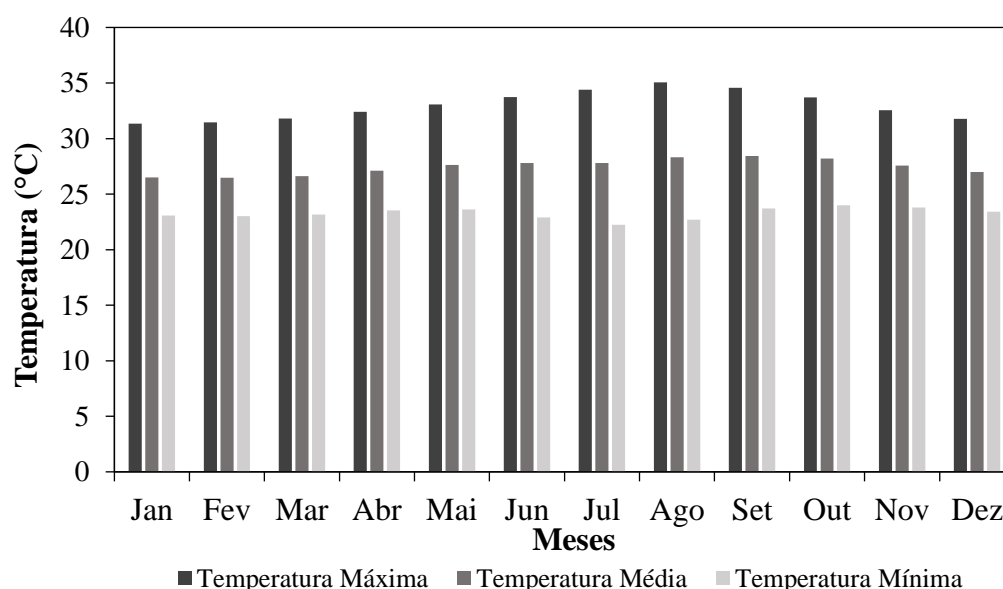


ocorrido no ano de 1995, que pode ser atrelado a fenômeno climáticos ENOS. Entretanto, o referido assunto não faz parte do escopo desta pesquisa e o aprofundamento da temática, apesar de relevante, fica sugerido para trabalhos futuros.

Os meses com maiores médias mensais de chuva corresponderam ao período de dezembro a maio e os meses menos chuvosos compreenderam de junho a novembro. Para o sudeste paraense, os resultados obtidos corroboraram com dados de série histórica mais antigas entre 1960 e 1990, publicado por CPRM (2001), onde o mês de março também foi o mais chuvoso e agosto o mês com maior estiagem.

Na Figura 37 apresentam-se os resultados, de acordo com a estatística, dos dados mensais da temperatura de Marabá-PA, entre os anos de 1991 e 2020, com base no INMET e ANA. Nota-se que a temperatura máxima foi de 35° C no mês de agosto, e de 27° C e 22,2 °C para temperaturas média e mínima, respectivamente no mês de julho.

Figura 37. Temperatura máxima, mínima e média mensal de Marabá, 1991 a 2020.

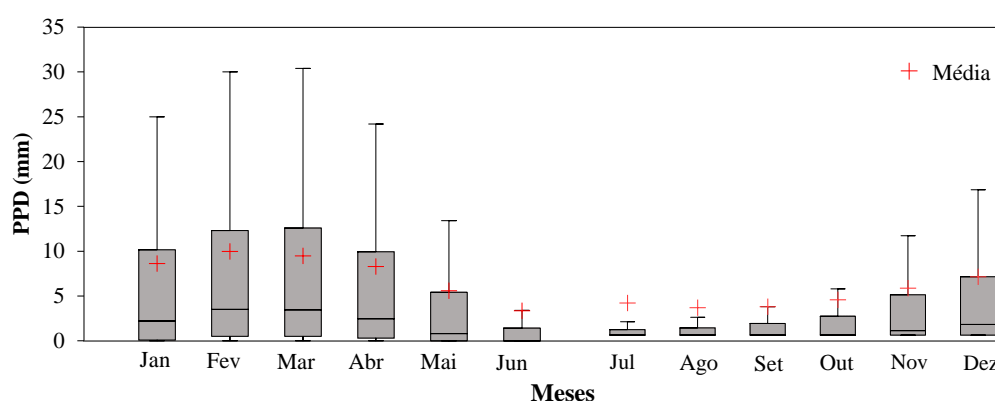


Fonte: Autora (2023)

Além dos dados de PPM, foi necessário um estudo aprofundado dos dados de precipitação pluviométrica diária (PPD) para verificar se houve disparidade vultosas durante os doze meses.

Na Figura 38 apresentam-se os dados da PPD do município de Marabá-PA para os meses de janeiro a dezembro, entre 1991 a 2020. Nota-se que os meses com maiores PPD foram de dezembro a maio, com média variando entre 5,6 mm a 10 mm e as menores de junho a novembro, da ordem de 3,1 mm a 5,3 mm. Os meses com maiores média de PPD foram fevereiro e março, respectivamente com 10 mm e 9,5 mm, enquanto os meses com menores médias de PPD foram agosto com 3,1 mm e setembro com 3,2 mm.

Figura 38. PPD de janeiro a dezembro, entre 1991 a 2020.



Fonte: Autora (2023)

Constatou-se que os meses de fevereiro e março foram os mais chuvosos, tendo 25% das suas PPD na ordem de 12,3 mm a 30 mm, e 75% das PPD abaixo do intervalo mencionado. Já os meses de agosto e setembro foram considerados meses com menor PPD, sendo que a média não ultrapassou 3,2 mm ao dia.

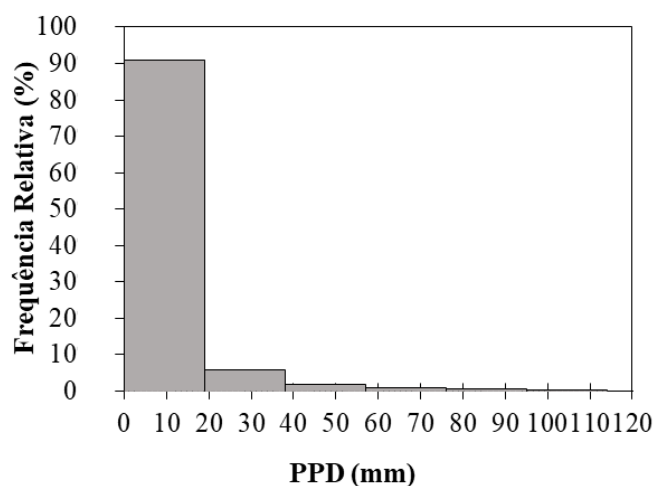
Em relação a variabilidade temporal no período pesquisado, os meses que se apresentaram com maior intervalo dos valores de PPD foram janeiro a abril, com destaque aos meses de fevereiro e março, nos quais praticamente 75% das chuvas ocorreram na faixa de 0,5 mm a 12,60 mm. Os meses com menor intervalo de variação de chuvas foram os meses de julho e agosto (Figura 38).

Destaca-se no gráfico box plot o mês de março, que apresentou o Q1 correspondente ao valor de 0,5 mm e 75% PPD maiores. Já o Q2, equivalente a mediana, no qual foi de 3,45 mm, em que 50% dos valores de precipitações pluviométricas foram menores, e outros 50% foram maiores. Por fim, constatou-se no Q3, igualou-se a 12,60 mm, sendo que 75% dos valores da PPD de Q3.

Para evidenciar a confirmação de sazonalidade entre os meses tem-se o mês de agosto, que é o mês com a menor média da PPD. No gráfico box plot no mês de agosto, constatou-se no Q3, igualou-se a 0,8 mm, sendo que 75% foram maiores.

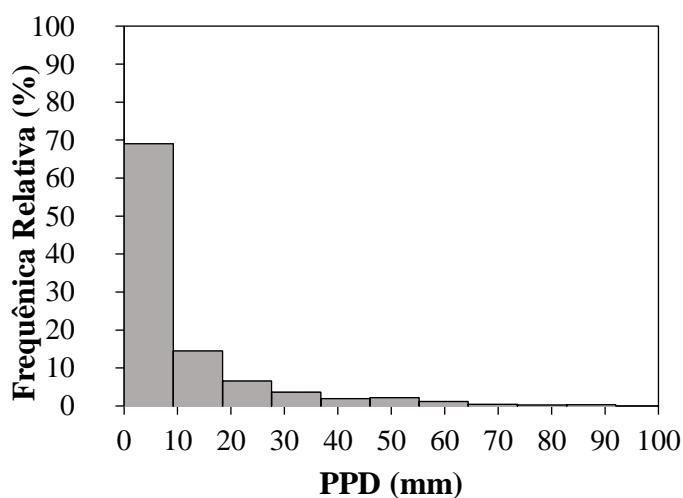
Para avaliação da frequência de ocorrência de lâmina de chuva diária (PPD) elaborou-se o histograma, apresentado na Figura 39, onde 90% das vezes que ocorreram chuvas de janeiro a dezembro, entre o período de 30 anos, foram lâminas de chuva de até 20 mm. Cerca 8% das lâminas de chuvas diárias se encontram entre 20 a 60 mm, e 2% de chuvas acima de 60 mm no município de Marabá-PA. Os resultados obtidos corroboraram com os dados apresentados na Figura 40.

Figura 39. Histograma de frequência relativa de lâminas PPD, de 1991 a 2020.



Fonte: Autora (2023)

Figura 40. Histograma de lâminas PPD do mês de março, de 1991 a 2020.



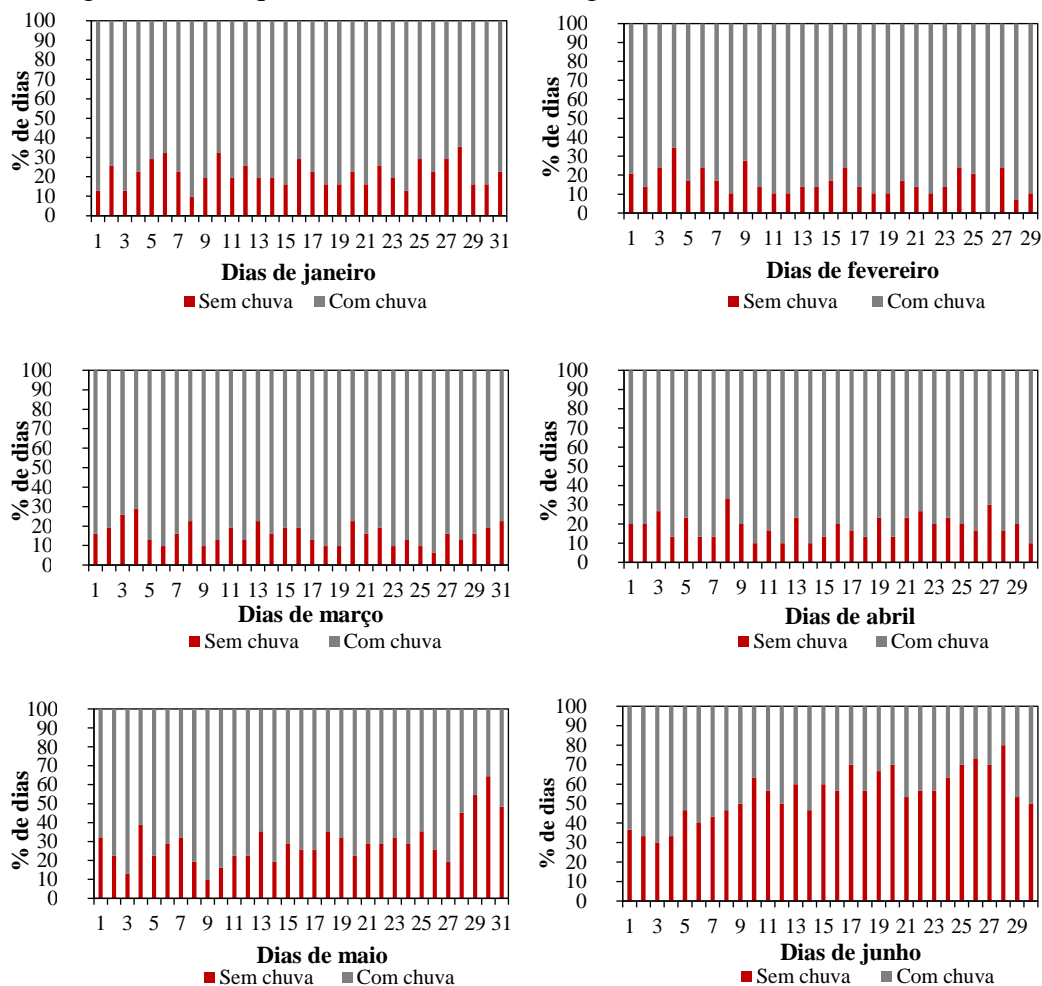
Fonte: Autora (2023)

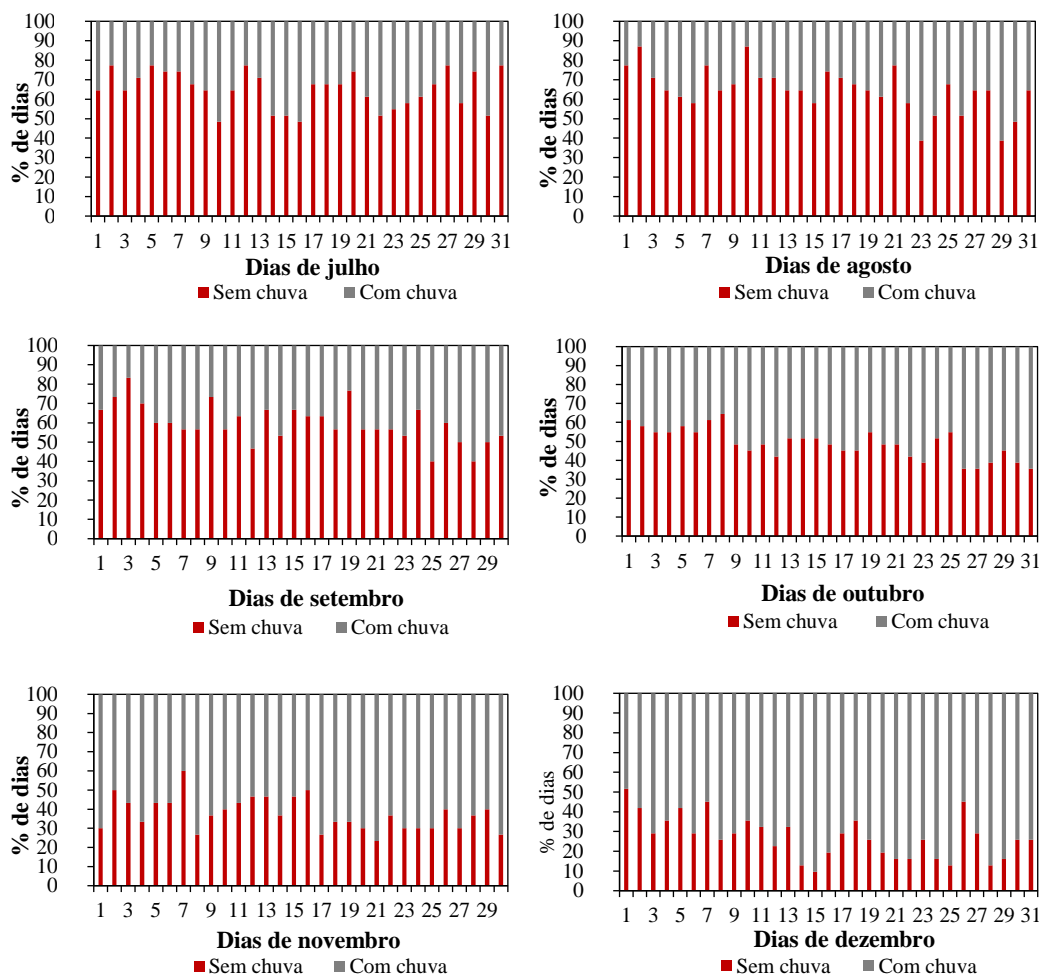
A frequência relativa das lâminas de chuva de diárias no mês de março, 1991 a 2020, e pelo histograma 85% das chuvas de até 20 mm (Figura 40).

A região amazônica tem peculiaridades de padrões de chuvas ao longo dos meses que compõem cada ano hidrológico. Portanto algumas análises específicas se fazem necessárias para o entendimento dessa sazonalidade da precipitação.

Para quantificação dos dias secos e chuvosos foi considerado como dia com chuva aquele que em sua estação meteorológica acusou lâmina de precipitação acima de 0,1 mm. Na Figura 41 apresentam-se informações dos percentuais de dias que choveram e não choveram por dias, em todos os meses, de 1991 a 2020.

Figura 41. Dia que mais choveram ao longo de 12 meses, de 1991 a 2020.





Fonte: Autora (2023)

Essa análise permitiu observar os padrões de chuvas na cidade de Marabá, e verificar o comportamento dos maiores dias com chuva nos meses de dezembro a maio, com médias aproximadamente 78% (com lâminas de 5,6 mm a 10 mm), e de apenas 22% dos dias ficaram sem chuva (Figura 41). Já para os meses de junho a novembro, 44% dos dias apresentaram episódios de lâminas de chuva com predominância até 5 mm (sendo 90% das lâminas de chuva entre de 0,2 mm a 5 mm) e 56% dos dias ficaram sem chuva (Figura 41).

Observou-se que o comportamento de dias com chuvas e sem chuvas no mês de março foi formada por um ciclo, uma espécie de “senoide”, com muitos picos médios coincidentes de múltiplos de 4, no caso 4 dias. Ou seja, os dias 4, 8, 13, 16, 20, 21, 30 e 31 foram os dias dos meses de março que mais tiveram episódios de dias sem chuva ao longo dos 30 anos de série. Em compensação os dias 6, 9, 12, 18, 19, 23, 26 e 28 foram os dias que mais tiveram ocorrência na série para o mês de março (Figura 41).

Como o período analisado foi 30 anos, a amostra total de 30 possíveis ocorrências de chuva por dia no mês de março, e os dias que mais tiveram incidência de chuva citados anteriormente foram de 27 ou 28 vezes, com exceção ao dia 26 de março que ao longo de 30 marços, vinte nove vezes choveu e apenas dois não registraram episódios de chuva, que foram os anos de 1992 e 1994.

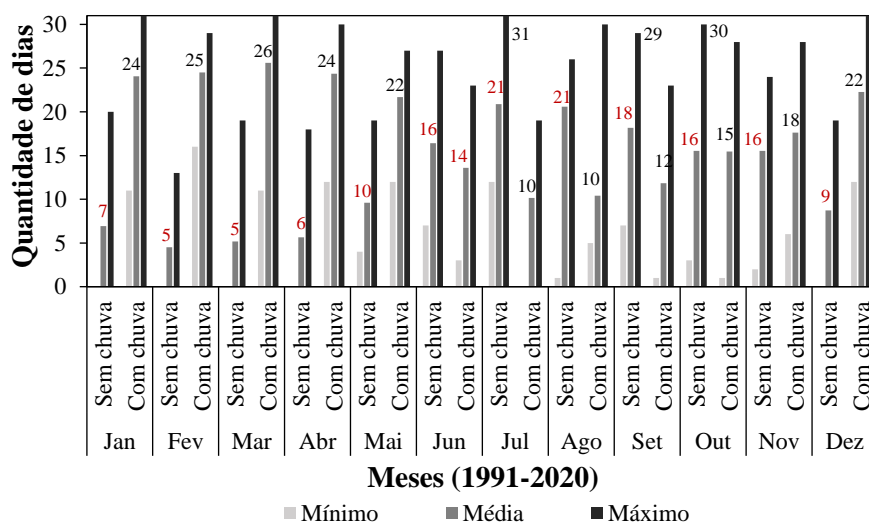
Os meses com maior média de dias sem chuva foram julho e agosto, o que corresponde a 65%, ou seja, foram 20 dias sem chuva do total de 31 dias para cada um dos meses (Figura 41). Enquanto o mês de março obteve a maior média de dias com chuva, cerca de 84%, equivalente a 26 dias com chuva do total de 31 dias.

Para uma visão completa do comportamento para cada dia de janeiro a dezembro, nos 30 anos de dados hidrológicos, consultar o Apêndice I, que apresenta uma planilha com formatação condicional para essa análise específica.

A sazonalidade também foi representada nas médias de dias com e sem chuva ao longo dos meses, uma vez que a partir do mês de dezembro, a quantidade de dias com chuva aumenta de 22 dias, passando por 24 dias em janeiro, 25 dias em fevereiro até o ápice com 26 dias no mês de março, no mês de abril decai para 24 dias e maio com 22 dias com chuvas (Figura 42).

A partir de junho, o número de dias com chuva cai de forma significativa para 14 dias, em julho e agosto com média de 10 dias com chuva, em setembro com 12 dias, outubro com 14 dias e novembro com 18 dias com chuva (Figura 42).

Figura 42. Mínimo, média e máximo de dias sem chuva e com chuva por mês.

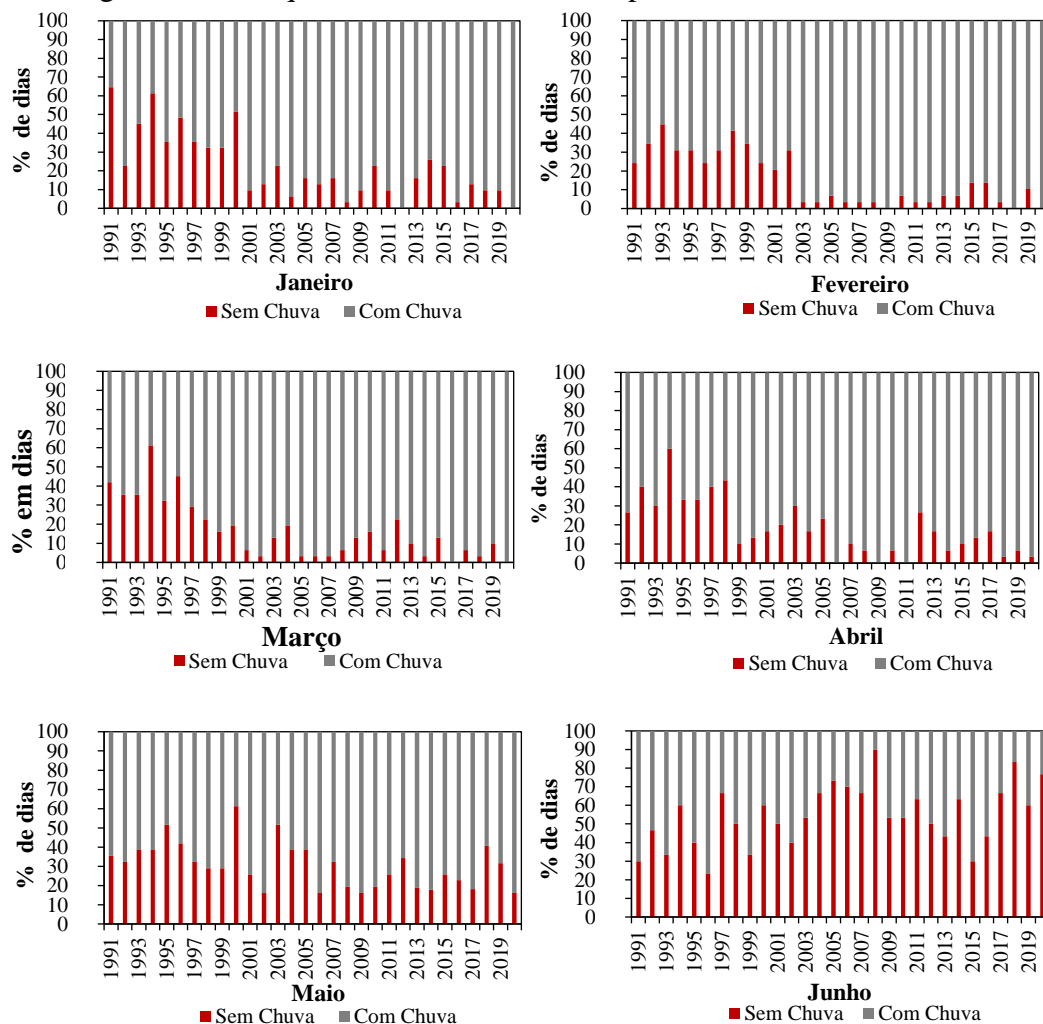


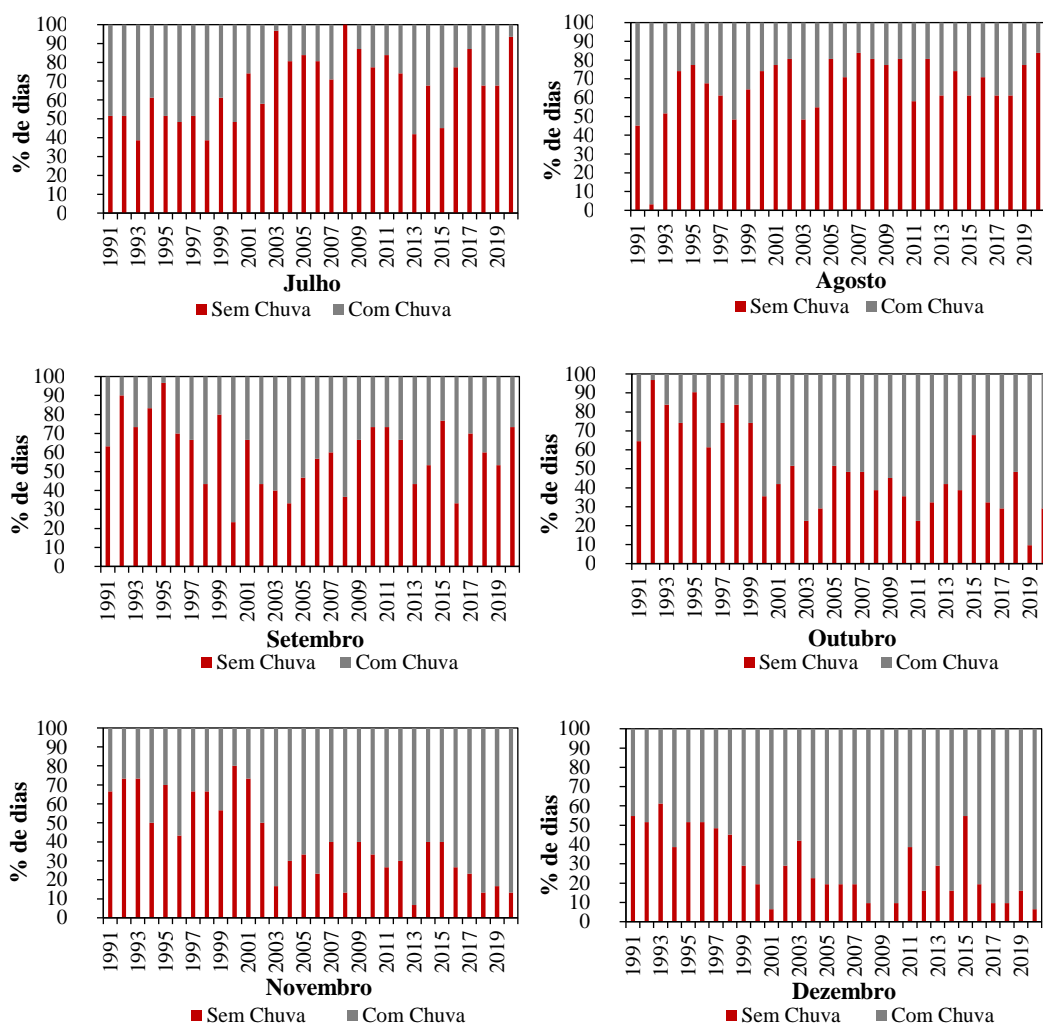
Fonte: Autora (2023)

Para todos os meses, a média de dias com chuva se apresentou maior do que comparado em período anterior, pesquisado por Hoffmann *et al.* (2018), de 1992 a 2012. O autor também encontrou lâmina de chuva média diária de 18 mm, enquanto que nesta pesquisa a média de lâmina de chuva diária foi de 6 mm para um período mais longo de 1991 a 2020. Para ambos os casos de divergências têm-se uma justificativa, uma vez que o critério utilizado pelos autores previu que os dias que chovem ocorreram para lâminas de chuva superiores a 5 mm, enquanto para esta pesquisa utilizaram-se todos os dias com chuva.

Na Figura 43 apresentam-se os meses com períodos maiores de dias sem chuva que foram os meses de julho, setembro e outubro, respectivamente com a quantidade de dias sem chuva de 31 dias (em 2008), 29 dias (em 1995) e 30 dias (em 1992).

Figura 43. Dias que chovem e não chovem por mês, entre 1991 a 2020.





Fonte: Autora (2023)

Na Figura 43 apresentam-se dois cenários bem distintos ao longo dos anos, o primeiro cenário de 1991 a 2000 em que o mês de março ainda apresentava equilíbrio entre os dias de chuva e de estiagem, com uma média de 64% dos dias de março que choveram, cerca de 20 dias choveram e 11 dias sem chuva.

O segundo cenário mostrou ocorrência de chuva ainda maior quando comparado ao primeiro cenário, uma vez que apresentou cerca de 92% dos dias de março com chuva, ou seja, uma média de 28 dias com chuva e 3 dias com ausência de chuva.

Nos anos 2002, 2005 a 2007, 2014 e 2018, durante o mês de março não choveu apenas 1 dia na média, enquanto nos anos de 2016 e 2020 todos os dias tiveram ocorrência de chuva no mês de março.



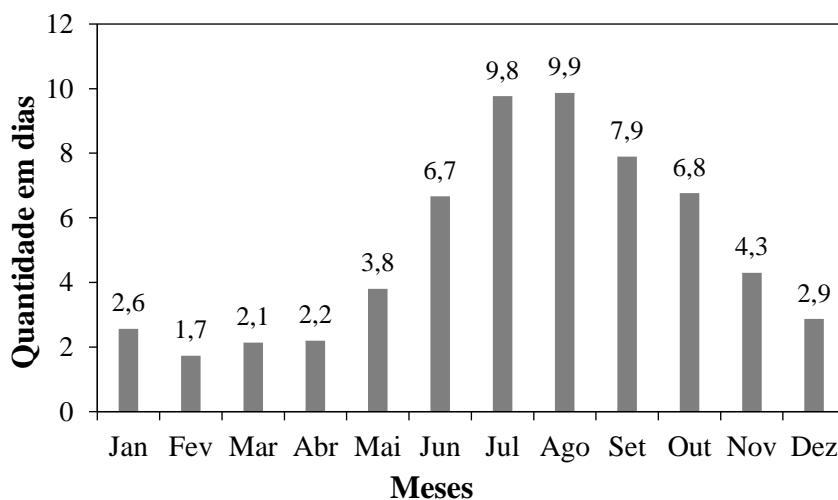
Ainda sobre a Figura 43, os meses que apresentaram as maiores quantidades de dias com chuva foram os meses janeiro, fevereiro, março e dezembro, respectivamente nos anos de 2020, 2020, 2020 e 2009.

E o único ano que teve mais dias sem chuva comparado com os dias com chuva foi março de 1994, pois foram 13 dias com chuva e 18 dias sem ocorrência de chuva, que pode estar relacionado com o fenômeno El Niño, já que o mesmo é capaz de modificar o comportamento da precipitação de uma região.

O ano com o valor de maior precipitação do mês mais chuvoso, foi março em 1991, com 480,92 mm nos 18 dias de ocorrência de chuva, apesar de outros 27 anos terem ocorrência de mais dias de chuvas (Figura 43).

O espaçamento médio das chuvas do mês de março foi de 2,1 dias, ou seja, em média ao longo dos meses de março choveu a cada dois dias e para os demais meses o espaçamento de dias sem chover foi sempre maior que o de março, com exceção do mês de fevereiro que foi de 1,7 dias (Figura 44). Porém, no próprio ano de 1991, em março ocorreram três episódios de estiagem de até 3 dias.

Figura 44. Espaçamento médio de dias com estiagem por mês (1991 a 2020)



Fonte: Autora (2023)

Os meses com maiores dias de estiagem foram os meses de julho e agosto, e ainda são meses com precipitações pluviométricas bem baixas (Figura 44).

No caso de obras civis nessas regiões com precipitações pluviométricas acentuadas, essa variável climática é primordial no cálculo do balanço hídrico, assim como a quantidade de água que irá contribuir no dimensionamento das estruturas que irão receber essa chuva, e no caso específico desta pesquisa o valor

potencial e/ou real da água que chegará na cobertura final do aterro sanitário localizado no município de Marabá-PA.

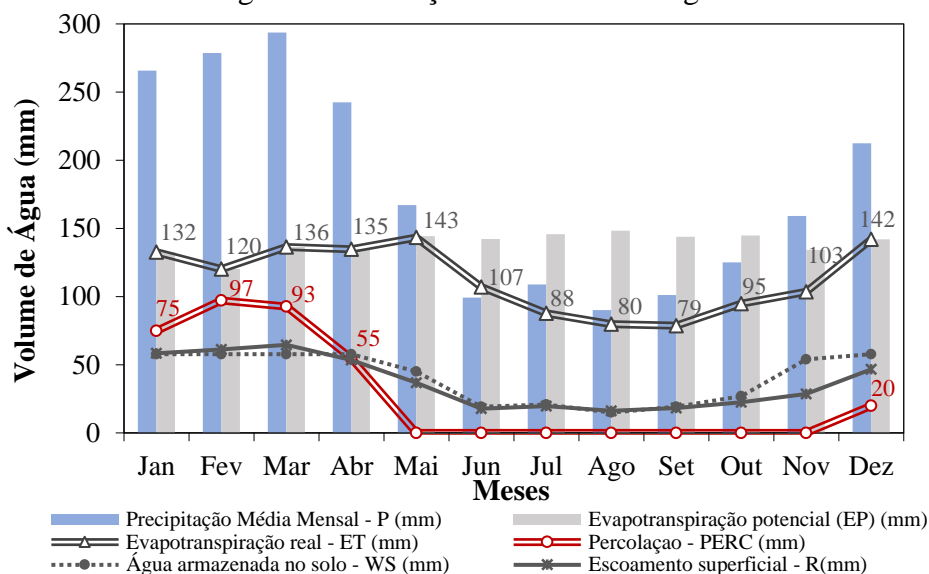
#### **4.2.BALANÇO HÍDRICO DE MARABÁ-PA**

Os resultados obtidos a partir do balanço hídrico de um solo em Marabá-PA foram fundamentais para compreender o comportamento da água de chuva na área de estudo e estabelecer condições de segurança na implantação de obras ambientais como as coberturas de aterros sanitários.

Conhecer as grandezas e alcance do fluxo de água de chuva pela cobertura final de aterro sanitário também foi um dos objetivos desta pesquisa. E num segundo momento do balanço hídrico, esse mais voltado as condições geotécnicas do solo como permeabilidade, sucção e infiltração, de forma a ter profundidade na análise de desempenho das duas coberturas estudadas formadas somente por material natural. E o diferencial foi analisar em condições de precipitações pluviométricas compatíveis com o que ocorre na região onde o aterro está localizado.

Nesta pesquisa, com o emprego do balanço hídrico, determinou-se a quantidade em (mm) das parcelas que formam esse balanço de água, como a evapotranspiração real, a infiltração e a percolação, tão quanto outros fatores como temperatura e armazenagem de água no solo que são influenciados pelos diferentes meses do ano no município de Marabá-PA. Esse balanço tem influência dos dados de entrada que são os valores de precipitações pluviométrica, temperatura e luz solar, e no estudo optou-se por temporalidade mensal, no período de 1991 a 2020 (Figura 45).

Figura 45. Balanço hídrico climatológico.



Fonte: Autora (2023)

Nota-se que a percolação está diretamente relacionada à quantidade de precipitação pluviométrica mensal, atingindo valores nulos nos meses com menos chuva, sendo o mês de maio a transição de um período mais chuvoso para um menos chuvoso.

Isso ocorre devido à perda de água acumulada nesses meses, o que resulta em um balanço negativo de água no solo. Esse balanço negativo é resultado da escassez de eventos de chuvas e/ou chuva com lâmina de água não suficientes para saturar o solo e assim ocorrer a percolação, além do aumento da temperatura nesses meses, o que provoca uma evaporação maior que o volume de água precipitado, deixando os solos nesses meses ainda mais secos.

Até este ponto dos resultados não se adentrou especificamente na avaliação do comportamento do fluxo de água nos dois tipos de cobertura final de aterro sanitário desta pesquisa, para o balanço hídrico calculado (Figura 45), os únicos dados preliminares do solo foram de dados para armazenagem de água no solo ( $\theta_{33}$ ).

Ainda sobre o período mais chuvoso, o mês que apresentou o maior valor de evapotranspiração real foi o mês de maio, com 144 mm, motivado por ser o mês com menor precipitação pluviométrica, também apresentou menores valores de infiltração e escoamento superficial, somada a maior temperatura que foi de 27,62°C. Esse conjunto de fatores favoreceu ao valor máximo de evapotranspiração real e o único mês dentro do período chuvoso que a percolação foi nula (Figura 45).

Com base no levantamento das séries históricas do INMET e ANA e o cálculo do balanço hídrico pelo método de Koerner e Daniel (1997) foi possível elaborar um modelo analítico de balanço hídrico para um período de 30 anos (Tabela 9), de 1991 a 2020, para o município de Marabá-PA.

Apesar da média da precipitação pluviométrica do mês de março ser superior ao mês de fevereiro, o último apresentou percolação um pouco maior, devido isso aos valores de luz solar, uma vez que para fevereiro o valor adotado conforme Tabela 4 foi de 27,9 N, enquanto para março foi de 30,9 N. Essa variável interfere diretamente no resultado da evapotranspiração potencial e no balanço (IN-EP).

Com o emprego do balanço hídrico determinou-se a quantidade em (mm) das parcelas que formam esse balanço de água, como a evapotranspiração real, a infiltração e a percolação, tão quanto outros fatores que são influenciados pelos diferentes meses do ano no município de Marabá-PA. Esse balanço tem muita influência dos dados de entrada que são os valores de precipitações pluviométrica, neste caso, optou-se na temporalidade mensal, conforme pode ser acompanhado na Tabela 9.

Tabela 9. Balanço Hídrico Climatológico

<b>BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO MARABÁ-PA</b>													
<b>Período: 1990-2020</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>	<b>Total</b>
<b>CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (EP)</b>													
Temperatura média (C°)	26,50	26,45	26,63	27,12	27,62	27,79	27,79	28,31	28,44	28,20	27,56	26,98	
Índice de calor (Hm)	12,49	12,45	12,58	12,93	13,30	13,42	13,42	13,80	13,90	13,72	13,25	12,84	158,11
UPET (mm)	4,33	4,30	4,41	4,40	4,54	4,58	4,58	4,71	4,75	4,69	4,52	4,66	
Luz solar média mensal (N)	30,60	27,90	30,90	30,60	31,80	31,01	31,80	31,50	30,30	30,90	29,70	30,49	
Evapotranspiração potencial (EP) (mm)	132,50	119,84	136,40	134,65	144,30	142,13	145,71	148,43	143,78	144,78	134,27	141,99	139,06
<b>CÁLCULO DO BALANÇO INFILTRAÇÃO (IN) x EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (EP): (IN -EP)</b>													
Precipitação Média Mensal- P (mm)	265,66	278,59	293,65	242,59	167,22	99,16	108,78	90,13	101,04	125,07	159,10	212,37	2.143,36
Escoamento superficial - R (mm)	53,13	55,72	58,73	48,52	33,44	19,83	21,76	18,03	20,21	25,01	31,82	42,47	
Infiltração - IN = (P - R) (mm)	212,53	222,87	234,92	194,07	133,77	79,33	87,03	72,10	80,83	100,06	127,28	169,89	1.713,74
Balanço - (IN - EP) (mm)	80,03	103,04	98,53	59,42	-10,53	-62,79	-58,69	-76,32	-62,95	-44,72	-6,98	27,91	
<b>CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ET)</b>													
Perda de água acumul. - WL (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	-10,53	-73,32	-132,01	-208,34	-271,29	-316,01	-322,99	-322,99	
Água armazenada no solo - WS (mm)	88,34	88,34	88,34	88,34	77,97	41,95	44,05	35,73	41,87	51,98	81,32	88,34	
Armazenamento de água- ΔWS	0,00	0,00	0,00	0,00	-10,37	-36,02	2,09	-8,31	6,14	10,10	29,34	7,02	
Evapotranspiração real - ET (mm)	132,50	119,84	136,40	134,65	144,14	115,35	84,93	80,41	74,69	89,95	97,94	141,99	112,73
<b>CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA A CAMADA INFERIOR (Q)</b>													
Percolação - PERC (mm)	80,03	103,04	98,53	59,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,88	
Linha de Checagem - CK (mm)	265,66	278,59	293,65	242,59	167,22	99,16	108,78	90,13	101,04	125,07	159,10	212,37	2.143,36
Fluxo de percolação - Q <sub>nec</sub> (m³/s)	6,18E-4	7,96E-4	7,61E-4	4,59E-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,61E-04	

Fonte: Autora (2023)

Ao analisar influência da sazonalidade das precipitações pluviométricas dos meses mais chuvosos (dezembro a maio), esses meses apresentaram maiores valores médios de evapotranspiração real de 135 mm, equivalente a 55% da PPM do mesmo período, enquanto para os meses menos chuvosos (junho a novembro) indicaram a ET igual a 90,5 mm, correspondente 79% da PPM dos meses mais quentes. Rocha *et al.* (2017) mensuraram a evapotranspiração na região da Amazônia, esses valores ficaram entre 20% e 65%.

A faixa de evapotranspiração em vários pontos da Amazônia nos meses chuvosos aponta média de 65 mm a 140 mm por mês, enquanto para estação mais seca fica aproximadamente de 99 mm a 161 mm por mês (Negrón Juárez *et al.*, 2007). Para Silva Junior *et al.* (2017), a evapotranspiração que ocorre durante a estação seca é mais influenciada pela umidade armazenada no solo conquistada durante a estação chuvosa. Essa umidade armazenada no solo fica facilmente disponível para absorção das raízes e evapotranspiração para a atmosfera.

Em termos percentuais, em regiões úmidas como a Amazônia, a evapotranspiração é responsável por aproximadamente 50% da precipitação pluviométrica anual (Rocha *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2013), podendo chegar até valores da ordem de 82% das chuvas (Marengo, 2005).

Antecedente da cobertura final, a quantidade de percolado é função da precipitação pluviométrica sobre a área do aterro sanitário, da compactação e deterioração do RSU disposto, e o balanço hídrico climatológico entra com uma ferramenta para subsidiar a segurança ambiental nos projetos de camadas ou barreiras desse tipo de obra civil. Principalmente, com o objetivo de mensurar as parcelas que formam o movimento da água do meio ambiente, passando pelas camadas de cobertura e o quanto chega nos RSU.

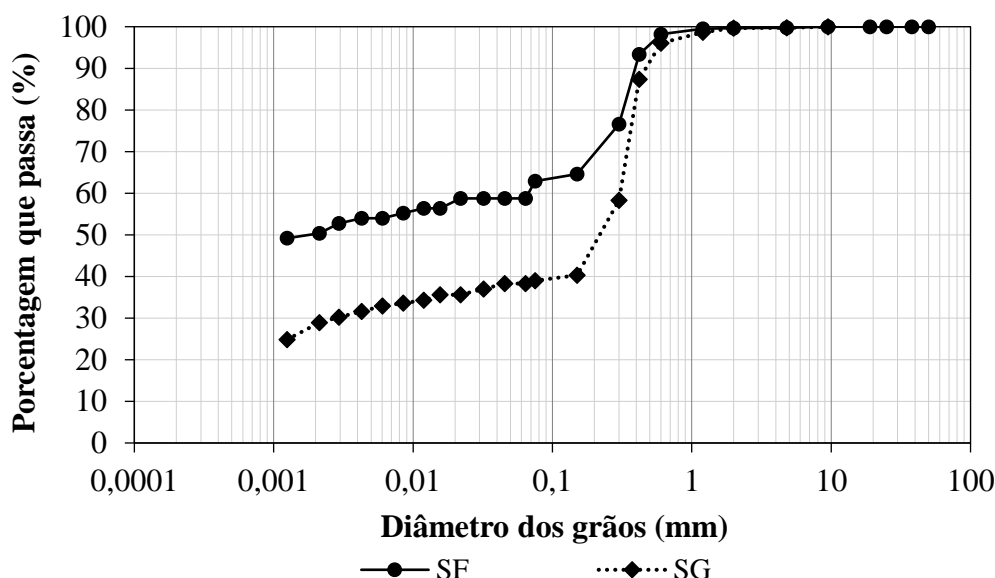
Nesta última abordagem do balanço hídrico proporcionou uma avaliação o quanto de chuva cada cobertura final suporta em termos de umidade, para as chuvas condicionadas no sistema de ensaios de coluna.

**Resultados do objetivo específico “b.”: analisar a composição dos materiais de cobertura final do aterro sanitário no comportamento geotécnico e mineralógico.**

#### **4.3. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA**

As análises granulométricas revelaram que a amostra SF apresentou em sua composição 61% de frações finas, sendo 55% formada por argila. Enquanto a amostra SG possui 50% formado por frações finas, composta por 32% de argila e 18% por silte. Em relação as frações grossas para a amostra SF, a faixa predominante de material foi a areia fina totalizando 33%, e já amostra SG a faixa granulométrica de destaque foi a areia média com 33% (Figura 46).

Figura 46. Curvas granulométricas das amostras de solo.



Fonte: Autora (2023)

O SF apresentou limite de liquidez de (LL) de 26%, limite de plasticidade (LP) de 17% e índice de plasticidade (IP) de 9%. O SG apresenta LL de 19%, LP de 11% e IP de 8%. O valor superior de LL da amostra SF se deu pela granulometria mais fina e consequentemente maior superfície específica comparada ao SG, exigindo assim uma maior umidade para atingir o limite de liquidez.

Na Tabela 10 foi possível observar que o solo SF possui elevado teor de argila, podendo ser classificada de acordo com Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo está classificado como argila de baixa compressibilidade (CL). E de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 2016) o SF é classificado como

argila arenosa. Enquanto o solo SG, para SUCS também é classificado como CL, porém de acordo com a classificação da ABNT ele se classifica como areia argilosa.

Tabela 10. Caracterização geotécnica das amostras de solo SF e SG

	<b>SF</b>	<b>SG</b>
Pedregulho (%)	0	1
Areia Grossa (%)	0	6
Areia Média (%)	6	33
Areia Fina (%)	33	10
Silte (%)	6	18
Argila (%)	55	32
Fração Grossa (%)	39	50
Fração Fina (%)	61	50
Peso Específico dos Grãos (kN/m <sup>3</sup> )	27,1	28,1
LL (%)	26	19
LP (%)	17	11
IP (%)	9	8
Classificação dos solos (SUCS)	CL Argila de baixa compressibilidade	CL Argila de baixa compressibilidade

LL: Limite de liquidez. LP: Limite de plasticidade. IP: Índice de plasticidade. SUCS: Sistema unificado de classificação dos solos. CL: Argila de baixa compressibilidade.

Fonte: Autora (2023)

O SF apresentou um índice de plasticidade (IP) de 9%, enquanto o SG apresentou um IP de 8%, ou seja, valores muito próximos o que pode indicar uma ingerência da fração fina. Nota-se que o percentual da fração argila é maior para o SF, entretanto verifica-se uma maior quantidade da fração de areia fina, o que pode ter interferido no valor de IP. Braga *et al.* (2006) também observou a interferência da fração areia fina no IP em estudos para avaliação da tixotropia em solos procedentes de uma área do porto de Recife-PE.

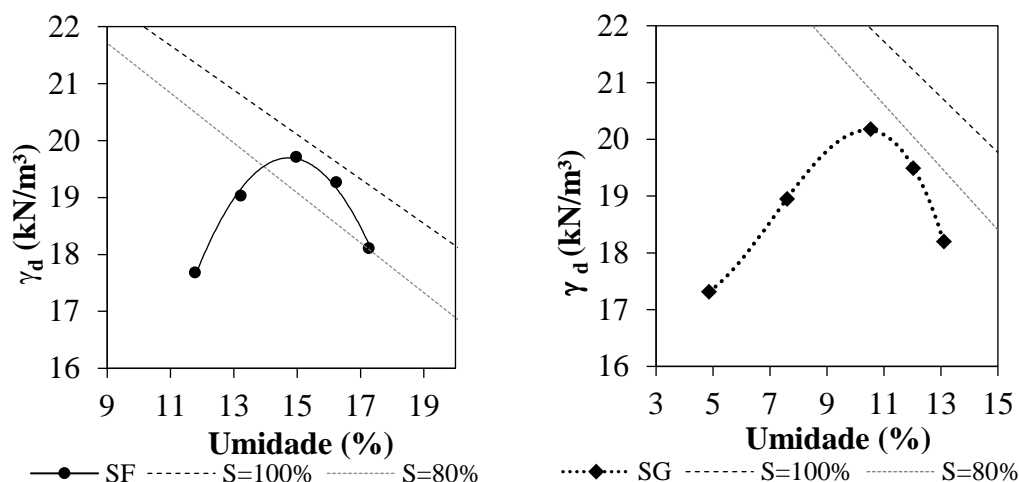
O SF é composto por quantidade expressiva de argila, mas possui 33% de areia fina, que de certa forma atrapalha a plasticidade da amostra. O LL mais alto para SF repercute em um material com mais finos e consequentemente mais impermeável.



#### 4.4. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os resultados dos ensaios de compactação na Energia Normal com reuso de material forneceram valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}=19,70 \text{ kN/m}^3$  e  $W_{\acute{o}t}=14,60\%$  para o solo SF e no caso da amostra SG os valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}=20,30 \text{ kN/m}^3$  e  $W_{\acute{o}t}=10,50\%$  (Figura 47).

Figura 47. Curva de compactação dos solos SF e SG.



Fonte: Autora (2023)

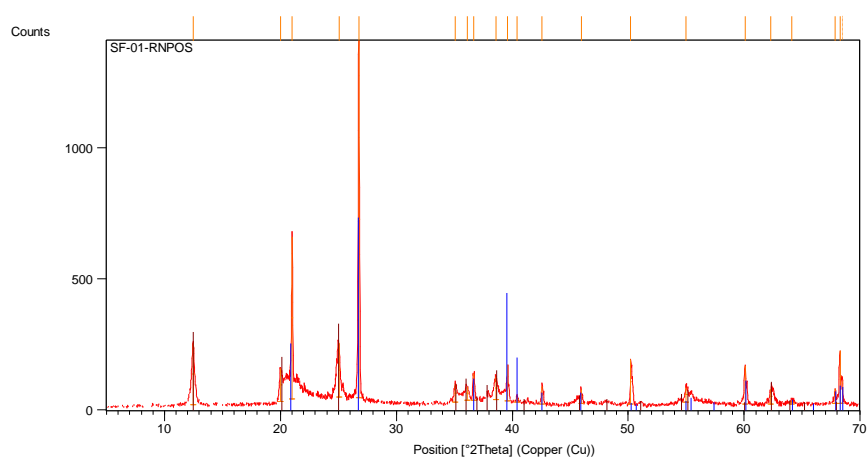
Identifica-se que a curva com SF apresenta umidade ótica superior ao da amostra SG, essa possui granulometria com maior quantidade de areia, e pelo mesmo motivo apresentou um  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  maior, devido as características granulométricas.

Outro ponto importante de se observar são as curvas de saturação de 80% e 100%. Para a amostra SF, o ponto ótimo situa-se entre 80% a 90%, devido sua característica de ser formada por mais argila. Enquanto a amostra SG, o ponto de umidade ótima não chegou a 80% de grau de saturação. Em relação ao índice de vazios, os valores mínimos obtidos coincidentes aos pontos ótimos de umidade e máximo de peso específico aparente seco foram de 0,37 para SF e 0,39 para SG.

#### 4.5. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

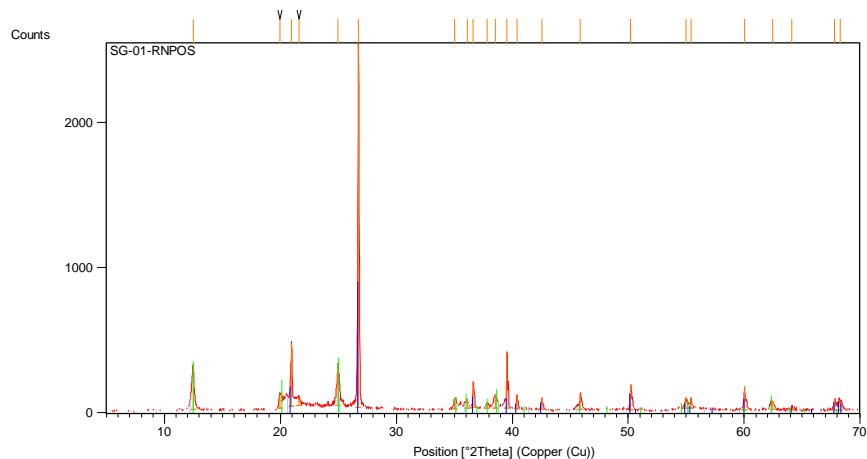
Para avaliação da composição mineralógica dos solos que compõem os dois sistemas de cobertura abordados foram realizados ensaios de difração de raios-X. As análises mineralógicas objetivaram mostrar a composição mineral dos dois solos estudados (Figura 48 e Figura 49).

Figura 48. Difração de raios-x da amostra de solo SF.



Fonte: Autora (2023)

Figura 49. Difração de raios-x da amostra de solo SG.



Fonte: Autora (2023)

Os dois solos investigados, que constituem a formação Itapecuru, são compostos essencialmente por quartzo e caulinita, sendo esses minerais bastante comuns em solos amazônicos (Couceiro; Santana, 1999; Marquesi *et al.*, 2010). A caulinita é proveniente da decomposição de materiais primários e é um material estável em presença de água (Camapum de Carvalho *et al.*, 2023).

Para ambas as amostras, os minerais encontrados não possuem como característica tendência a absorver muita água nos vazios (Couceiro; Santana, 1999; Marquesi *et al.*, 2010; Sousa Pinto, 2016). Ou seja, não favorecem a retenção de água de chuva a ser infiltrada nas coberturas (Marquesi *et al.*, 2010; Sousa Pinto, 2016), e por conseguinte não é um fator que se pode contar para um maior valor da parcela de armazenamento de água que faz parte do balanço hídrico.

**Resultados do objetivo específico “c.”: avaliar a viabilidade técnica da utilização de solos tropicais da região amazônica paraense em cobertura final de aterro sanitário;**

#### **4.6. ENSAIO DE SUCÇÃO COM PAPEL FILTRO**

A obtenção das curvas de retenção de água e os parâmetros relacionáveis com a sucção foram obtidos mediante o ensaio pelo método de papel filtro, a escolha do método justificou-se pela ordem de grandezas previstas dos resultados de sucção para os tipos de solos utilizados nesta pesquisa, onde a sucção encontra-se de 10 e 100.000 kPa (Marinho; Oliveira, 2006; Haghighi *et al.*, 2011; Carvalho; Gitirana, 2021).

A finalidade do ensaio foi analisar o comportamento da curva característica de retenção de água de cada um dos solos que compõem as coberturas. Além de obter parâmetros como o ponto/sucção de entrada de ar, capacidade de sucção, teor de umidade residual e predição de permeabilidade.

Com os resultados de laboratório e o ajuste das curvas de retenção de água no software RETC, conforme Van Genuchten e Mualem (1986), incluiu-se dados de entrada que são as características geotécnicas do solo (Tabela 11). Essas propriedades hidráulicas são parâmetros necessários em qualquer descrição quantitativa do fluxo de água em meios poroso como os solos.

Tabela 11. Dados de entrada e saída utilizados do software RETC

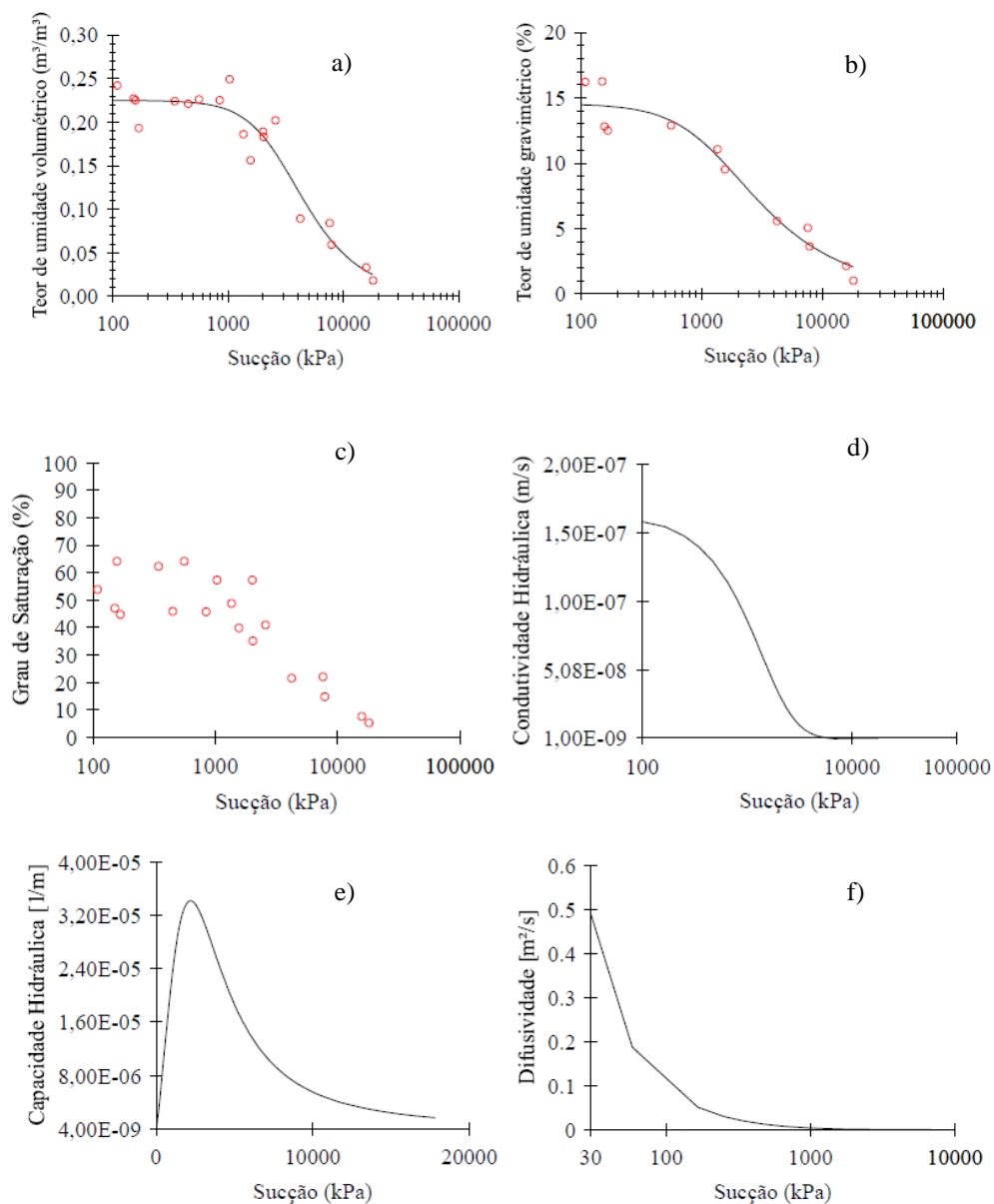
Dados de entrada			Dados de saída	
SF	Areia (%)	39	$\theta_r$ (m³/m³)	0,0808
	Silte (%)	6	$\theta_s$ (m³/m³)	0,3126
	Argila (%)	55	$\alpha$ (1/m)	3,41
	$\gamma_s$ (kN/m³)	27,1	n	1,1237
			$k_s$ (m/s)	$1,66 \times 10^{-7}$
SG	Areia (%)	49	$\theta_r$ (m³/m³)	0,0533
	Silte (%)	18	$\theta_s$ (m³/m³)	0,2872
	Argila (%)	32	$\alpha$ (1/m)	0,0367
	$\gamma_s$ (kN/m³)	28,1	n	1,1328
			$k_s$ (m/s)	$1,25 \times 10^{-5}$

Fonte: Autora (2023)

A Figura 50 apresenta-se um conjunto de gráficos gerados pelo RETC para o solo SF. Em destaque a Figura 50 a) e b) que expressa a curva de retenção de água no solo SF, esses dados experimentais foram ajustados conforme Van Genuchten e Mualem (1986), e mostram a relação da sucção matricial em kPa e a umidade volumétrica em  $\text{m}^3/\text{m}^3$  e em % ao se tratar de umidade gravimétrica.

Além da curva de retenção de água no solo, o software RETC gerou gráficos auxiliares que relacionam sucção ao grau de saturação, condutividade hidráulica, capacidade hidráulica e difusividade, todos esses apresentados na Figura 50.

Figura 50. Curva do ensaio de sucção do solo SF.



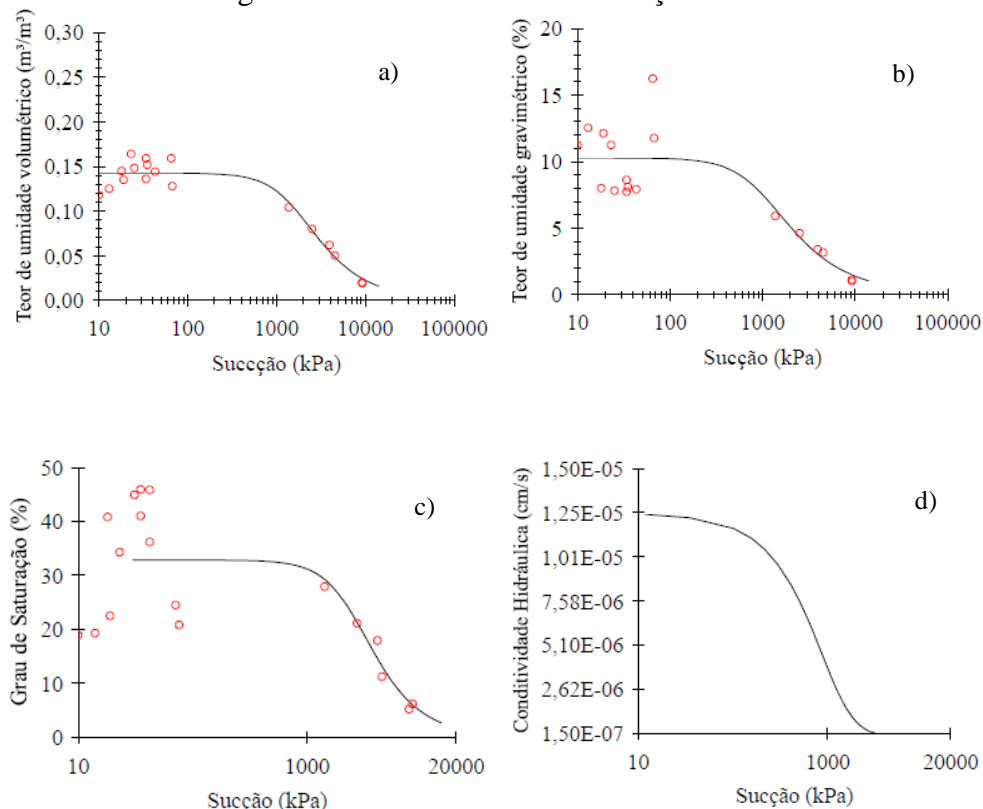
Fonte: Autora (2023)

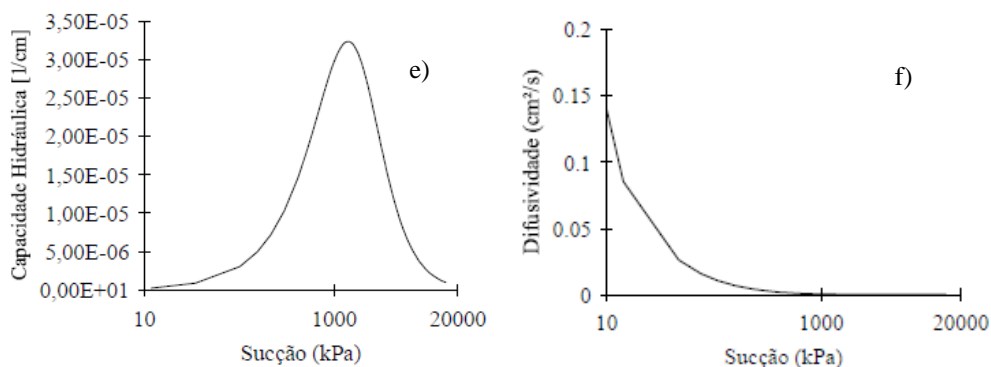
O formato da curva do solo SF (Figura 50) apresenta-se mais suave e com trecho retilíneo mais alongado, somado as características granulométricas e menor valor de coeficiente de permeabilidade retrata maior retenção de água comparada ao SG. Esses resultados convergem com os trabalhos de Lopes (2011), Santos (2015) e Costa *et al.* (2018), ambos pesquisaram e realizaram ensaios de sucção para solos para utilização em coberturas de aterro sanitário.

A representação dos valores de grau de saturação em função da sucção (Figura 50.C) do SF apresenta a mesma forma que na representação com a umidade volumétrica, melhorando somente a definição na porção mais retilínea da curva de retenção. Essa convergência no formato das curvas ocorre principalmente por ser solos com compressibilidade relativamente baixos (Camapum de Carvalho *et al.*, 2023; Gitirana *et al.*, 2022).

A Figura 51 apresenta-se um conjunto de gráficos gerados pelo RETC para o solo SG.

Figura 51. Curvas do ensaio de sucção do solo SG





Fonte: Autora (2023)

Os valores de sucção matricial ou sucção variaram de cerca de 100 kPa a 19.000 kPa para SF e de 10 kPa a 10.000 kPa para amostra SG (Figura 51). Essa diferença também se justifica pela granulometria mais fina de SF, que é um dos fatores que mais influenciam para maiores valores de sucção e o que repercute em maior capacidade de retenção de água (Costa, 2015; Lopes, 2011; Santos, 2015).

Para determinação dos parâmetros utilizou-se o método das tangentes proposto por Fredlund e Xing (1994). Os parâmetros extraídos a partir das curvas de retenção de água nos dois tipos de solos SF e SG são expressos na Tabela 12.

Tabela 12. Parâmetros obtidos das curvas de retenção e gráficos do RETC.

Amostra	$\Psi_{ar}$ (kPa)	$\theta_{33}$ (m³/m³)	$\theta_{1500}$ (m³/m³)	$W_{33}$ (%)	$W_{1500}$ (%)	$R^2$
SF	1500	0,225	0,205	14,90	10,50	0,926
SG	700	0,142	0,110	11,02	6,50	0,931

$\Psi_{ar}$ :  $\theta_{33}$ : Umidade volumétrica residual quando a atinge sucção igual a 33 kPa;  $\theta_{1500}$ : Umidade volumétrica de saturação quando a atinge sucção igual a 1500 kPa.  $W_{33}$ : umidade gravimétrica quando a sucção atinge 33kPa;  $W_{1500}$ : Umidade gravimétrica quando a sucção atinge 1500 kPa;  $R^2$  coeficiente de determinação das curvas sucção versus teor de umidade volumétrico.

Fonte: Autora (2023)

Para a amostra SF, o ponto de entrada de ar ( $\Psi_{ar}$ ) corresponde 1500 kPa e para a amostra SG ponto de entrada de ar corresponde 700 kPa. O ponto de entrada de ar superior em SF comparado com SG por ser um mais argiloso devido a maior heterogeneidade da distribuição de diâmetros de poros e a possibilidade da existência de fenômenos de adsorção nas partículas argilo-minerais (Santos, 2015). Fisicamente, o ponto de entrada de ar seria a máxima sucção que os maiores poros

do solo são capazes de suportar sem serem drenados (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015, 2023).

Para o caso do SF por ser formado por mais argila e com coeficiente de permeabilidade ( $k_{SF}=1,65 \times 10^{-7}$  m/s) menor quando comparado ao SG ( $k_{SG}=1,25 \times 10^{-5}$  m/s), favoreceu a ter valor de  $\Psi_{ar}$  superior a amostra de solo grosso, resultado semelhante ao material utilizado em cobertura convencional de Lopes (2011), que foi de 1800 kPa. Já para o material de cobertura do tipo barreira capilar o valor encontrado foi de 1200 kPa (Lopes, 2011), ou seja, inferior ao da cobertura convencional, e compatível com os resultados desta pesquisa.

Os parâmetros hidráulicos das coberturas e a permeabilidade RETC foram estimados combinando as medições de laboratório e estimativas no software RETC, assim como executado no trabalho de Krevh *et al.* (2023) com adesão de resultado de mensurado pelo  $R^2$  de 93%.

Para Lopes (2011),  $\Psi_{ar}$  de entrada de ar representa a sucção da qual o ar se faz presente na estrutura solo. O teor de umidade residual, correspondente a um valor de umidade a partir da qual aumentos de sucção não produzem variações significativas de umidades.

O  $\Psi_{res}$  corresponde com máximo valor de sucção registrado nos ensaios. Este ponto é o correspondente ao valor mais próximo do teor de umidade higroscópica, e conseqüentemente sucções bem elevadas. De acordo com a Figura 50.a, para SF ficou em torno de 18.000 kPa e de 10.000kPa para o SG (Figura 51).

O valor de  $\theta_{33}$  corresponde ao  $\theta_{cc}$ , foi definido o teor de umidade respectivo a capacidade de campo (Costa *et al.*, 2018; Oliveira Júnior *et al.*, 2023), que consiste na umidade equivalente a sucção de 33 kPa, porém não há um consenso sobre o valor de 33 kPa associada à capacidade de campo (Lopes, 2011). Por este método, foi estimado os valores da umidade volumétrica da capacidade campo ( $\theta_{cc}$ ).

Para as amostras ensaiadas os valores encontrados para  $\theta_{33}$  do SF foi de  $0,225\text{m}^3/\text{m}^3$  (14,95%, em termos de teor de umidade gravimétrico), enquanto o SG em torno 0,142, que corresponde a 11,02% de teor gravimétrico.

Com aumento do conteúdo volumétrico de água no solo ocorre uma diminuição da sucção e também reduz a tortuosidade do caminho da difusão, conseqüentemente, a difusão é favorecida, esse comportamento encontrou-se nas amostras de SF (Figura 50 . f) e SG (Figura 51.f).

#### 4.7. ENSAIO DE COLUNA COM SENSORES DE UMIDADE

O ensaio de coluna foi executado com os dois tipos de cobertura desta pesquisa, CONV e BARCAP. A quantidade de água precipitada sobre as colunas foi baseada nos estudos das lâminas de chuva máxima diária e das lâminas de chuvas com maior ocorrência na região de Marabá-PA, no período de 30 anos, obtidos pelo INMET e ANA.

Os incrementos de lâminas precipitadas foram as equivalentes a 86 mm (precipitação pluviométrica máxima diária), 10 mm (precipitação pluviométrica de maior frequência relativa) e 20 mm (precipitação com a segunda maior frequência relativa). A quantidade de água inserida nas colunas foi proveniente de cálculo de lâminas e transformadas em volume de água, que foi precipitada nas colunas com auxílio de um chuveiro localizado sobre o topo da coluna. Os dados de moldagem inicial desses solos que compõem as coberturas estão na Tabela 13.

Tabela 13. Dados de moldagem dos solos das coberturas para o ensaio de coluna.

Dados de Moldagem dos CPS	CONV	BARCAP	
	SF	SF	SG
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	27,1	27,1	28,1
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,7	18,7	17,8
$W_{\text{moldagem}}$ (%)	13,90	13,90	9,90
$W_{\text{ótima}}$ (%)	14,60	14,60	10,50
$\gamma_d$ moldagem (kN/m <sup>3</sup> )	16,4	16,4	16,2
$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,7	19,7	20,3
n (%)	40	40	42
e	0,70	0,70	0,70
GC (%)	83	83	80
S (%)	60	60	38

$\gamma_s$ : Peso específico dos sólidos;  $\gamma$ : peso específico;  $W_{\text{moldagem}}$ : umidade de moldagem;  $W_{\text{ótima}}$ : Umidade ótima;  $\gamma_d$  moldagem: peso específico aparente seco de moldagem;  $\gamma_{d\text{máx}}$ : peso específico aparente seco máximo; n: porosidade; e: índice de vazios; GC: grau de compactação; S: saturação

Fonte: Autora (2023)

A primeira análise da infiltração de água no solo nas colunas foi com a inclusão da lâmina máxima de precipitação pluviométrica diária de 86 mm, em um dia.

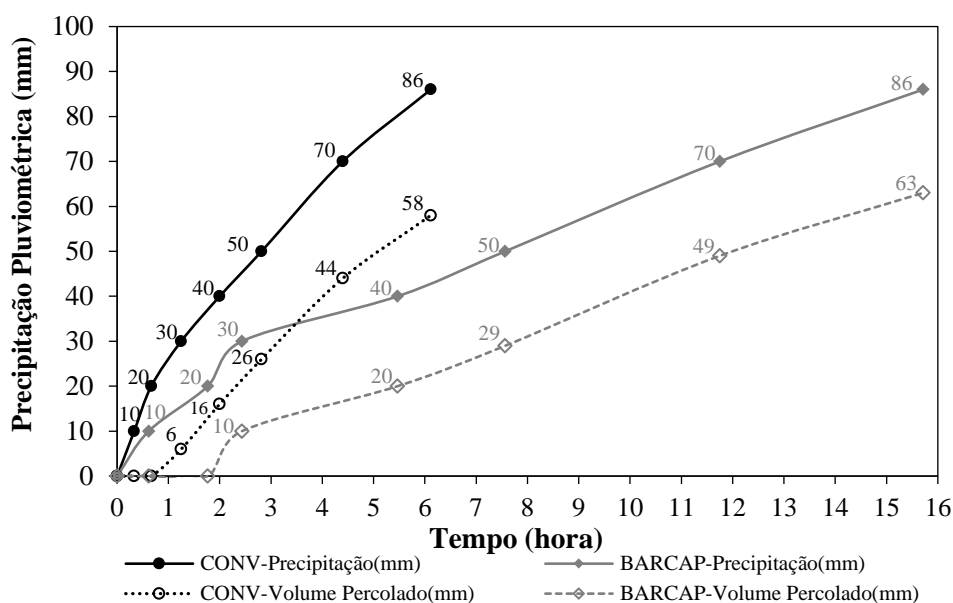


A segunda análise da infiltração foi semelhante a primeira análise, porém com ciclos de 5 dias, ou seja, a coluna recebeu por dia uma lâmina de chuva de 10 mm, que é a lâmina de maior ocorrência na área de estudo.

E a terceira análise da infiltração de água nas colunas ocorreu com ciclos de 5 dias, que recebeu por dia uma lâmina de chuva de 20 mm, que também é um valor de lâmina de chuva proeminente no município.

Para inclusão de água de chuva compatível com a precipitação pluviométrica máxima de 86 mm na coluna de PVC da cobertura CONV e BARCAP, a sequência de inclusão de lâminas de água de chuva foi nesta ordem 10 mm, 10 mm, 10 mm, 10 mm, 10 mm, 20 mm e 16 mm. Dentro dessa perspectiva, a Figura 52 apresenta-se o resultado do ensaio de coluna nas duas coberturas de aterro sanitário.

Figura 52. Precipitação e percolação versus tempo para coberturas CONV e BARCAP.



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 14 e a Tabela 15 apresentam-se a tabulação de dados detalhada da infiltração nas coberturas pesquisadas.

Tabela 14. Ensaio de Coluna na Cobertura CONV, com lâmina de precipitação pluviométrica de 86mm.

Sequência de Precipitação Pluviométrica na Coluna (mm)	Volume precipitado na coluna (em ml)	Volume de água percolada pelo CP (ml)	Precipitação Pluviométrica acumulada na coluna (mm)	Volume de água percolado acumulado pelo CP (mm)	Precipitação Pluviométrica acumulada na coluna (ml)	Volume de água percolado Acumulado pelo CP (ml)	Tempo acumulado de Lâmina água até infiltrar (hora)
10	79	0	10	0	79	0	0,33
10	79	0	20	0	157	0	0,67
10	79	48	30	6	236	48	1,25
10	79	72	40	16	314	120	2,00
10	79	78	50	26	393	198	2,82
20	157	145	70	44	550	343	4,40
16	126	107	86	58	675	450	6,12

Fonte: Autora (2023)

Tabela 15. Ensaio de Coluna na Cobertura BARCAP, com lâmina de precipitação pluviométrica de 86mm.

Sequência de Precipitação Pluviométrica na Coluna (mm)	Volume precipitado na coluna (em ml)	Volume de água percolada pelo CP (ml)	Precipitação Pluviométrica acumulada na coluna (mm)	Volume de água percolado acumulado pelo CP (mm)	Precipitação Pluviométrica acumulada na coluna (ml)	Volume de água percolado Acumulado pelo CP (ml)	Tempo acumulado de Lâmina água até infiltrar (hora)
10	79	0	10	0	79	0	0,62
10	79	0	20	0	157	0	1,77
10	79	80	30	10	236	80	2,43
10	79	75	40	20	314	155	5,47
10	79	70	50	29	393	225	7,57
20	157	152	70	49	550	377	11,75
16	126	114	86	63	675	491	15,72

Fonte: Autora (2023)

Para as coberturas CONV e BARCAP, durante as duas primeiras introduções de lâminas de água de chuva de 10 mm pelo chuveiro, com vazão controlada pela bomba peristáltica, não ocorreu percolação até o becker inferior a coluna. Após isso, foi introduzida a terceira precipitação de 10 mm. A percolação começou e com 15 min iniciou a percolação por meio do solo que compõem a cobertura CONV com 55 min, enquanto que para BARCAP ocorreu com 1 hora e 43 min.

Ao finalizar a infiltração total de cada lâmina de água sobre o solo, foi então pesada água constante no becker e transformado em volume.

Na sequência, foram feitas duas inclusões de lâminas de água correspondentes a 10 mm e a percolação ocorreu com 4 min do início das duas tomadas do ensaio na cobertura CONV e com 8 min no caso da coluna com a cobertura BARCAP.

Em seguida incluiu água de chuva correspondente a 20 mm e demorou 49 min para infiltrar totalmente no solo que compõem a cobertura CONV e 4 horas e 11 min na cobertura BARCAP, tempo bem superior a outra cobertura.

Para completar a lâmina máxima de 86 mm correspondente a precipitação máxima diária ocorrida em Marabá, incluiu-se à ultima sequência com uma lâmina de chuva equivalente a 16 mm na coluna de PVC da cobertura CONV e BARCAP. A infiltração demorou 1 hora e 43 min para infiltração total em direção ao solo da cobertura CONV e 3 horas e 58 min para cobertura BARCAP.

Ao final do ensaio de coluna realizado com a coluna CONV e BARCAP, o total de água precipitada correspondente a 86 mm teve como água percolada pelo solo 58 mm para CONV e 63 mm para BARCAP. Em termos percentuais 66% da água total foi percolada durante 6 horas e 7 min na cobertura CONV e 73% na cobertura BARCAP, com tempo total de percolação de 15 horas e 43 min.

Como a coluna de PVC não tem condições de drenagem superficial e tomou-se cuidados para que a água permanecesse somente no interior da coluna com uso de papel filme no topo da coluna, pode-se concluir que 34% ficou armazenada na cobertura CONV e 27% na cobertura BARCAP. Como a cobertura CONV é formada por apenas o SF, que possui maior capacidade de retenção de água, por esse motivo pode ser justificado o percentual superior ao da BARCAP.

Para os ensaios de infiltração em todas as condições de ensaio sempre se formou uma lâmina de água sobre o solo. Após a passagem completa da lâmina de água para o interior do solo, a drenagem na base do experimento cessava.

O tempo de infiltração da cobertura CONV foi superior aos resultados do ensaio de coluna proposta no trabalho de Costa *et al.* (2018), pois cada uma das três simulações de 10 mm, o tempo foi de 20 min, 41 min, e 51 min para o solo puro compactado.

Lopes (2011) que comparou duas coberturas CONV e BARCAP, essa última cobertura apresentou taxa de infiltração anual bem superior, porém para períodos de altas precipitações apresentou tendência de um perfil uniforme na sua umidade. Ainda no trabalho realizou-se uma correlação entre umidade e infiltração na base, mensuradas em dias anteriores a chuvas acima de 10 mm, foi melhor na área de estudo BARCAP, sugerindo que não houve formação de caminhos preferenciais. Ou seja, ocorreu uma dificuldade maior para a percolação da água por meio dos dois solos que formam a BARCAP.

O mesmo comportamento foi observado por Catapreta (2008), que evidenciou em sua pesquisa um desempenho melhor da cobertura tipo barreira capilar. Igualmente relatado no trabalho de Stock *et al.* (2020) que mencionou melhor performance nesse tipo de cobertura, porém a realidade de precipitação pluviométrica anual é bem menor que a trabalhada nesta pesquisa, da ordem de 384 mm.

Ambos os trabalhos citados, justificaram a melhor performance devido o sistema BARCAP possuir a característica de ser formado por dois solos com texturas diferentes e isso pode ser uma das justificativas do retardamento da conclusão da percolação total. Pois, a água infiltrada passa primeiramente pelo solo fino, onde tem dificuldade devido sua permeabilidade mais baixa que o solo grosso, e ao chegar em contato com o solo grosso, que há mudanças de dificuldade de movimentação, mudança de gradiente e porosidade, a água apresenta uma espécie de sobressalto nesta interface imaginária entre os solos, motivando um movimento de capilaridade de parte dessa água.

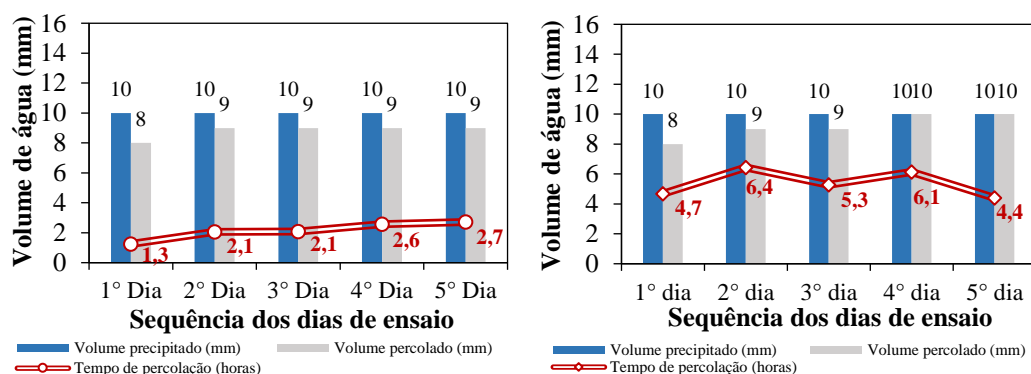
Alguns autores como Catapreta (2008) e Stock *et al.* (2020) explicam esse fenômeno como se fosse um “susto” que água tem no momento da mudança de solo e/ou da rutura hidráulica, e consequentemente promovendo a ascensão por capilaridade.

Outro ponto positivo do efeito de capilaridade a ressaltar é o fato da água, após ascensão, ficar mais próximo do topo da cobertura, o que é benéfico para maior evapotranspiração e consequentemente menor quantidade de água de chuva em

contato com os RSU e por conseguinte minimiza a geração de mais percolados (Hauser *et al.*, 2005; Hauser, 2009; Stock *et al.*, 2020).

A Figura 53 apresenta os resultados de infiltração obtidos por meio do ensaio de coluna para cobertura CONV frente a cinco sequências de lâminas de água de chuva de 10 mm, e a apresenta o resultado com as mesmas características de chuva para cobertura BARCAP.

Figura 53. Infiltração frente a precipitações de 10 mm (a) CONV e (b) BARCAP.



Fonte: Autora (2023)

O desempenho de cada cobertura em relação à volume percolado foi bem semelhante, com suave aumento de volume percolado na BARCAP, porém levando mais tempo para ocorrência dessa maior percolação. Tendo picos de maior tempo para as precipitações no 2º e no 4º dia de ensaio.

As Tabela 16 e Tabela 17 apresentam-se os resultados do ensaio de infiltração feito na coluna contendo os sistemas de cobertura CONV e BARCAP, respectivamente.

Tabela 16. Ensaio de Coluna na cobertura CONV, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 10mm.

Dias	Sequência de precipitação pluviométrica na Coluna (mm)	Volume de água percolado pelo CP (mm)	Tempo da lâmina água até infiltrar (hora)	Precipitação pluviométrica acumulada na coluna (mm)	Tempo acumulado de lâmina água até infiltrar (hora)
1º dia	10	8	1,3	10	1,3
2º dia	10	9	2,1	20	3,4
3º dia	10	9	2,1	30	5,5
4º dia	10	9	2,6	40	8,1
5º dia	10	9	2,7	50	10,8

Fonte: Autora (2023)

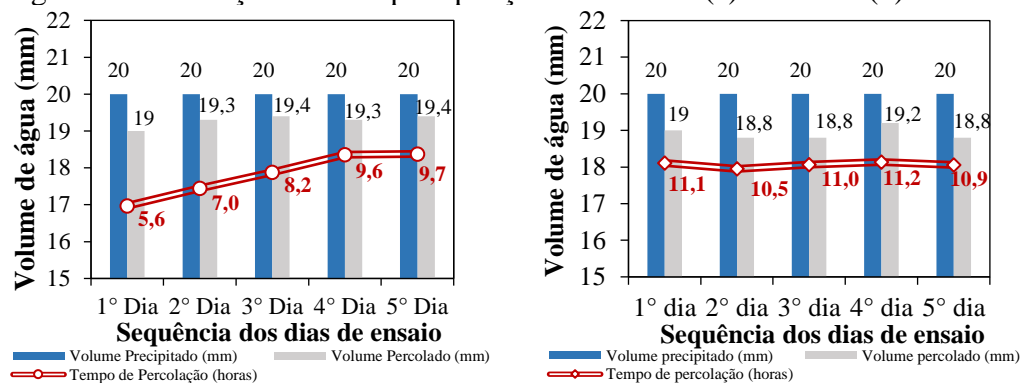
Tabela 17. Ensaio de Coluna na cobertura BARCAP, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 10mm.

Dias	Sequência de precipitação pluviométrica na Coluna (mm)	Volume de água percolado pelo CP (mm)	Tempo da lâmina água até infiltrar (hora)	Precipitação pluviométrica acumulada na coluna (mm)	Tempo acumulado de lâmina água até infiltrar (hora)
1º dia	10	8	4,7	10	4,7
2º dia	10	9	6,4	20	11,1
3º dia	10	9	5,3	30	16,4
4º dia	10	10	6,1	40	22,5
5º dia	10	10	4,4	50	26,9

Fonte: Autora (2023)

A Figura 54 apresenta os resultados de infiltração para precipitação correspondente a 20 mm para coberturas CONV e BARCAP.

Figura 54. Infiltração frente a precipitações de 20 mm (a) CONV e (b) BARCAP.



Fonte: Autora (2023)

Na Figura 54 percebe-se uma crescente de tempo de percolação, onde no primeiro dia ao incluir lâmina de chuva compatível a 20 mm no topo do solo da cobertura CONV obteve-se duração de 5,6 horas para água do topo infiltrar e ao mesmo tempo cessava-se a percolação de 19 mm no bercker.

No segundo dia, o tempo houve incremento de 1,4 horas para percolação de 19,3 mm, o dia seguinte com tempo de percolação de 8,2 horas para um volume percolado compatível a 19,4 mm.

O quarto e quinto dia apresentaram desempenho similares de tempo de infiltração de 9,6 horas e 9,7 horas respectivamente, e volume de água percolado de 19,3 mm e 19,4 mm para o quinto e último dia de ensaio de coluna para precipitação correspondente a 20 mm.

Ao impor ao sistema de cobertura BARCAP, uma precipitação pluviométrica de 20 mm, a média tempo de percolação foi de 10,94 horas para um volume médio de percolação por dia de 18,92 mm dos 20 mm precipitado no topo do solo.

O desempenho da coluna com sistema de cobertura BARCAP (Figura 54) apresentou tempo de percolação, de 54,7 horas, superior ao perfomado pela coluna com cobertura CONV. Essa última cobertura teve o total de volume percolado foi inferior, totalizando 94,6 mm ao final dos 5 dias de ensaio, com tempo de percolação total acumulado de 40,1 horas (Tabela 18). Enquanto a cobertura BARCAP teve como volume percolado de 113,40 mm (Tabela 19).

Tabela 18. Ensaio de coluna na cobertura CONV, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 20 mm.

Dias	Sequência de precipitação pluviométrica na Coluna (mm)	Volume de água percolado pelo CP (mm)	Tempo da lâmina água até infiltrar (hora)	Precipitação pluviométrica acumulada na coluna (mm)	Tempo acumulado de lâmina água até infiltrar (hora)
1º dia	20	19	5,6	20	5,63
2º dia	20	19,3	7,0	40	12,62
3º dia	20	19,4	8,2	60	20,85
4º dia	20	19,3	9,6	80	31,30
5º dia	20	19,4	9,7	100	41,10

Fonte: Autora (2023)

Tabela 19. Ensaio de Coluna na cobertura BARCAP, com cinco ciclos de lâmina de precipitação pluviométrica igual a 20 mm

Dias	Sequência de precipitação pluviométrica na Coluna (mm)	Volume de água percolado pelo CP (mm)	Tempo da lâmina água até infiltrar (hora)	Precipitação pluviométrica acumulada na coluna (mm)	Tempo acumulado de lâmina água até infiltrar (hora)
1º dia	20	19	11,1	20	11,10
2º dia	20	18,8	10,5	40	21,60
3º dia	20	18,8	11,0	60	32,60
4º dia	20	19,2	11,2	80	43,80
5º dia	20	18,8	10,9	100	54,70

Fonte: Autora (2023)



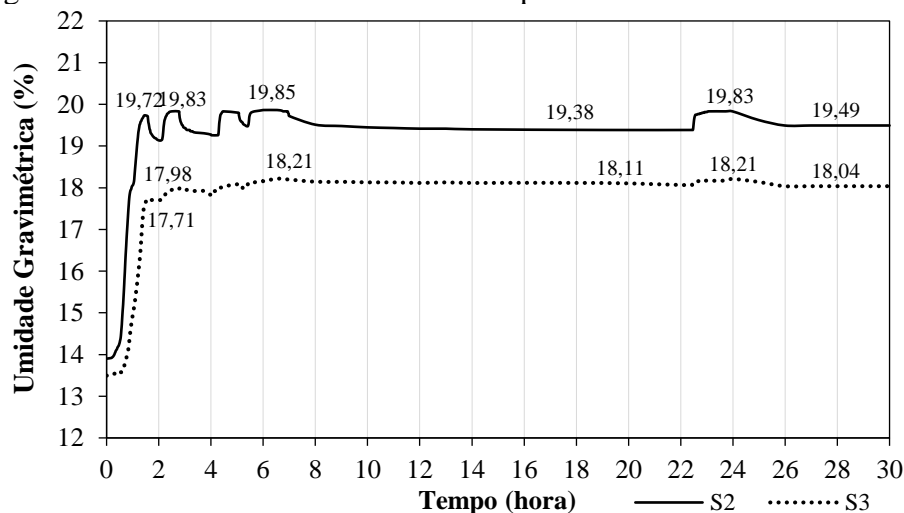
Ao comparar os tempos de percolação na coluna com sistema CONV com lâminas equivalentes a precipitação de 10 mm e de 20 mm, percebe-se que o tempo de percolação não foi proporcional ao volume de água imposto, uma vez que a média de tempo para a primeira precipitação foi de 2,16 horas, enquanto para a precipitação de 20 mm foi de 8,02 horas.

Ao contrastar o tempo de percolação para o sistema BARCAP para lâminas de chuva de 10 mm e 20 mm, percebeu-se linearidade nos resultados, pois para a menor precipitação a média de tempo de percolação foi de 5,38 horas, enquanto para precipitação de 20 mm a média de percolação foi de 10,94 horas, praticamente o dobro de tempo, o que se justifica por ser o dobro de volume precipitado na coluna.

Além das análises dos resultados de infiltrações, as colunas foram instrumentadas com sensores de umidade Teros 10, foi possível medir as umidades dos solos nos sistemas de cobertura CONV e BARCAP submetidas a lâmina de chuva máxima ocorrida de 86 mm com intervalos de medição de um em um minuto, para os sensores localizados a 7,5 cm do topo da coluna com a cobertura e o outro sensor situado a 12,5 cm do mesmo referencial.

Pontos de elevação e decaimento de umidade, pontos estacionários e ponte de saturação de cada solo que compõem cada sistema de cobertura ao longo do tempo para cobertura CONV (Figura 55).

Figura 55. Umidades na cobertura CONV para lâmina de chuva de 86 mm.



Fonte: Autora (2023)

Na primeira hora do ensaio, com inclusão da quantidade água correspondente a duas lâminas de chuva de 10 mm cada, verificou-se um aumento expressivo na curva de umidade no S2, mais próximo do topo do solo, saindo da zona ótima de umidade do SF que era de 13,90% para 18% (Figura 55).

Esse aumento de umidade acusado no sensor S2 não foi acompanhado na mesma grandeza pelo S3, podendo ser justificado por ser um sensor localizado numa posição mais abaixo do S2, ou seja, a água não acompanha o mesmo tempo de percolação para chegar nessa porção do solo onde se encontra o S3. Mesmo assim, percebeu-se um aumento na umidade que inicialmente era 13,79% e com avanço das infiltrações passou para 14,82%.

Para essa cobertura o instante do início da percolação foi de 55 min, correspondente ao intervalo de tempo em que se formava a terceira lâmina de 10 mm sobre o topo do SF e se estendeu até 1 hora e 15 min, tempo esse equivalente ao salto de umidade para 19,72%.

No intervalo entre a segunda e terceira hora de ensaio o sensor S2 apontou aumento também em sua umidade para 19,82% que não foi acompanhada pelo S3 pois o mesmo teve um leve aumento de 0,27% de umidade da primeira hora até a terceira hora de ensaio de infiltração, tendo um padrão de maior estabilidade de umidade o S3.

O maior de pico de umidade mensurado pelo S2 foi de 19,85%, entre a quarta e quinta hora de ensaio, que coincidiu com o intervalo de tempo que ocorreu a precipitação no topo do solo SF com a lâmina de água de 20 mm. Esse aumento na umidade no S2 também foi registrado no S3, onde o mesmo também acusou pico máximo de umidade de 18,21%. A partir das 7 horas de ensaio até 22 horas não houve inclusão de lâmina de água precipitada por ser no período noturno, e com isso houve certa estabilidade de umidade para os dois sensores da coluna, sendo o S2 acusando 19,38% e o S3 um valor de 18,11%. Após esse período, foi precipitada a última lâmina de água de 16 mm, e o S2 acusou aumento de umidade para 19,83% e o S3 para 18,23%, e não se notou grande mudanças nos valores de umidade.

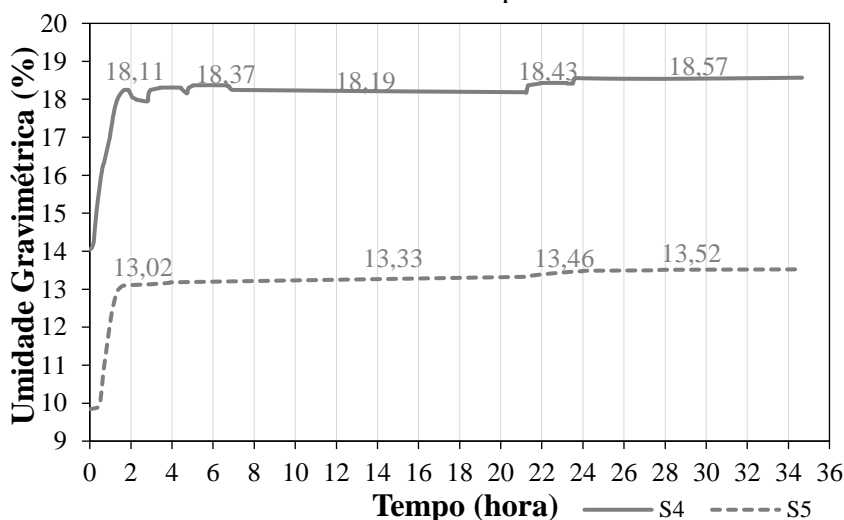
Com a finalização do ensaio, ainda se deixou os sensores por mais seis horas de leitura de umidade e percebeu-se uma leve perda de umidade, até atingir uma estabilidade de umidade para ambos sensores.

A Figura 56 apresenta-se os resultados de aumento de umidade até saturação do solo SF e SG, que compõe a cobertura BARCAP. Neste percebe-se uma resposta

no aumento de umidade mais suave do SF, comparado ao mesmo material presente na cobertura CONV, assim como menores picos de umidades e logo uma estabilidade de umidade frente as precipitações inseridas na coluna.

E quanto a resposta em relação a frente de umedecimento para o SG, observou-se um aumento significativo da umidade nas primeiras 2 horas de ensaio de coluna, e posteriormente a isso, uma estabilidade que a umidade não ultrapassou 13,52%.

Figura 56. Umidades na cobertura BARCAP para lâmina de chuva de 86 mm.

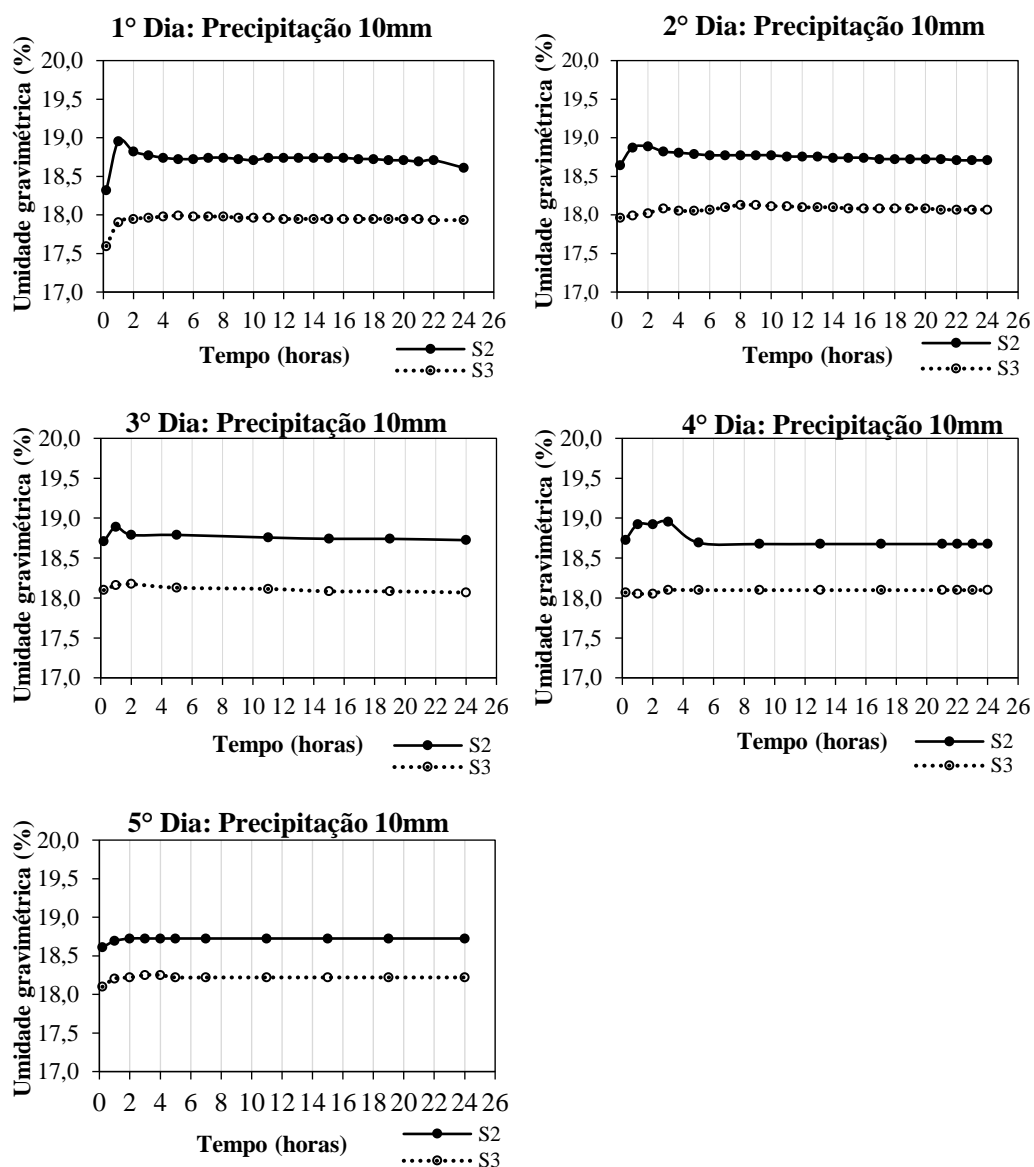


Fonte: Autora (2023)

A Figura 57 apresenta-se o desenvolvimento da umidade com o tempo frente aos cinco ciclos de lâmina de chuva de 10 mm, imposta ao sistema CONV.

Ao analisar o comportamento das curvas de umidade para cada frente de precipitação no topo do solo, percebe-se que no primeiro dia ocorreu um aumento de umidade acentuado na primeira hora de ensaio para cobertura CONV, passando de uma umidade 18,32% para 18,95% no S2, cuja posição está mais próxima a entrada de água na coluna. Enquanto para S3, ocorreu um aumento brando de 0,30%, e o solo já se apresentava com uma umidade inicial inferior ao do solo próximo do S2. A partir de 4 horas a contar do início do ensaio de infiltração, verificou-se uma estabilidade de umidade de 18,71% no S2 e de 17,95% no S3 (Figura 57).

Figura 57. Umidades na cobertura CONV com lâminas de chuva de 10 mm.



Fonte: Autora (2023)

Ainda é importante ressaltar que, esse aumento suave de umidade acusada pelos sensores ao longo dos dias é positivo, pois significa que os materiais de cobertura mantem sua umidade, mesmo com sucessivos episódios de chuva.

Do segundo ao quarto dia de ensaio de coluna na cobertura CONV com precipitação correspondente à 10 mm, verificou-se comportamento semelhante no S2, com aumento médio de 0,20% de umidade no solo SF, não ultrapassando 18,92% de umidade. Enquanto que para S3, a umidade inicial do segundo dia foi de 17,96% e estabilizou com 18,08% posteriormente a precipitação no topo do solo.

E para o terceiro e quarto dia de ensaio, o S3 apontou umidade inicial de 18,10% que perdurou durante todas 24 horas com o mesmo valor.

No quinto dia de ensaio de coluna, a umidade apontada por S2 era de 18,61%, e após 2 horas de ensaio apresentou um aumento para 18,72% que estabilizou ao longo do dia. Enquanto o S3 apontou incremento de 0,15% do início do ensaio até o final do ensaio de coluna, não superando valores acima de 18,25%.

Ao comparar os cinco dias de ensaio percebeu-se que o S2, que está localizado mais próximo da entrada de água no sistema apresenta respostas mais instantânea e com maior intensidade de grandeza.

Dentro dessa perspectiva, o maior incremento de umidade, de 0,63%, no solo apontada por S2 foi no primeiro dia de precipitação e o menor percentual foi no quinto e último dia que foi de 0,11%.

O grau de saturação de moldagem do CP no início de ensaio de coluna era de 60%, porém com aumento da umidade devido as etapas de precipitação atingiram o grau de saturação máximo durante a precipitação máxima de 86 mm, com umidade 19,83%, valores entre 80% a 85%. Como volume precipitado para 10 mm é inferior, ocorreu aumento de umidade menor no solo, e consequentemente menor valor de grau de saturação.

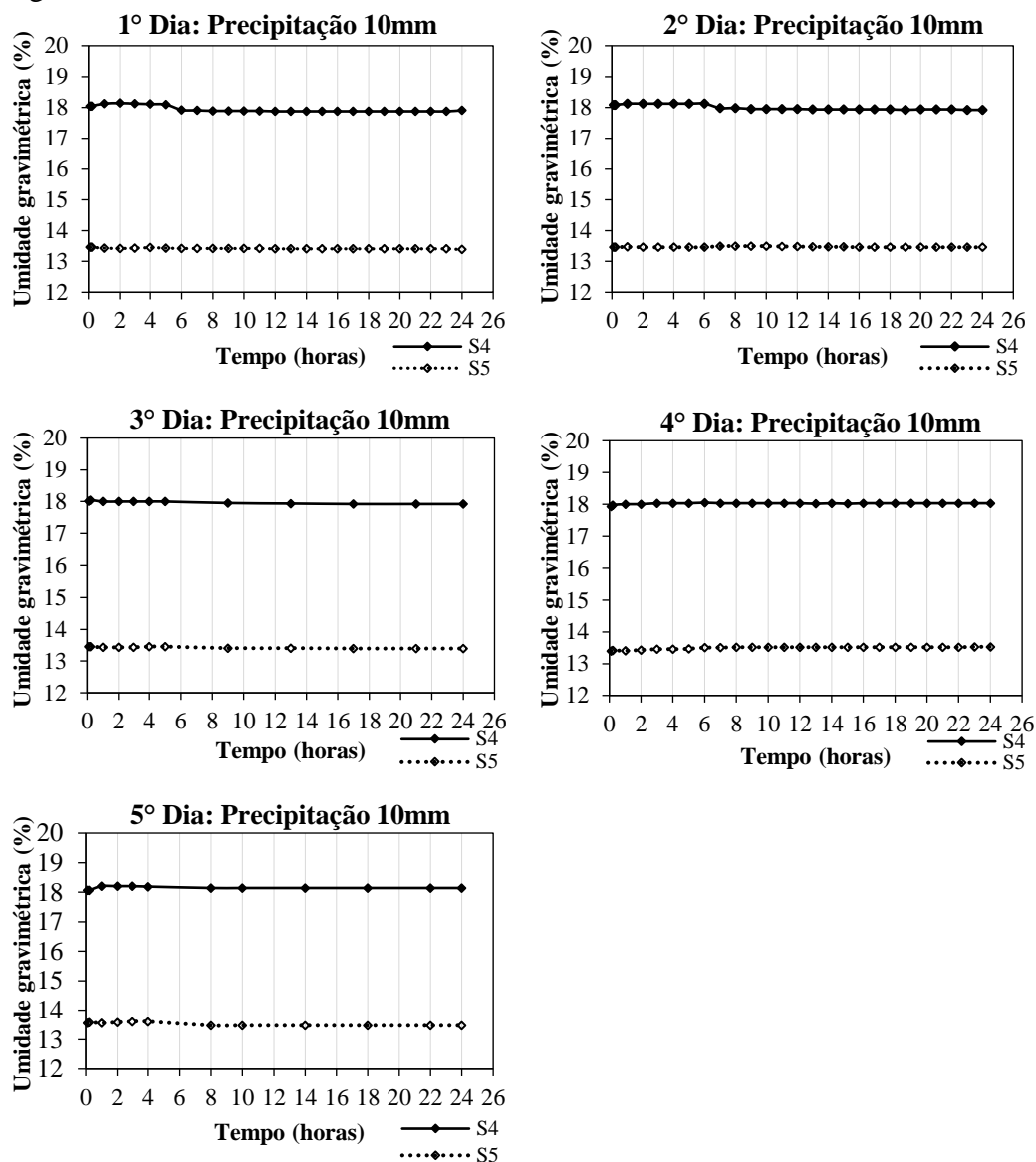
Enquanto para o S3 ao longo dos cinco dias de precipitação de 10 mm, teve um aumento de umidade bem menor quando comparado aos resultados de S2.

A Figura 58 apresenta-se uma variação do teor de umidade frente a cinco ciclos de lâmina de chuva de 10 mm em função do tempo para a cobertura BARCAP.

O comportamento da coluna composta pela BARCAP foi bem suave em termos de umidade em resposta a frente a precipitação de 10 mm.

Percebe-se ao longo dos cinco gráficos da Figura 58, que os sensores S4 e S5, apresentam em suas curvas de incremento de umidade imediata no início da precipitação e após 4 horas de ensaio a umidade retorna a sua condição inicial.

Figura 58. Umidades na cobertura BARCAP com lâminas de chuva de 10 mm.



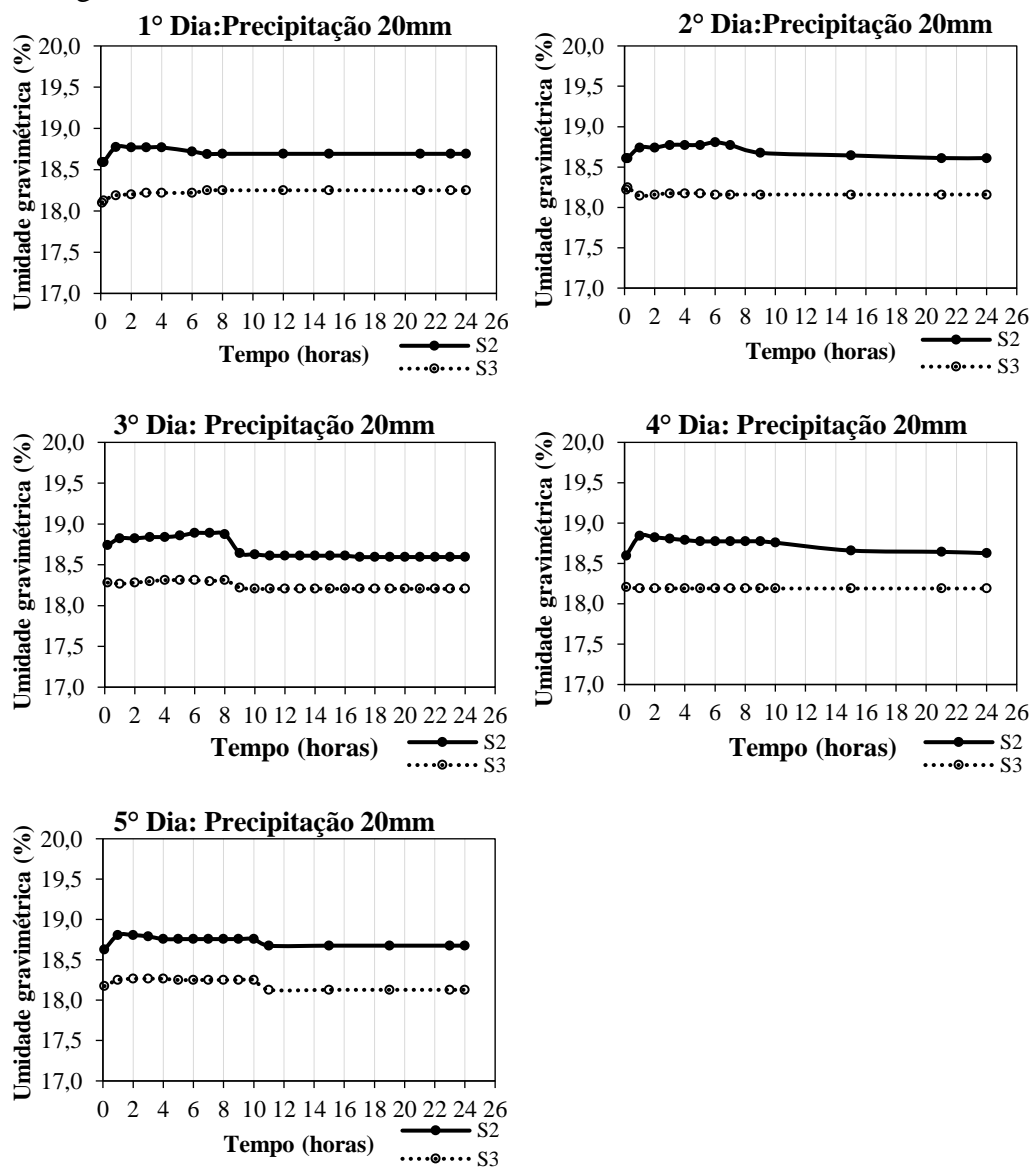
Fonte: Autora (2023)

A Figura 59 apresentam-se os resultados de infiltrações na cobertura CONV, as colunas foram instrumentadas em todos os ensaios com sensores de umidade Teros 10, para precipitação de 20 mm.

A Figura 59 representa-se o desempenho hidráulico como a umidade da cobertura CONV frente a precipitação pluviométrica equivalente a 20 mm, e percebe-se um retardo na permanência de umidade maiores nas primeiras oito horas de ensaio, e a partir disso um decrescimento na umidade apontada pelo S2. Esse acréscimo de umidade é inferior a 0,5%.

Na pesquisa de Costa *et al.*, (2018), o aumento de umidade, apontada por sensores de umidade, foi bem superior da ordem de 16%, com a simulação de 30 mm de chuva no ensaio de coluna lançados num único dia. Porém, foi decaindo ao longo das 72 horas posteriores da simulação de 30 mm na coluna CONV.

Figura 59. Umidades na cobertura CONV com lâminas de chuva de 20mm.



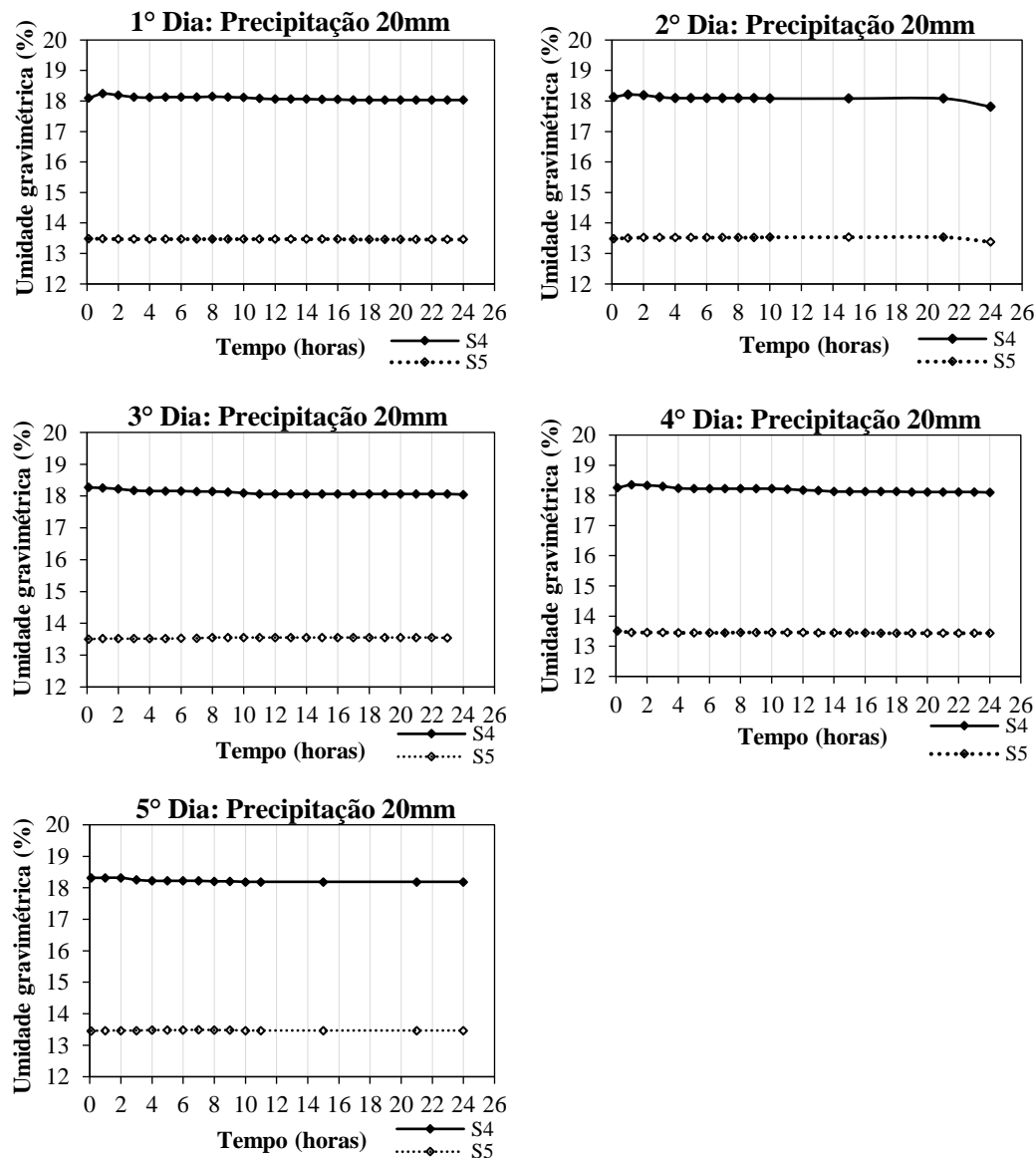
Fonte: Autora (2023)

Para o S3, a umidade tem discreto aumento no primeiro e no quinto dia de ensaio de coluna, não ultrapassando 0,12% de diferença da condição inicial de umidade de solo. Para os demais dias, o S3 iniciou uma com uma umidade maior

do que o mensurado ao longo do ensaio. mesmo com adição de precipitação de 20 mm no topo do solo da coluna BARCAP.

A Figura 60 apresentam-se os resultados de infiltrações na cobertura BARCAP, as colunas foram instrumentadas em todos os ensaios com sensores de umidade Teros 10, para precipitação de 20 mm.

Figura 60. Umidades na cobertura BARCAP com lâminas de chuva de 20 mm.



Fonte: Autora (2023)

Como resultado do ensaio de coluna no sistema BARCAP, para ambos os sensores ocorreu baixa variação de umidade ao longo do fluxo de água pelos dois



materiais que compõem essa cobertura. E após 4 horas de ensaio, todos os dias já apresentaram estabilidade nas umidades.

A BARCAP se manteve mais linear em sua umidade frente as precipitações quando comparada a CONV, durante o ensaio de coluna, se tornando mais eficiente em termos de sistema de cobertura.

#### 4.8. ENSAIO DE PERMEABILIDADE VIA ENSAIO DE COLUNA

Para a determinação da permeabilidade utilizou-se a configuração do ensaio de coluna com incremento de leituras específicas para determinar a condutividade hidráulica dos dois sistemas de cobertura final de aterro sanitários, que já estavam dispostas no interior das colunas de PVC. Os dados de moldagem dos corpos-de-prova e os resultados de permeabilidade das amostras SF e SG estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Características dos CPs e Permeabilidade dos solos

Características dos CPS	CONV	BARCAP	
	SF	SF	SG
$\gamma_s$	27,1	27,1	28,1
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,7	18,7	17,8
$W_{moldagem}$ (%)	13,90	13,90	9,90
$W_{ótima}$ (%)	14,60	14,60	10,50
$\gamma_{dmoldagem}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,4	16,4	16,2
$\gamma_{dmáx}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,7	19,7	20,3
e	0,70	0,70	0,70
GC (%)	83	83	70
S (%)	60	60	38

$\gamma_s$ : Peso específico dos sólidos;  $\gamma$ : peso específico;  $W_{moldagem}$ : umidade de moldagem;  $W_{ótima}$ : Umidade ótima;  $\gamma_{dmoldagem}$ : peso específico aparente seco de moldagem;  $\gamma_{dmáx}$ : peso específico aparente seco máximo; e: índice de vazios; GC: grau de compactação; S: saturação

Fonte: Autora (2023)

Os resultados dos coeficientes de permeabilidade das coberturas CONV e BARCAP, realizado simultaneamente com o ensaio de coluna estão apresentados nas Figura 61 e Figura 62.

Figura 61. Permeabilidade do sistema de cobertura CONV

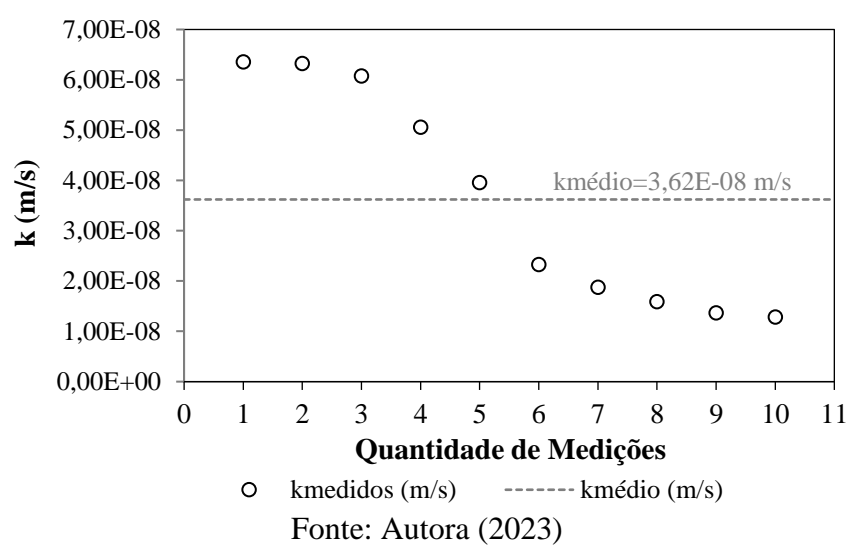
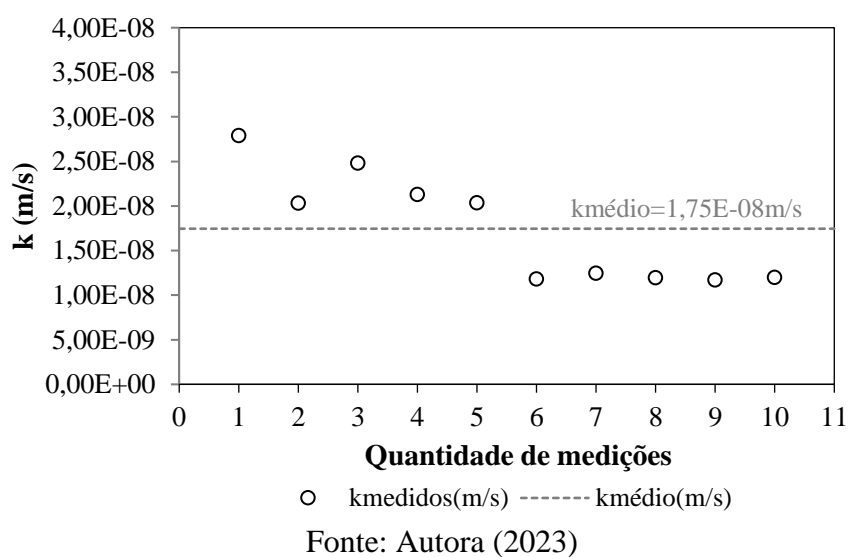


Figura 62. Permeabilidade do sistema de cobertura BARCAP



O valor médio de CONV encontrado foi de  $3,62 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ . O valor médio encontrado para coluna BARCAP de  $1,75 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ .

**Resultados do objetivo específico “d.”: comparar o desempenho do uso de cobertura final convencional com cobertura final evapotranspirativa - barreira capilar para os padrões de chuva da Amazônia Paraense.**

---

#### **4.9.DESEMPENHO DAS COBERTURAS**

O desempenho do sistema de cobertura depende do tipo de solo usado, espessura de cada camada, comportamento hidráulico do solo e condições climáticas locais (Albright *et al.*, 2004, 2006; Albright; Benson; Apiwantragoon, 2013, 2015; Perotti *et al.*, 2022).

Neste contexto, foi fundamental o entendimento do balanço hídrico climatológico, pois a cobertura final de um aterro sanitário está em contato com a atmosfera.

Dos resultados obtidos do balanço hídrico, destaca-se a percolação por ser a parcela que pode atingir os RSU ou ficar armazenada nos vazios dos solos que formam os sistemas de cobertura CONV ou BARCAP. Sabe-se que essa parcela de água pode passar ao longo da espessura da cobertura e atingir os RSU, e essa quantidade depende da capacidade de armazenamento de água nos vazios e a facilidade de infiltração de água nos solos que formam o sistema de cobertura.

Tendo em vista que o balanço hídrico climatológico ofereceu um panorama geral do que ocorreria em coberturas na região Marabá, os valores de percolação mensal necessitaram de análise mais discretizada no interior das coberturas CONV ou BARCAP.

Para isso, foram feitas algumas considerações com o valor obtido de percolação média mensal, calculou-se a percolação para a média diária, essa a resultante do quociente da percolação mensal pelo número de dias do mês, citado como cenário 1 (Tabela 21). Além disso, efetuou-se outro cenário de balanço hídrico com as precipitações pluviométricas máximas e ao longo desses 30 anos de série histórica, denominado de cenário 2. Esse último justifica-se por ser um cenário com maiores níveis de percolação máxima mensal na cobertura final, com valores superiores à média (Tabela 21).

Para ambos os resultados de percolação, utilizou-se o mesmo método de Thothwaite e Mather (1955) para o cálculo do balanço hídrico e em especial o valor da percolação.

Tabela 21. Cenários de percolação mensal e diária

<b>CENÁRIO 1</b>												
<b>PRECIPITAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS MENSAIS MÉDIAS (1991 A 2020)</b>												
<b>Componentes Hidrológicas (mm) / Meses</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<sup>1</sup> Precipitação Pluviométrica mensal	266	279	294	243	167	99	109	90	101	125	159	212
Percolação média mensal	75	97	93	55	0	0	0	0	0	0	0	20
Percolação média diária	2	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>CENÁRIO 2</b>												
<b>PRECIPITAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS MENSAIS MÁXIMAS (1991 A 2020)</b>												
<b>Componentes Hidrológicas (mm)/Meses com anos</b>	<b>Jan 1993</b>	<b>Fev 2018</b>	<b>Mar 1991</b>	<b>Abr 1998</b>	<b>Mai 1999</b>	<b>Jun 1995</b>	<b>Jul 1995</b>	<b>Ago 1991</b>	<b>Set 2016</b>	<b>Out 2011</b>	<b>Nov 1996</b>	<b>Dez 1992</b>
<sup>2</sup> Precipitação Pluviométrica máxima	563	483	481	508	543	571	652	403	305	293	393	462
Percolação máxima mensal	307	257	239	261	0	0	0	0	0	0	0	218
Percolação máxima diária	10	9	8	8	0	0	0	0	0	0	0	7

<sup>1</sup>Cenário 1: Precipitações pluviométricas médias no período de 1991 a 2020.

<sup>2</sup>Cenário 2: Precipitações pluviométricas máxima de cada mês e temperatura mínimas no período de 1991 a 2020.

Fonte: Autora (2023)

Ao avaliar o cenário 1 (Tabela 21), observou-se que a percolação ocorre entre os meses dezembro a abril e não ultrapassa 3 mm por dia. Em contrapartida, o cenário 2 mostrou resultados máximos de percolação de até 10 mm por dia no mês de janeiro, e no mês de fevereiro de 9 mm e nos meses de março e abril de 8 mm.

Por isso, selecionou-se o mês de março que apresenta a maior média mensal de precipitação pluviométrica da série histórica de 30 anos, e avaliou-se a percolação diária real do mês de março mais chuvoso, que foi no ano de 1991 (Tabela 22). E também, selecionou-se o mês de fevereiro que é o segundo mês com maior média mensal de precipitação para a mesma análise com percolação real diária (Tabela 23).

Tabela 22. Relação precipitação pluviométrica e percolação diária no mês de março de 1991.

<b>Dias Março (1991)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>
Precipitação pluviométrica diária (mm)	2,2	23,0	10,2	63,3	86,9	53,7	22,4	0	0	0	0,4	0	0	0	0,4	0	0	0	24,6	2,8	0	26,7	0,4	63,7	47,9	2,2	0	24,4	25,7	0	0
Percolação real diária (mm)	1,7	17,9	8,0	49,4	67,8	41,9	17,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19,2	0	0	11,6	0,3	49,7	37,4	1,7	0	19,0	20,0	0	0

Fonte Autora (2023)

Tabela 23. Relação precipitação pluviométrica e percolação diária no mês de fevereiro de 2018.

<b>Dias Fevereiro (2018)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>
Precipitação pluviométrica diária (mm)	3,9	0,1	52,9	3,9	43,7	75,1	5,0	0,5	14,3	37,3	1,0	1,7	8,3	7,7	6,7	7,2	7,8	47,2	1,4	23,9	7,2	45,4	4,4	0,9	70,5	2,9	0,6	1,8
Percolação real diária (mm)	3,0	0,1	41,3	3,0	34,1	58,6	3,9	0,4	11,2	29,1	0,8	1,3	6,5	6,0	5,2	5,6	6,1	36,8	1,1	18,6	5,6	35,4	3,4	0,7	55,0	2,3	0,5	1,4

Fonte Autora (2023)

Nos dias que ocorreram precipitação pluviométrica sempre aconteceu percolação, com exceção de chuva lâmina de 0,4 mm (Tabela 22). A percolação para o interior da cobertura foi de cerca de 75% da quantidade de precipitação pluviométrica do mês de março no ano de 1991 (Tabela 22), sendo a percolação máxima de 67,8 mm, ocorrida no quinto dia de março.

No mês de fevereiro de 2018, a maior percolação ocorreu no sexto dia, com o total de 58,6 mm, proveniente de uma precipitação pluviométrica diária de 75,1 mm (Tabela 23), que correspondeu a 78% da precipitação pluviométrica. Nesse mês, todos os dias ocorreram eventos de chuva e com formação de percolação.

O espaçamento de dias com precipitação pluviométrica e consequentemente a percolação também foi algo interessante de analisar. O espaçamento de ocorrência de chuvas no mês de março para série histórica de 30 anos tem uma média de 2,13 dias, enquanto para o mês de março de 1991, percebesse a ocorrência de espaçamento em três momentos de 3 dias sem chover, e outros dois momentos com espaçamento de apenas 1 dia sem chover, e o último evento com 2 dias sem chover. Isso no campo, pode alterar o estado de umidade inicial da cobertura, dependendo da temperatura, e consequentemente a evapotranspiração e percolação.

Ao comparar com os resultados dos ensaios de coluna executados no laboratório, observa-se que para uma percolação de 70 mm na cobertura CONV (próxima ao valor de percolação máxima diária de março de 67,8 mm), se teve 26 mm de água armazenada nos vazios do solo e 44 mm foi drenado para parte inferior do sistema de cobertura, com duração de 4,4 horas (já mostrado na Tabela 14). Para as mesmas circunstâncias de precipitação, mas para cobertura BARCAP, o valor armazenado nos solos foi de 21 mm e valor de água percolado foi de 49 mm, com duração de 11,75 horas (elucidado na Tabela 15). Portanto o desempenho da cobertura BARCAP teve melhor desempenho comparada a cobertura CONV.

Ao se falar de desempenho, percebe-se que na cobertura BARCAP demorou mais tempo e, portanto, melhor desempenho, cerca 7,35 horas a mais do que a cobertura CONV, para o mecanismo total de percolação em direção a parte inferior das coberturas, resultados oriundos do ensaio de coluna realizados.

As coberturas evapotranspirativas devido a diferença de granulometria entre os dois solos que formam a cobertura, causa na água percolada uma diferença de gradiente e pressão que faz com que essa água ao chegar na interface com o solo

grosso, parte dela retorne para o solo fino por capilaridade (Catapreta, 2008; Zhang, 2008; Hauser, 2009; Zhang; Sun, 2014).

No campo, se essa água retorna para mais próximo da superfície atmosférica ainda pode ocorrer a evaporação, mas no laboratório entende-se que essa água retornada pode permanecer nos vazios do solo fino por mais tempo, até descer novamente para o solo grosso, mas isso demanda um tempo maior. Então, a água volta para o solo grosso e posterior encaminhamento para o inferior do solo quando a força da água no SF é maior do que a sucção, pois nesse instante se encontra novamente elevada devido a menor umidade. Diferente da cobertura CONV que é formada por um único tipo de solo, e não há gradiente de granulometria e a água só precisa vencer a permeabilidade do solo.

Portanto, diante dos resultados obtidos experimentalmente, entende-se que na prática, para esse regime de precipitação pluviométrica e nível de percolação, a cobertura BARCAP teria um melhor desempenho hidrológico comparado a cobertura CONV. Aliado ainda a possíveis maiores níveis de evaporação dessa água localizada mais próxima da atmosfera e consequentemente menos volume percolado para parte inferior e até abaixo do sistema de cobertura, cumprindo com mais eficiência a minimização da infiltração para diminuição da parcela contributiva de água de chuva na geração de lixiviado, no caso prático de aterros sanitários.

Em relação a evolução das umidades dos solos que formam a cobertura CONV em função da percolação, percebe-se mudanças crescente e rápida nas primeira 2 horas de ensaio (compatíveis a percolação de 40 mm), passando de uma umidade de 13,90% para 19,72% (diferença de 5,82%), para o sensor de umidade localizado mais próximo ao topo do CP, e de 13,52% para 17,98% (diferença de 4,46%) de umidade apontado no S3, localizado mais na base do CP (Figura 55). Após atingir 17,72% de umidade, o S2 oscilou pouco o valor não ultrapassando 19,83%, e o S3, teve seu máximo de umidade de 18,21%. Essa estabilidade na umidade inicial para o material SF a partir de frente de umedecimento em torno de 18% e grau de saturação acima de 85%, durante o ensaio de coluna como foi mostrado anteriormente na Figura 55.

Para o SF da cobertura CONV ao ter lâminas acima de 20 mm, a umidade apontada pelos sensores sobe abruptamente, já acusando um solo com grau de saturação elevado (acima de 85%), ao passo de ser iminente ao início da percolação

para parte inferior do sistema de cobertura, com 45 min do início do ensaio (no laboratório foi quantificado no becker, nas obras seria parte contributiva da precipitação aos resíduos).

Outro fator que influenciou no desempenho da cobertura foi o conteúdo de água e sua sucção que foram fornecidos nas curvas de retenção de água de cada um dos solos que formam as coberturas (Costa, 2015; Costa *et al.*, 2018; Gitirana *et al.*, 2022; Lopes, 2011; Santos, 2015). Por sua vez, a sucção do SF compactado não foi suficiente para contribuir significativamente no armazenamento de água nos vazios do solo, para dada umidade de compactação que foi na  $W_{ot}$  e somado a molhagem, a tendência foi a diminuição da sucção com o aumento da umidade no interior dos solos (

Figura 50).

Enquanto na coluna do sistema BARCAP, o S4 (mais no topo) apontou umidade inicial de 14,06% e chegou até 18,11% (diferença de 4,06%) nas primeiras 2 horas do início da percolação, porém com pouco menos de 30 mm de lâmina de chuva na coluna. Para o mesmo sensor, entre 2 horas até 24 horas, sempre acusando uma crescente de umidade e partir de 24 horas estabilizou com 18,57%. Retratando, muitas vezes esse retorno de água por capilaridade para o SF e consequentemente o aumento de umidade do solo apontado pelo sensor, esse comportamento diverge da cobertura CONV. No S5, que estava no SG, a umidade nesse mesmo tempo alterou de 9,97% para 13,02% e não ultrapassou ao longo do ensaio o valor de 13,52%.

A cobertura BARCAP formada por dois solos com granulometria e coeficiente de permeabilidade distintos, além de terem sido compactados no interior das colunas com umidade de moldagem diferentes (zona de  $W_{ot}$  de cada solo), e consequentemente se comportaram de maneiras diferentes frente aos umedecimentos provenientes da lâmina de chuva, apontados pelos sensores de umidade durante o ensaio de coluna. Mas, a percolação completa atingindo a parte abaixo do sistema de cobertura também ocorreu após a lâmina de chuva de 20 mm, porém com 1 hora e 43min após o início do ensaio de coluna. Ou seja, tempo superior ao necessário para o início da percolação comparado a cobertura CONV, que foi 43 min.

Tendo isso posto, o SF da BARCAP nas primeiras 2 horas de ensaio saiu de uma umidade inicial de 14,06% até o pico de 18,11%, apresentando já um grau de



saturação acima de 85% e por isso iniciou o mecanismo de percolação até o inferior da cobertura. O SG, com 2 horas de ensaio já apresentava grau de saturação em torno de 90%. A sucção para ambos os solos da cobertura BARCAP não foi suficiente para contribuir significativamente no armazenamento de água nos vazios do solo.

Diante dos resultados obtidos, a umidade inicial dos solos, compactação e disposição das camadas de solos nos interiores das colunas influenciaram também a performance de cada sistema de cobertura final de aterro sanitário.

Entende-se que o comportamento da água no interior no meio poroso, representa as mais variadas lâminas provenientes de precipitação pluviométrica em solos que formam as coberturas de aterros sanitários, simuladas experimentalmente via ensaio de coluna.

Na Tabela 24 apresentam-se os resultados de outros trabalhos científicos que verificaram o desempenho cobertura tipo BARCAP. E que mesmo com outros cenários de precipitação pluviométrica, bem inferiores ao que ocorre num município da Amazônia, também tiveram melhores resultados para esse tipo de cobertura final.

Tabela 24. Desempenho de cobertura de outros trabalhos

Autores	Área estudo	Precipitação média anual (mm)	Precipitação anual máxima (mm)	%	Tipo de Cobertura
Presente Estudo	Marabá (Brasil,PA)	2143	3622	-	CONV BARCAP
Zhang e Sun (2014)	Suzhou (China)	810	-	38	BARCAP CONV
	Filadelfia (USA)	910	-	43	
	Juneau (USA)	1000	-	47	
Stock <i>et al.</i> (2020)	Colorado (USA)	415	-	20	BARCAP
Lopes (2011)	Recife (PE, Brasil)	2260	-	105	BARCAP CONV
Vieira (2004)	São Paulo (SP, Brasil)	1422	-	66	BARCAP

Fonte: Autora (2023)

Com exceção do trabalho de Lopes (2011), as demais pesquisas tiveram como área de estudos com precipitações pluviométricas anual inferiores ao que ocorre em Marabá-PA, que é de 2143 mm. E mesmo com elevada precipitação na região estudada, verificou-se que a cobertura final BARCAP apresentou melhor eficiência comparada com a cobertura CONV, sendo também verificado essa superioridade da cobertura BARCAP em todos os trabalhos citados na Tabela 24.

O ensaio de coluna se aproximou do que ocorre no campo, mesmo em escala reduzida, e entende-se que no campo a barreira capilar ainda contará com o fator evapotranspiração, podendo então ter desempenho ainda mais superior do que a cobertura CONV, pois favorecerá a uma menor percolação.

Outro ponto diferenciado da cobertura BARCAP, foi a suavidade do aumento de umidade frente as precipitações impostas na coluna, de forma a aguentar com mais eficiência a água em seus vazios por mais tempo.

Tendo em vista que todos os projetos na Amazônia têm necessidade de se considerar a chuva local, abordagens que levem ainda mais profundidade na análise do comportamento dos solos e outros materiais de cobertura são essenciais para o êxito e segurança dos aterros sanitários.

Até o ano 2023, o Estado do Pará conta com apenas um aterro sanitário, localizado na região metropolitana da capital Belém. A cobertura final desse aterro sanitário é do tipo CONV e Belém tem precipitação pluviométrica média anual aproximadamente de 3600 mm, ou seja acima do que a precipitação de Marabá. Por isso, entende-se na importância de avaliar a influência do balanço hídrico em cada região de implantação de novo aterros sanitários. O município foco desta pesquisa não possui aterro sanitário, e conta apenas com um aterro controlado.

Para situações de municípios na Amazônia, que possuem precipitações pluviométricas elevadas comparadas a outras localidades, entende-se que a cobertura final de aterro exerce papel importante na minimização da percolação e na geração de lixiviado. Esta pesquisa mostrou que mesmo a cobertura BARCAP apresentando melhor desempenho, ainda assim para segurança ambiental é necessário o estudo de outras configurações de sistemas de cobertura, avaliação de espécies vegetais e suas raízes para aumento da evapotranspiração e/ou até a inclusão de materiais mais impermeáveis como o PEAD.

## 5. CONCLUSÃO

- O presente estudo avaliou o desempenho hidrogeotécnico de dois tipos de cobertura final de aterro sanitário, tipo CONV e BARCAP, considerando o balanço hídrico do município de Marabá localizado na Amazônia Paraense.

- A composição dos materiais de cobertura final do aterro sanitário, a partir das análises granulométricas, revelaram que os dois solos, por mais que sejam do mesmo perfil geológico, da formação Itapecuru, apresentam granulometrias distintas, tal que a amostra SF tende a ser mais argilosa que a SG, possui percentual maior da fração areia.

- Existe viabilidade técnica da utilização de solos tropicais da região amazônica paraense em cobertura final de aterro sanitário, mediante aos resultados encontrados durante o desenvolvimento da pesquisa.

- Este trabalho conduziu pesquisa com envolvimento de duas grandes áreas o estudo dos recursos hídricos dos dados hidrológicos de um município da Amazônia e a geotecnia dos solos amazônicos representativos que compuseram dois tipos de cobertura final de aterro sanitário.

- Dado que o sistema hidrológico da Amazônia se diferencia de todo o mundo devido à presença da grande floresta, rios caudalosos, dentre outros elementos que associados à sua localização próxima à linha do Equador, torna imprescindível que análises criteriosas para a determinação de parâmetros técnicos na área do saneamento sejam efetivadas.

- Desta forma, neste trabalho foi realizada a análise dos dados hidrológicos no período de 30 anos, de 1991 a 2020, que possibilitou constatar que os maiores índices pluviométricos se concentraram no mês de março, enquanto os meses mais secos ficaram entre junho e novembro. Já em termos de variabilidade da precipitação pluviométrica, janeiro foi o mês que apresentou o maior valor significativo.

- Em consonância, considerando as condições da sazonalidade na Amazônia, observou-se que os dias mais chuvosos da cidade de Marabá estão entre os meses de dezembro a maio. Destacando-se novamente a ocorrência pluviométrica no mês de março, o qual apresentou incidência média de mais de 20 vezes em todos os anos estudados. Situação adversa a dos meses de junho e agosto, considerados como

parte do período seco, apresentaram, em média, mais de 20 dias sem chuva ao longo do período analisado.

- As lâminas de precipitação pluviométrica diária com maior frequência são as de até 10 mm e em seguida as até 20 mm, para o município de Marabá-PA. Esses valores foram utilizados para os ensaios de coluna para verificação da percolação pelo tempo e as umidades por meio de sensores. A cobertura BARCAP em todos os ensaios de coluna apresentou tempo maior para percolação de água de chuva comparada com a cobertura CONV. Assim, como a lâmina máxima diária ocorrida que se igualou a 86 mm.

- Cerca de 90% das lâminas de chuvas diárias que ocorreram em Marabá foram entre 0,1mm e 20 mm, levando em conta o período de 30 anos de análise de dados de precipitação pluviométrica.

- Os meses com maior espaçamento de dias sem episódios de chuvas foram julho e setembro, com média de 10 dias, enquanto os meses com menores espaçamentos sem chuva foram fevereiro e março.

- Dessa forma, o estudo hidrológico a partir do balanço hídrico permitiu determinar a percolação nos meses em que ocorreram os excedentes hídricos, ou seja, quando a precipitação excedeu os valores de evapotranspiração, nos meses de dezembro a abril.

- A percolação está diretamente relacionada à quantidade de precipitação pluviométrica mensal, atingindo valores nulos ou negativos nos meses de menor eventos de chuvas e/ou chuva com lâmina de água não suficientes para saturar o solo e assim ocorrer a percolação.

- Os meses com maiores precipitações pluviométricas foram coincidentes com os meses de maiores valores de evapotranspiração, de dezembro a maio.

- A partir da determinação do balanço hídrico climatológico para o município de Marabá-PA, foi possível o estudo das camadas de cobertura para aterro sanitário, com destaque para as camadas de cobertura final, as quais prioritariamente devem compor um sistema de proteção e serem capazes de suportar bruscas variações de sazonalidade.

- A cobertura BARCAP apresentou melhor desempenho nos ensaios de coluna, pois seu tempo de percolação foi superior ao se comparar com o tempo de percolação da cobertura CONV. Além disso, mediante a inserção de lâminas de água de chuva, os sensores de umidade, localizado na coluna BARCAP, apontaram

menores picos nos valores de umidade e uma estabilidade deste parâmetro ao longo do tempo de medições.

- Ao avaliar o desempenho da cobertura BARCAP com outros trabalhos da literatura, percebe-se que mesmo com elevados índices pluviométricos do município localizado na Amazônia, ainda assim esse tipo de cobertura teve melhor desempenho.

- Na região metropolitana de Belém, capital paraense, há um aterro sanitário, e com índice pluviométrico superior a Marabá. A cobertura final neste aterro é do tipo convencional. Logo, outra cobertura pode aumentar o seu desempenho, como mostrou esse estudo.

- Entende-se que ambas as coberturas pesquisadas permitiram percolação e consequentemente contribuição na geração de lixiviados nos meses de dezembro a abril. Porém, caso tenham interesse em minimizar ainda mais essa percolação, essas coberturas podem ser utilizadas combinadas com geomembranas, para oferecer maior segurança ambiental e menor custo no tratamento de lixiviados gerados.

Além de que, o estudo mostrou a importância da realização do balanço hídrico local e estudos geotécnicos para solos Amazônicos para elaboração de projetos de cobertura final de aterros sanitários, especialmente em locais onde o padrão de precipitação pluviométrica é significativa, porém, muito ainda precisa ser investigado. Dessa forma sugere-se que novos estudos sejam realizados, como:

- Modelagem em métodos de elementos finitos para avaliação mais discretizada frente a umidade nas coberturas de aterros sanitários em regiões de clima tropical como a Amazônia.

- Realizar correlações entre os resultados extremos de precipitação pluviométrica com os fenômenos ENOS para região amazônica, em particular para a cidade de Marabá-PA.

- Testar outros materiais e sistemas de coberturas alternativos, como rejeitos de mineração ou resíduos de construção civil.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6508/1984. Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos. Rio de Janeiro – RJ. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459/16. Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro – RJ. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457/86. Amostra de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro – RJ. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/2016. Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180/16. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro – RJ. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182/16. Solo – Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal. Rio de Janeiro – RJ. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419/92. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro - RJ. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13896/97 - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, construção e operação", **ABNT**, p. 13, 1997. .

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14545-Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. 2000.

ABRELPE. "Panorama dos Resíduos no Brasil", **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**, p. 64, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>

ABUSHAMMALA, M. F. M., YOUNES, M. K. "LFG emission and CH<sub>4</sub> oxidation measurements in a tropical climate: Spatial and seasonal variations", **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 44, n. 2, p. 101–111, 2018. DOI: 10.5276/jswtm.2018.101. .

AFONSO, M. H. F., SOUZA, J. V. de, ENSSLIN, S. R., *et al.* "Como Construir Conhecimento Sobre O Tema De Pesquisa? Aplicação Do Processo Proknow-C Na Busca De Literatura Sobre Avaliação Do Desenvolvimento Sustentável", **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47–62, 2012. DOI: 10.5773/rgsa.v5i2.424. .

AHMED, S., KHANBILVARDI, R. M., FILLOS, J., *et al.* "Two-dimensional leachate estimation through landfills", **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 118, n. 2, p. 306–322, 1992. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:2(306). .

AL-ZUBIDY, A., CARVER, J. C. **Identification and prioritization of SLR search tool requirements: an SLR and a survey**. [S.l.], Empirical Software Engineering, 2019. v. 24.

ALBRIGHT, C. H. BENSON, A. SAWANGSURIYA, B. TRZEBIATOWSKI, and W. H. "Postconstruction Changes in the Hydraulic Properties of Water Balance Cover Soils", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 1, n. October, p. 1–7, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133. .

ALBRIGHT, W.H., BENSON, C. H., GEE, G. W., *et al.* "Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 11, p. 1393–1403, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1393). .

ALBRIGHT, William H., BENSON, C. H., APIWANTRAGOON, P. "Field hydrology of landfill final covers with composite barrier layers", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 139, n. 1, p. 1–12, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000741. .

ALBRIGHT, William H., BENSON, C. H., GEE, G. W., *et al.* "Field Water Balance of Landfill Final Covers", **Journal of Environmental Quality**, v. 33, n. 6, p. 2317–2332, nov. 2004. DOI: 10.2134/jeq2004.2317. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.2134/jeq2004.2317>.

ALFAIA, R. G. de S. M., COSTA, A. M., CAMPOS, J. C. "Municipal solid waste in Brazil: A review", **Waste Management and Research**, Esse artigo será muito útil no ite2.1. do referencial teórico da qualificação. Que fa do Panorama dos RSU no mundo e no Brasil, v. 35, n. 12, p. 1195–1209, 2017. DOI: 10.1177/0734242X17735375. .

ALI, M., COURTENAY, P. "Evaluating the progress of the UK's Material

Recycling Facilities: A mini review", **Waste Management and Research**, v. 32, n. 12, p. 1149–1157, 2014. DOI: 10.1177/0734242X14554645. .

ALSLAIBI, T. M., ABUSTAN, I., MOGHEIR, Y. K., *et al.* "Quantification of leachate discharged to groundwater using the water balance method and the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model", **Waste Management and Research**, v. 31, n. 1, p. 50–59, 2013. DOI: 10.1177/0734242X12465462. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X12465462>.

APIWANTRAGOON, P., BENSON, C. H., ALBRIGHT, W. H. "Field hydrology of water balance covers for waste containment", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 141, n. 2, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001195. .

ARMAS, C., TORI, R., NETTO, A. V. "Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review", **Multimedia Tools and Applications**, v. 79, n. 5–6, p. 3495–3515, 2020. DOI: 10.1007/s11042-019-08141-8. .

ASTM D5298-10. 2010. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper, annual book of ASTM standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

BANAR, M., GÜNEY, Y., ÖZKAN, A., *et al.* "Utilization of Waste Clay from Boron Production in Bituminous Geosynthetic Barrier (GBR-B) Production as Landfill Liner", **International Journal of Polymer Science**, v. 2016, 2016. DOI: 10.1155/2016/1648920. .

BAPTISTA, M., CARVALHO, R. V. de, FAGUNDES, P. H. P. da R. M., *et al.* "Análise de tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil", **Tec-Usu**, v. 2, n. 1, p. 55–72, 2019. .

BASHIR, R., SHARMA, J., STEFANIAK, H. "Effect of hysteresis of soil-water characteristic curves on infiltration under different climatic conditions", **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 2, p. 273–284, 2016. DOI: 10.1139/cgj-2015-0004. .

BECK-BROICHSITTER, S., GERKE, H. H., HORN, R. "Assessment of leachate production from a municipal solid-waste landfill through water-balance modeling", **Geosciences (Switzerland)**, v. 8, n. 10, 2018. DOI: 10.3390/geosciences8100372. .



BENSON, C. H., ALBRIGHT, W. H., ROESLER, A. C., *et al.* "Evaluation of final cover performance: field data from the alternative cover assesment program (ACAP)", **Waste Management Conference**, n. June 2014, p. 18, 2002. .

BENSON, C. H., BAREITHER, C. A. "Designing Water Balance Covers For Sustainable Waste Containment: Transitioning State-of-the-Art to State-of-the-Practice", **Geotechnical Engineering State of the Art and Practice**, p. 1–33, 2012. DOI: 10.1061/9780784412138.0001. .

BERGER, K., GROENGROEFT, A., GEBERT, J. "20 Years Performance Measurements of a Landfill Cover System With Components Constructed From Pre-Treated Dredged Sediments", **Waste Management**, v. 100, p. 230–239, 2019. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.09.016. .

BERGER, K. U. "On the current state of the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model", **Waste Management**, v. 38, n. 1, p. 201–209, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.013>.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: Tucci, C.E.M. (Org.) Hidrologia: Ciência e Aplicação Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 177-242, 2001.

BOGNER, J.E., SPOKAS, K. A., CHANTON, J. P. "Seasonal greenhouse gas emissions (methane, carbon dioxide, nitrous oxide) from engineered landfills: Daily, intermediate, and final California cover soils", **Journal of Environmental Quality**, v. 40, n. 3, p. 1010–1020, 2011. DOI: 10.2134/jeq2010.0407. .

BOGNER, Jean E., SPOKAS, K. A., CHANTON, J. P. "Seasonal Greenhouse Gas Emissions (Methane, Carbon Dioxide, Nitrous Oxide) from Engineered Landfills: Daily, Intermediate, and Final California Cover Soils", **Journal of Environmental Quality**, v. 40, n. 3, p. 1010–1020, 2011. DOI: 10.2134/jeq2010.0407. .

BONIDIA, R. P., RODRIGUES, L. A. L., AVILA-SANTOS, A. P., *et al.* "Computational intelligence in sports: A systematic literature review", **Advances in Human-Computer Interaction**, v. 2018, 2018. DOI: 10.1155/2018/3426178. .

BORTOLI, A. Y. H., GARCIAS, C. M. "O CONCEITO DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS A PARTIR DA para manutenção da vida nestes espaços ( Philippi Jr ; Romero ; Bruna , 2004 ). homem como um grande Os problemas provocados ao meio ambiente urbano têm como as principais causas

a alta densid", **Engenharia Ambiental - Espíri to Santo do Pinhal**, p. 25–43, 2016. .

BOSCOV, M. E. G., HEMSI, P. S. "Some topics of current practical relevance in environmental geotechnics", **Soils and Rocks**, v. 43, n. 3, p. 461–495, 2020. DOI: 10.28927/sr.433461. .

BRAGA, R. M. Q. L.; PINTO, C. de S.; BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. Tixotropia em solos remoldados. **Solos e Rochas**, v. 29, n. 2, p. 247-257, 2006.

BRASIL. "Lei Federal nº. 12.305, de 02 de agosto de 2010, Política Nacional de Resíduos Sólidos.", p. 1–19, 2010.

BRASIL. Novo Marco Legal de Saneamento. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2020. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm). Acesso em: 07 de fev. 2022.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010. Disponível em: Acesso em: 08 de jan. 2022.

CARRANZA, C., NOLET, C., PEZIJ, M., *et al.* "Root zone soil moisture estimation with Random Forest", **Journal of Hydrology**, v. 593, n. December 2020, p. 125840, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125840. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125840>.

CASAGRANDE, E., RECANATI, F., RULLI, M. C., *et al.* "Water balance partitioning for ecosystem service assessment. A case study in the Amazon", **Ecological Indicators**, v. 121, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107155. .

CASSETTARI, G. A., QUEIROZ, T. M. "Revista Brasileira de Climatologia", v. 26, p. 70–88, 2020. .

CASSUNDÉ, F. R. de S. A., BARBOSA, M. A. C., MENDONÇA, J. R. C. "Entre revisões sistemáticas e bibliometrias: como tem sido mapeada a produção acadêmica em Administração no Brasil?", **Informação & Informação**, v. 23, n. 1, p. 311, 2018. DOI: 10.5433/1981-8920.2018v23n1p311.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA, G. DE F. N. Unsaturated soils in the context of tropical soils. **Soils and Rocks**, v. 44, n. 3, 1 jul. 2021.

CAMAMPUM DE CARVALHO, J. de (Org.) ; GITIRANA JUNIOR, G.F.N. (Org.) ; MACHADO, S. L. (Org.) ; MASCARENHA, M. M. A. (Org.) . Solos não saturados no contexto geotécnico. 1. ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1.

650p .

CAMAPUM DE CARVALHO, JOSE (Org.) ; GITIRANA JR., GILSON DE F. N. (Org.) ; MACHADO, S.L. (Org.) ; MASCARENHA, M. M. A. (Org.) ; SILVA FILHO, F.C. (Org.) ; RODRIGUES, R. A. (Org.) . Solos não saturados no contexto geotécnico (2a edição). 2. ed. São Paulo: ABMS, 2023. v. 1. 1083p .

CAMAPUM DE CARVALHO, JOSÉ CAMAPUM DE; GITIRANA JR, GILSON de FN. Unsaturated soils in the context of tropical soils. **Soils and Rocks**, v. 44, 2021.

CATAPRETA, C. A. A.. Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação. 2008. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Minas Gerais.

CHAVAN, D., KUMAR, S. "Reduction of methane emission from landfill using biocover as a biomitigation system: A review", **Indian Journal of Experimental Biology**, v. 56, n. 7, p. 451–459, 2018. .

CHEN, H., JIANG, W., YANG, Y., *et al.* "Global trends of municipal solid waste research from 1997 to 2014 using bibliometric analysis", **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 65, n. 10, p. 1161–1170, 2015. DOI: 10.1080/10962247.2015.1083913. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2015.1083913>.

COSTA, A. M., ALFAIA, R. G. de S. M., CAMPOS, J. C. "Landfill leachate treatment in Brazil – An overview", **Journal of Environmental Management**, v. 232, n. November 2018, p. 110–116, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.006.

COSTA, M.D., MARIANO, M. O. H., ARAUJO, L. B., *et al.* "Laboratory studies to evaluate the performance of landfill cover layers for the reduction of gases emissions and infiltrations | Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emiss", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 77–90, 2018. DOI: 10.1590/s1413-41522018160393. .

COSTA, Magdalena Duarte, MARIANO, M. O. H., ARAUJO, L. B., *et al.* "Laboratory studies to evaluate the performance of landfill cover layers for the reduction of gases emissions and infiltrations", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 77–90, 2018. DOI: 10.1590/s1413-41522018160393. .

COSTA, M. D. Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos. 144f. 2015. **Tese de Doutorado**. (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife (PE).

COUCEIRO, P. R. D. C., & SANTANA, G. P. (1999). Caulinita em solo da Amazônia: caracterização e permutabilidade. **Acta Amazônica**, 29, 267-275.

CPRM. "Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Marabá – Folha SB.22-X-D, Estado do Pará, Maranhão e Tocantins. Escala 1:250.000", **Projeto de mapeamento geológico/metalogenético sistemático**, p. 119, 2001. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/5363>.

CUI, Y. J., ZORNBERG, J. G. "Water balance and evapotranspiration monitoring in geotechnical and geoenvironmental engineering", **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 783–798, 2008. DOI: 10.1007/s10706-008-9198-z. .

DE CASTRO, F. F., DE JESUS, A. F. "Adapting bibliographic data to linked data: Requirements, advantages and challenges]", **Informacao e Sociedade**, v. 28, n. 3, p. 149–168, 2018. DOI: 10.22478/ufpb.1809-4783.2018v28n3.38288. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85068058270&doi=10.22478%2Fufpb.1809-4783.2018v28n3.38288&partnerID=40&md5=6c11a4a40f680588d6a46ea6aae0bd0d>.

DE MEDEIROS, I. L., VIEIRA, A., BRAVIANO, G., *et al.* "Revisão Sistemática e Bibliometria facilitadas por um Canvas para visualização de informação", **Revista Brasileira de Design da Informação**, v. 12, n. 1, p. 93–110, 2015. Disponível em: <https://www.infodesign.org.br/infodesign/article/view/341>.

DERMEVAL, D., VILELA, J., BITTENCOURT, I. I., *et al.* "Applications of ontologies in requirements engineering: a systematic review of the literature", **Requirements Engineering**, v. 21, n. 4, p. 405–437, 2016. DOI: 10.1007/s00766-015-0222-6. .

DET UDOMSAP, A., HALLINGER, P. "A bibliometric review of research on sustainable construction, 1994–2018", **Journal of Cleaner Production**, v. 254, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120073. .

DEUS, R. M., BATTISTELLE, R. A. G., SILVA, G. H. R. "Resíduos sólidos no Brasil: Contexto, lacunas e tendências", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 685–698, 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020040129347. .

DIAS, J. L., GOMES, R. R. K. A., OLIVEIRA, A. B. "Estudo Do Balanço Hídrico Climatológico E Classificação Climática De Thornthwaite Para a Cidade De Marabá-Pa", **XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 2013. .

DECAGON DEVICES, 2008. 10HS Operator's Manual. Version 1. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA.

DUAN, Z., SCHEUTZ, C., KJELDSSEN, P. "Trace gas emissions from municipal solid waste landfills: A review", **Waste Management**, v. 119, p. 39–62, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.015>.

EMMANUEL, E., ANGGRAINI, V., RAGHUNANDAN, M. E., *et al.* "Utilization of marine clay as a bottom liner material in engineered landfills", **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, p. 104048, 2020. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104048. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104048>.

ENSSLIN, L., DUTRA, A., DEZEM, V., *et al.* "Avaliação De Desempenho Na Aplicação Do Controle Estatístico De Processos: Seleção De Referencial Teórico Internacional E Análise Bibliométrica", **Revista Alcance**, v. 24, n. 3(Jul/Set), p. 396, 2017. DOI: 10.14210/alcance.v24n3(jul/set).p396-412. .

ENSSLIN, S. R., ENSSLIN, L., IMLAU, J. M., *et al.* "Processo de Mapeamento das Publicações Científicas de Um Tema: Portfólio Bibliográfico e Análise Bibliométrica sobre avaliação de desempenho de cooperativas de produção agropecuária", **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 52, n. 3, p. 587–608, 2014. DOI: 10.1590/S0103-20032014000300010. .

ENSSLIN, S. R., ENSSLIN, L., YAMAKAWA, E. K., *et al.* "Processo Estruturado de Revisão da Literatura e Análise Bibliométrica Sobre Avaliação de Desempenho de Processos de Implementação de Eficiência Energética", **Revista Brasileira de Energia**, v. 20 n.1, p. 21–50, 2014. .

EPA. "Permitting of Landfill Bioreactor Operations: Ten Years after the RD & D Rule", n. September, 2014. .

EPA. **Seminar Publication. Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers.** . [S.l: s.n.], 1991

FABBRI, S., SILVA, C., HERNANDES, E., *et al.* "Improvements in the StArt tool to better support the systematic review process", **ACM International Conference Proceeding Series**, v. 01-03-June, 2016. DOI:

10.1145/2915970.2916013. .

FAHIMNIA, B., SARKIS, J., DAVARZANI, H. "Green supply chain management: A review and bibliometric analysis", **International Journal of Production Economics**, v. 162, p. 101–114, 2015. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.01.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003>.

FEDDES, R. A., KABAT, P., VAN BAKEL, P. J. T., *et al.* "Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone - State of the art", **Journal of Hydrology**, v. 100, n. 1–3, p. 69–111, 1988. DOI: 10.1016/0022-1694(88)90182-5. .

FEITOSA, D., DERMEVAL, Di., ÁVILA, T., *et al.* "A systematic review on the use of best practices for publishing linked data", **Online Information Review**, v. 42, n. 1, p. 107–123, 2018. DOI: 10.1108/OIR-11-2016-0322. .

FERNANDA DE JESUS, A., FERREIRA DE CASTRO, F. "DADOS BIBLIOGRÁFICOS PARA O LINKED DATA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA<sup>1</sup> Bibliographic data for linked data: a systematic review of literature", **Information Studies: Research Trends**, v. 13, p. 45–55, 2019. .

FERREIRA DA COSTA LIMA, G. "Consumo e resíduos sólidos no Brasil: as contribuições da educação ambiental", **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 37, p. 47–57, 2015. DOI: 10.5327/z2176-9478201513714.

FREDLUND, DELWYN G.; XING, A. "Equations for the soil-water characteristic ' curve '", 1994. .

FREDLUND, D. G., ANQING XING, SHANGYAN HUANG. "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533–546, 1994. DOI: 10.1139/t94-062.

FREDLUND, Delwyn G. "State of practice for use of the soil-water characteristic curve (SWCC) in geotechnical engineering", **Canadian Geotechnical Journal**, v. 56, n. 8, p. 1059–1069, 2019. DOI: 10.1139/cgj-2018-0434. .

FREDLUND, Delwyn G. "Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice", **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**, n. March, p. 286–322, 2006. DOI: 10.1002/9781118280492. .

FREDLUND, Delwyn G., RAHARDJO, H., FREDLUND, M. D. "Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice", **Unsaturated Soil**

**Mechanics in Engineering Practice**, v. 132, n. March, p. 286–321, 2012. DOI: 10.1002/9781118280492. .

FU, H. Z., HO, Y. S., SUI, Y. M., *et al.* "A bibliometric analysis of solid waste research during the period 1993-2008", **Waste Management**, v. 30, n. 12, p. 2410–2417, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.06.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.06.008>.

FY2018. "Municipal solid waste emissions and disposal in FY2018 - JAPAN", **Carbohydrate Polymers**, v. 6, n. 1, p. 5–10, 2019. DOI: 10.1109/MTAS.2004.1371634. Disponível em: [http://waset.org/publications/14223/soil-resistivity-data-computations-single-and-two-layer-soil-resistivity-structure-and-its-implication-on-earthing-design%0Ahttp://www.jo-mo.com/fadoohelp/data/DotNet/Ethical securty.pdf%0Ahttp://link.springer.com/10.10.10.10](http://waset.org/publications/14223/soil-resistivity-data-computations-single-and-two-layer-soil-resistivity-structure-and-its-implication-on-earthing-design%0Ahttp://www.jo-mo.com/fadoohelp/data/DotNet/Ethical%0Ahttp://link.springer.com/10.10.10.10).

GALVANI, E. "Estudo comparativo dos elementos do Balanço Hídrico Climatológico para cidades de São Paulo e para Paris", **Confins**, n. 4, p. 1–11, 2008a. DOI: 10.4000/confins.4733. .

GALVANI, E. "Estudo comparativo dos elementos do Balanço Hídrico Climatológico para cidades de São Paulo e para Paris", **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, n. 4, p. 1–11, 2008b. DOI: 10.4000/confins.4733. .

GAPAK, Y., YAMSANI, S. K., SREEDEEP, S., *et al.* "Long-term permeability characteristics of soil-geosynthetic combination used in landfill covers", **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 6, n. 1, p. 296–309, 2017. DOI: 10.1520/ACEM20160068. .

GAPAK, Yagom, YAMSANI, S. K., SREEDEEP, S., *et al.* "Long-Term Permeability Characteristics of Soil-Geosynthetic Combination Used in Landfill Covers", **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 6, n. 1, p. 20160068, 2017. DOI: 10.1520/acem20160068. .

GENELLE, F., SIRIEIX, C., RISS, J., *et al.* "Detection of landfill cover damage using geophysical methods", **Near Surface Geophysics**, v. 12, n. 5, p. 599–611, 2014. DOI: 10.3997/1873-0604.2014018. .

GITIRANA, G. F. N. **Soil-Atmosphere Interaction in Unsaturated Soils Problem Solving**. [s.l: s.n.].

GONÇALES FILHO, M., DE CAMPOS, F. C., ASSUMPCÃO, M. R. P.

"Revisão sistemática da literatura com análise bibliométrica sobre estratégia e Manufatura Enxuta em segmentos da indústria", **Gestao e Producao**, v. 23, n. 2, p. 408–418, 2016. DOI: 10.1590/0104-530X1683-14. .

GONÇALVES, A. T.T, MORAES, F. G. MARQUES, G. L., LIMA, J. P. , LIMA, R. s. "Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review", **Revista Ambiente e Agua**, v. 13, n. 2, p. 1–20, 2018. DOI: 10.4136/1980-993X. Disponível em: [http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/2018/pdf\\_2](http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/2018/pdf_2).

GONÇALVES, F., SOUZA, C. H. U. de, TAHIRA, F. S., *et al.* "Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário", **Revista DAE**, v. 65, n. 205, p. 5–14, 2017. DOI: 10.4322/dae.2016.018. .

GOURC, J. P., RAMÍREZ, R. R. "Dynamics-based interpretation of the interface friction test at the inclined plane", **Geosynthetics International**, v. 11, n. 6, p. 439–454, 2004. DOI: 10.1680/gein.2004.11.6.439. .

GRUGNALETTI, M., PANTINI, S., VERGINELLI, I., *et al.* "An easy-to-use tool for the evaluation of leachate production at landfill sites", **Waste Management**, v. 55, p. 204–219, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.03.030. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.030>.

GULARTE, L. C. P., BORTOLUZZI, S. C., LIMA, J. D. de, *et al.* "Análise bibliométrica e sistêmica da literatura sobre viabilidade econômica-financeira, gestão e sustentabilidade da reciclagem de resíduos da construção civil", **Exacta**, v. 16, n. 4, p. 45–58, 2018. DOI: 10.5585/exactaep.v16n4.7436. .

HAGHIGHI, A. *et al.* Temperature effects on suction measurement using the filter paper technique. **Geotechnical Testing Journal**, v. 35, n. 1, p. 83–90, 2012.

HALLINGER, PHILIP; CHATPINYAKOOP, C. "A Bibliometric Review of Research on Higher Education for Sustainable Development , 1998 – 2018", 2019.

HAUSER, V.L. "Evapotranspiration covers for landfills and waste sites", **Resource: Engineering and Technology for Sustainable World**, v. 16, n. 3, p. 14–16, 2009. .

HAUSER, Victor L., GIMON, D. M., BONTA, J. V., *et al.* "Models for hydrologic design of evapotranspiration landfill covers", **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 18, p. 7226–7233, 2005. DOI: 10.1021/es048020e. .

HAUSER, Victor L., P.E., MEMBER, ASCE, BARRON L. WEAND, AND MARC D. GILL, P. . "NATURAL COVERS FOR LANDFILLS AND BURIED



WASTE", **Journal of Environmental Engineering**, v. 127, n. 9, p. 768–775, 2001.

HE, R., RUAN, A., JIANG, C., *et al.* "Responses of oxidation rate and microbial communities to methane in simulated landfill cover soil microcosms", **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 7192–7199, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.12.066. .

HE, R., WANG, J., XIA, F.-F., *et al.* "Evaluation of methane oxidation activity in waste biocover soil during landfill stabilization", **Chemosphere**, v. 89, n. 6, p. 672–679, 2012. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.06.008. .

HOFFMANN, E. L., DALLACORT, R., CARVALHO, M. A. C., *et al.* "Variabilidade das chuvas no Sudeste da Amazônia paraense, Brasil", **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 4, p. 1251–1263, 2018. DOI: 10.26848/rbgf.v11.4.p1251-1263. .

HUANG, R. Q., WU, L. Z. "Analytical solutions to 1-D horizontal and vertical water infiltration in saturated/unsaturated soils considering time-varying rainfall", **Computers and Geotechnics**, v. 39, p. 66–72, 2012. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.08.008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2022. [s.l.]. 2021. Disponível em <https://censo2022.ibge.gov.br/sobre/conhecendo-o-brasil.html>. Acesso: 15 de junho de 2023

IDOWU, I. A., ATHERTON, W., HASHIM, K., KOT, P., ALKHADDAR, R., ALO, B. I., & SHAW, A. (2019). An analyses of the status of landfill classification systems in developing countries: Sub Saharan Africa landfill experiences. **Waste Management**, 87, 761-771.

IMBIRIBA, B. C. d. O., RAMOS, J. R. de S., DE SOUSA SILVA, R., *et al.* "Estimates of methane emissions and comparison with gas mass burned in CDM action in a large landfill in Eastern Amazon", **Waste Management**, v. 101, p. 28–34, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.09.029. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.029>.

IPCC. **IPCC\_2014\_Climate Change 2013\_ Intergovernmental Panel On Climate Change**. . [S.l: s.n.]. , 2014

ISHIHARA, J., FERNANDES, L., DUARTE, A., *et al.* "Quantitative and Spatial Assessment of Precipitation in the Brazilian Amazon (Legal Amazon) - (1978 to 2007)", **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 29–39, 2014. DOI: 10.21168/rbrh.v19n1.p29-39. .

IZZO, R. L. dos S., MAHLER, C. F., ROSE, J. L. "Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 303–312, 2013. DOI: 10.1590/S1413-41522013000400002. .

JI, L., LU, S., YANG, J., *et al.* "Municipal solid waste incineration in China and the issue of acidification: A review", **Waste Management and Research**, v. 34, n. 4, p. 280–297, 2016. DOI: 10.1177/0734242X16633776. .

Jucá, J. F. T. (1990). Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada (**Doctoral dissertation**, Universidad Politécnica de Madrid).

JUSTIN, M. Z., ZUPANČIČ, M. "Combined purification and reuse of landfill leachate by constructed wetland and irrigation of grass and willows", **Desalination**, v. 246, n. 1–3, p. 157–168, 2009. DOI: 10.1016/j.desal.2008.03.049. .

KAMON, M., INAZUMI, S., KATSUMI, T., *et al.* "Water interception of landfill cover systems under unsaturated conditions", **Soils and Foundations**, v. 43, n. 2, p. 1–16, 2003. DOI: 10.3208/sandf.43.2\_1. .

KATSUMI, T., BENSON, C. H., FOOSE, G. J., *et al.* "Performance-based design of landfill liners", **Engineering Geology**, v. 60, n. 1–4, p. 139–148, 2001. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00096-X. .

KEELSON, K. B. "Evaluation of landfill cover design options for waste disposal sites in the coastal regions of Ghana", **International Journal of Engineering and Technology Innovation**, v. 5, n. 1, p. 45–55, 2015. .

KITCHENHAM, Barbara. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.

KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, Stuart. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. In: Technical report, Ver. 2.3 **EBSE Technical Report. EBSE, 2007**

KHIRE, M. V., BENSON, C. H., BOSSCHER, P. J. "Water balance modeling of earthen final covers", **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 123, n. 8, p. 744–754, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:8(744).

KNOFF, L. C. ; LACERDA, R. T. O.; ENSSILIN, L.; ENSSLIN, S. R. "Mapeamento de publicações científicas sobre estratégia de manufatura. **Revista Produção Online**, p. 403–429, 2014. .

KOERNER; DANIEL. Koerner & Daniel - **Final covers for Solid Waste**

**landfills and abandoned Dumps. Ed. ASCE, 1997**

KOERNER, R. M., HSUAN, Y. G., KOERNER, G. R. "Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes", **Geosynthetics International**, v. 24, n. 2, p. 198–212, 2017. DOI: 10.1680/jgein.16.00026. .

KOERNER, R. M., SOONG, T.-Y. "Analysis and design of veneer cover soils", **Geosynthetics International**, v. 12, n. 1, p. 28–49, 2005. DOI: 10.1680/gein.2005.12.1.28. .

KORTNIK, J., ČERNEC, F., HRAST, K. "Paper sludge layer as low permeability barrier on waste landfills", **Soil and Sediment Contamination**, v. 17, n. 4, p. 381–392, 2008. DOI: 10.1080/15320380802146586. .

KORTNIK, Jože, ČERNEC, F., HRAST, K. "Paper sludge layer as low permeability barrier on waste landfills", **Soil and Sediment Contamination**, v. 17, n. 4, p. 381–392, 2008. DOI: 10.1080/15320380802146586. .

KRAUS, J. F., BENSON, C. H., VAN MALTBY, C., *et al.* "Laboratory and field hydraulic conductivity of three compacted paper mill sludges", **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 123, n. 7, p. 654–662, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:7(654). .

KRISHNA, V. R., HARISH, P. K. R. "Optimizing the liners thickness to design a landfill", **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 2331–2336, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.678. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.678>.

LEME, M. M. V., ROCHA, M. H., LORA, E. E. S., *et al.* "Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil", **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8–20, 2014. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.03.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>.

LEWIS, J., SJÖSTROM, J. "Optimizing the experimental design of soil columns in saturated and unsaturated transport experiments", **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 115, n. 1–4, p. 1–13, 2010. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2010.04.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2010.04.001>.

LEWIS, T., RAUTURIER, F. "Gleaning around the globe: Reframing urban thrift via practices and economies of hard rubbish reuse", **Journal of Consumer Culture**, v. 19, n. 4, p. 493–512, 2019. DOI: 10.1177/1469540519872072. .

LI, B., BISWAS, A., WANG, Y., *et al.* "Identifying the dominant effects of climate and land use change on soil water balance in deep loessial vadose zone", **Agricultural Water Management**, v. 245, n. November 2020, p. 106637, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106637. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106637>.

LI, N., HAN, R., LU, X. "Bibliometric analysis of research trends on solid waste reuse and recycling during 1992–2016", **Resources, Conservation and Recycling**, v. 130, n. November 2017, p. 109–117, 2018. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.008>.

LI, Z., VANDERBORGHT, J., SMITS, K. M. "The effect of the top soil layer on moisture and evaporation dynamics", **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, p. 1–15, 2020. DOI: 10.1002/vzj2.20049. .

LOMBARDI, L., CARNEVALE, E., CORTI, A. "A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste", **Waste Management**, v. 37, p. 26–44, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>.

LOPES, R. L. Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. 2011. 250 f. 2011. **Tese de Doutorado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MA, J., HIPEL, K. W. "Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe – A systematic literature review", **Waste Management**, v. 56, p. 3–12, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.06.041. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.041>.

MACIEL, F. J., JUCÁ, J. F. T. "Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil", **Waste Management**, v. 31, n. 5, p. 966–977, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.01.030.

MAGALHÃES, ALLAN DE FREITAS; LOPES, SOFIA REGINA; SOARES, BRUNO LIMA; CARVALHO, JOSINA APARECIDA; SIMÕES, G. F. "Cobertura final de aterros sanitários: uma abordagem conservacionista ambiental", **Revista aidis**, v. 13, n. 3, p. 669–681, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.63794>. .

MANNARINO, C. F., FERREIRA, J. A., GANDOLLA, M. "Contribuições

para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Européia", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 379–385, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016146475. .

MARENGO JA. 2005. The characteristics and variability of the atmospheric water balance in the Amazon basin: Spatial and temporal variability. **Clim Dynam** 24: 11-22.

MARIANO, M. O. H., JUCÁ, J. F. T. "Ensaio de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 223–228, 2010. DOI: 10.1590/s1413-41522010000300004. .

MARINHO, F. A. M. A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção. **Anais do encontro de Solos não Saturados**, p. 112-125, 1995.

MARINHO, FERNANDO AM et al. Geotechnical properties of a paper mill sludge from Brazil. **4th ICEG: proceedings**, 2002.

MARINHO, FERNANDO AM. Nature of soil–water characteristic curve for plastic soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 5, p. 654-661, 2005.

MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The filter paper method revisited. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 3, p. 250–258, 2006.

MARQUESI, J. D. D. O., TEIXEIRA, W. G., REIS, A. M., *et al.* "Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado utilizando dois métodos de laboratório numa toposequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas", **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p. 193–206, 2008. DOI: 10.1590/S0044-59672008000200002. .

MARQUESI, J. D. D. O., Teixeira, W. G., Reis, A. M., Cruz Junior, O. F., Batista, S. M., & Afonso, M. A. C. B. (2010). Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. **Acta Amazonica**, 40, 01-12.

MEERDINK, J. S., BENSON, C. H., KHIRE, M. V. "Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 12, p. 1186, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:12(1186). .

MENDES, R. M., MARINHO, F. A. M. "Soil Water Retention Curves for Residual Soils Using Traditional Methods and MIP", **Geotechnical and Geological**

**Engineering**, v. 38, n. 5, p. 5167–5177, 2020. DOI: 10.1007/s10706-020-01354-x.

MENDES, T. A. (2019). Modelagem física e numérica da infiltração e escoamento em superfícies não saturadas e com cobertura vegetativa (**Tese de Doutorado**). Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF

MESDAGHINIA, A., MAHVI, A. H., NASSERI, S., *et al.* "A bibliometric analysis on the solid waste-related research from 1982 to 2013 in Iran", **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 4, n. 3, p. 185–195, 2015. DOI: 10.1007/s40093-015-0098-y. .

MIJARES, R. G., KHIRE, M. V., JOHNSON, T. "Field-scale evaluation of lysimeters versus actual earthen covers", **Geotechnical Testing Journal**, v. 35, n. 1, 2012. DOI: 10.1520/GTJ103577. .

MILIND V. KHIRE, CRAIG H. BENSON, P. J. B. "FIELD DATA FROM A CAPILLARY BARRIER AND MODEL PREDICTIONS WITH UNSAT-H", v. 6, n. June, p. 23–26, 1999. .

MODUELO. "MODUELO 4.0 MANUAL DE USUARIO", **Sierra**, p. 1–108, 2009.

MONGEON, P., PAUL-HUS, A. "The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis", **Scientometrics**, v. 106, n. 1, p. 213–228, 2016. DOI: 10.1007/s11192-015-1765-5.

MONTEIRO, V. E.D. Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca. **Tese de doutorado**. Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

MORACI, N., BUSANA, S., CORTELLAZZO, G., *et al.* "Design and construction of a compacted clay liner in cover system of a municipal solid waste (MSW) landfill using nonstandard procedures", **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55, n. 8, p. 1182–1192, 2018. DOI: 10.1139/cgj-2017-0371.

MORANDI, M. I. W. M .; CAMARGO, Luis Felipe Riehs. Systematic literature review. Design science research: research method for advancing science and technology. Porto Alegre: Bookman, p. 141-75, 2015.

MUALEM, Y. "A new model for predicting the hydraulic conduc", **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513–522, 1976.

MUALEM, YECHEZKEL. Hydraulic conductivity of unsaturated soils:

prediction and formulas. **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods**, v. 5, p. 799-823, 1986.

NAVES, L. C. "Influence of soil compaction on the production and potential pollution of leachate of urban solid waste", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 949–958, 2019. DOI: 10.1590/s1413-41522019118989. .

NEGRÓN JUÁREZ RI, HODNETT MG, FU R, GOULDENML AND VON RANDOW C. 2007. Control of Dry Season Evapotranspiration over the Amazonian Forest as Inferred from observations at a Southern Amazon Forest Site. **Journal Climate** 20: 2827-2839.

NG, C. W. W., COO, J. L., CHEN, Z. K., *et al.* "Water Infiltration into a New Three-Layer Landfill Cover System", **Journal of Environmental Engineering (United States)**, v. 142, n. 5, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001074.

NG, C. W. W., LEUNG, A. K., WOON, K. X. "Effects of soil density on grass-induced suction distributions in compacted soil subjected to rainfall", **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 4, p. 311–321, 2014. DOI: 10.1139/cgj-2013-0221. .

NI, J.J., NG, C. W. W. "Long-term effects of grass roots on gas permeability in unsaturated simulated landfill covers", **Science of the Total Environment**, v. 666, p. 680–684, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.248. .

NI, Jun Jun, BORDOLOI, S., SHAO, W., *et al.* "Two-year evaluation of hydraulic properties of biochar-amended vegetated soil for application in landfill cover system", **Science of the Total Environment**, v. 712, p. 136486, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136486. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136486>.

NISBET, E. G., FISHER, R. E., LOWRY, D., *et al.* "Methane Mitigation: Methods to Reduce Emissions, on the Path to the Paris Agreement", **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, p. 1–51, 2020. DOI: 10.1029/2019RG000675. .

NOLASCO, D., LIMA, R. N., HERNÁNDEZ, P. A., *et al.* "Non-controlled biogenic emissions to the atmosphere from Lazareto landfill, Tenerife, Canary Islands", **Environmental Science and Pollution Research**, v. 15, n. 1, p. 51–60, 2008. DOI: 10.1065/espr2007.02.392. .

OBULISAMY, P. K., SIM YAN MAY, J., RAJASEKAR, B. "Gradient packing bed bio-filter for landfill methane mitigation", **Bioresource Technology**, v. 217, p. 205–209, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.01.059. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.059>.

OCTAVIANO, F. R., FELIZARDO, K. R., MALDONADO, J. C., *et al.* "Semi-automatic selection of primary studies in systematic literature reviews: is it reasonable?", **Empirical Software Engineering**, v. 20, n. 6, p. 1898–1917, 2015. DOI: 10.1007/s10664-014-9342-8. .

OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. *et al.* A influência da adição de fibras de coco distribuídas aleatoriamente na curva característica de água de um solo argilosos compactado. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 16, n. 0718–378X, p. 218–231, 6 abr. 2023.

OLIVEIRA, LAÍS ROBERTA GALDINO DE;JUCÁ, JOSÉ FERNANDO THOMÉ; MARIANO, MARIA ODETE HOLANDA; NORBERTO, A. de S. "Estudo das emissões de biogás em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos", **Revista aidis**, v. 13, p. 731–748, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.67920>. .

OLIVEIRA, ORLANDO MARTINI DE; MARINHO, FERNANDO AM. Estudo de barreiras capilares por meio de simulação de chuva em coluna de solo. **VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, p. 291-297, 2007.

OLIVEIRA, R. F. de, BRAGA, R. M. Q. L. "Sistema De Cobertura Final De Um Aterro Sanitário Para a Rmb De Belém-Pa Com Emprego De Resíduos Da Construção Civil", **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 573, 2017. DOI: 10.19177/rgsa.v6e32017573-596. .

OGORZALEK, G. L. BOHNHOFF, C. D. SHACKELFORD, C. H. BENSON, P. A. "Comparison of Field Data and Water-Balance Predictions for a Capillary Barrier Cover", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 4, n. APRIL, p. 470–486, 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134. .

PARIATAMBY, A., CHEAH, W. Y., SHRIZAL, R., *et al.* "Enhancement of landfill methane oxidation using different types of organic wastes", **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 5, p. 2489–2496, 2015. DOI: 10.1007/s12665-014-3600-3. .

PARSAEIFARD, N., SATTLER, M., NASIRIAN, B., *et al.* "Enhancing anaerobic oxidation of methane in municipal solid waste landfill cover soil", **Waste Management**, v. 106, p. 44–54, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.03.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.009>.



PASSOS, M. L. V., ZAMBRZYCKI, G. C., PEREIRA, R. S. "Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA", **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 83–89, 2017. .

PEROTTI, D. A. *et al.* Numerical analysis of cover systems for mining waste in tropical regions. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 36, n. 7, p. 492–511, 2022.

PHAM, H. Q., FREDLUND, D. G. "Equations for the entire soil-water characteristic curve of a volume change soil", **Canadian Geotechnical Journal**, v. 45, n. 4, p. 443–453, 2008. DOI: 10.1139/T07-117. .

PITANGA, H.N., VILAR, O. M., PIERSON, P. "Gas permeability of bentonite barriers:Development, construction and testing of a measurement system", **Revista Escola de Minas**, v. 69, n. 4, p. 389–396, 2016. DOI: 10.1590/0370-44672015690165. .

PITANGA, Heraldo Nunes, VILAR, O. M., PIERSON, P. "Gas permeability of bentonite barriers:Development, construction and testing of a measurement system", **Revista Escola de Minas**, v. 69, n. 4, p. 389–396, 2016. DOI: 10.1590/0370-44672015690165. .

Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) MARABÁ. Plano Municipal de Saneamento Básico: Revisão 2019-2024. Prefeitura Municipal de Marabá. 2019. Disponível em <https://maraba.pa.gov.br/wp-content/uploads/2019/11/PMSB-Marab%C3%A1-revis%C3%A3o-2019-2024.pdf>. Acessado em 10 de junho de 2023.

RAHARDJO, H., SATYANAGA, A., LEONG, E.-C., *et al.* "Performance of Residual Soil as Cover System for a Sanitary Landfill in Singapore", **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 31, n. 1, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000926. .

RANNAUD, D., CABRAL, A., ALLAIRE, S. E. "Modeling methane migration and oxidation in landfill cover materials with TOUGH2-LGM", **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 198, n. 1–4, p. 253–267, 2009. DOI: 10.1007/s11270-008-9843-4. .

REZA M. KHANBILVARDI, SHABBIR AHMED, P. J. G. "Flow investigation for landfill leachate (Fill)", **Journal of Environmental Engineering (United States)**, v. 121, n. 1, p. 45–57, 1995. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1996)122:1(86). .

RICHARDS, L. A. "Capillary conduction of liquids through porous mediums", **Journal of Applied Physics**, v. 1, n. 5, p. 318–333, 1931. DOI: 10.1063/1.1745010.

RIOS, D. C. Dissertação de Mestrado. Aplicação de dois modelos de balanço hídrico para estudo de Camada de cobertura de aterro sanitário utilizando solo e Resíduo da construção civil (RCC). Universidade federal de Feira de Santana. 2016.

ROCK, S., MYERS, B., FIEDLER, L. "Evapotranspiration (ET) covers", **International Journal of Phytoremediation**, v. 14, n. SUPPL., p. 1–25, 2012. DOI: 10.1080/15226514.2011.609195. .

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; DA SILVA, P. R. T.; et al. Reciclagem de precipitação na bacia amazônica: O papel do transporte de umidade e da evapotranspiração da superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 387–398, 2017. Sociedade Brasileira de Meteorologia.

RODRIGUES, L., UNIVERSIDADE, D., SÃO PAULO, F. De, *et al.* "Perdas de Grãos no Transporte e Armazenagem : Uma Revisão Sistemática da Literatura com Análise Bibliométrica Grain Losses in Transport and Storage : A Systematic Literature Review with Bibliometric Analysis Perdas de Grãos no Transporte e Armazenagem : U", p. 174–189, 2019.

RODRIGUES, EVANDRO LUÍS. Efeitos de incêndios no balanço hídrico dos mananciais de uma grande metrópole neotropical: simulações usando o SWAT na interface solo-água-vegetação. 2018.

ROSA, A. G., SANTOS, J. T. S. Dos, COSTA, J. A. Da, *et al.* "Comportamento da precipitação como fator ativo de processos erosivos no município de Rondon do Pará, PA (Brasil)", **Scientia Plena**, v. 13, n. 02, p. 1–11, 2017. DOI: 10.14808/sci.plena.2017.025301. .

ROSE, J. L., MAHLER, C. F., IZZO, R. L. S. "Comparison of the methane oxidation rate in four media | Comparação Entre as Taxas de Oxidação de CH<sub>4</sub> em Quatro Diferentes Meios", **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 3, p. 803–812, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000300011. .

ROSSATO, L., ALVALÁ, R. C. S., TOMASELLA, J. "Variação espaço-temporal da umidade do solo no brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990", **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113–122, 2004.

ROWE, R. K. "Third Indian Geotechnical Society: Ferroco Terzaghi Oration Design and Construction of Barrier Systems to Minimize Environmental Impacts

Due to Municipal Solid Waste Leachate and Gas", **Indian Geotechnical Journal**, v. 42, n. 4, p. 223–256, 2012. DOI: 10.1007/s40098-012-0024-4. .

SADASIVAM, B. Y., REDDY, K. R. "Adsorption and transport of methane in biochars derived from waste wood", **Waste Management**, v. 43, p. 218–229, 2015a. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.04.025. .

SADASIVAM, B. Y., REDDY, K. R. "Adsorption and transport of methane in landfill cover soil amended with waste-wood biochars", **Journal of Environmental Management**, v. 158, p. 11–23, 2015b. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.04.032. .

SADEK, S., GHANIMEH, S., EL-FADEL, M. "Predicted performance of clay-barrier landfill covers in arid and semi-arid environments", **Waste Management**, v. 27, n. 4, p. 572–583, 2007. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.06.008.

SAFARI, E., AL-SUWAIDI, G., RAYHANI, M. T. "Performance of biocover in mitigating fugitive methane emissions from municipal solid waste landfills in cold climates", **Journal of Environmental Engineering (United States)**, v. 143, n. 5, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001191. .

SAMPAIO, ROSANA FERREIRA; MANCINI, MARISA COTTA. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Brazilian Journal of Physical Therapy**, v. 11, p. 83-89, 2007.

SAFARI, EDWIN, GHAZIZADE, M. J., ABDOLI, M. A. "A performance-based method for calculating the design thickness of compacted clay liners exposed to high strength leachate under simulated landfill conditions", **Waste Management and Research**, v. 30, n. 9, p. 898–907, 2012. DOI: 10.1177/0734242X12448520. .

SANTOS MOREIRA, F. G., GUEDES, M. J. F., MONTEIRO, V. E. D., *et al.* "Fugitive emissions of biogas in coverage liner of compacted soil in a landfill", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 247–258, 2020. DOI: 10.1590/s1413-41522020189648. .

SANTOS, A. S., AMORIM, E. P., FERREIRA, C. F., *et al.* "Water stress in Musa spp.: A systematic review", **PLoS ONE**, v. 13, n. 12, p. 1–18, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0208052. .

SANTOS, R. D., SANTOS, H. G., KER, J. C., ANJOS, L. H.C., SHIMIZU, S.H.. Manual de descrição e solteia de solo no Campo. Ed. Ver. ampl. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, 2015.

SANTOS, G. M. Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-

composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco. 2015. 196f. 2015. **Tese de Doutorado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

SÃO MATEUS, M. do S. C., MACHADO, S. L., BARBOSA, M. C. "An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill", **Waste Management**, v. 32, n. 3, p. 471–481, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.11.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.009>.

SCALIA IV, J., BENSON, C. H. "Effect of permeant water on the hydraulic conductivity of exhumed GCLs", **Geotechnical Testing Journal**, v. 33, n. 3, 2010. DOI: 10.1520/GTJ102609. .

SCALIA, J., BENSON, C. H. "Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers with composite barriers", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 1, p. 1–13, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000407. .

SCALIA, J., BENSON, C. H. "Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Landfill Final Covers with Composite Barriers", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 1, p. 1–13, jan. 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000407. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000407>.

SCHARFF, H., VAN ZOMEREN, A., VAN DER SLOOT, H. A. "Landfill sustainability and aftercare completion criteria", **Waste Management and Research**, v. 29, n. 1, p. 30–40, 2011. DOI: 10.1177/0734242X10384310. .

SCHMUCK, S., WERNER, D., WIDMANN, R., *et al.* "Depsim: Numerical 3D-simulation of the water, gas and solid phase in a landfill", **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 11, n. 5, p. 694–699, 2016. DOI: 10.2495/SDP-V11-N5-694-699. .

SCHROEDER, P. R., DOZIER, T. S., ZAPPI, P. A., *et al.* "The hydrologic evaluation of landfill performance (Help) model", p. 104, 1994. .

SHAIKH, J., BORDOLOI, S., YAMSANI, S. K., *et al.* "Long-term hydraulic performance of landfill cover system in extreme humid region: Field monitoring and numerical approach", **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 409–423, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.213. .

SHAIKH, J., YAMSANI, S. K., SEKHARAN, S., *et al.* "Performance

evaluation of 5TM sensor for real-time monitoring of volumetric water content in landfill cover system", **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 8, n. 1, p. 322–335, 2019. DOI: 10.1520/ACEM20180091. .

SHAIKH, J., YAMSANI, S. K., SEKHARAN, S., *et al.* "Performance Evaluation of Profile Probe for Continuous Monitoring of Volumetric Water Content in Multilayered Cover System", **Journal of Environmental Engineering (United States)**, v. 144, n. 9, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001424.

SHAN, H.-Y., LAI, Y.-J. "Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners", **Geotextiles and Geomembranes**, v. 20, n. 1, p. 19–38, 2002. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00023-1. .

SHIKER, M. A. K. Multivariate statistical analysis. **British Journal of Science**. v. 6 (1), n. Julho, p. 55–66, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319808256>. Acesso em: 23 set. 2023.

SILVA, F. C. *et al.* Determination of the characteristic curve and influence of macro and micropores on a residual soil profile. **Geotecnia**, v. 2020, n. 149, p. 101–128, 15 jul. 2020.

SILVA, T. N., DE FREITAS, F. S. N., CANDIANI, G. "Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 95–104, 2013. DOI: 10.1590/S1413-41522013000200001. .

SILVA, G. R. A.; BRAGA, R. L. ; FERNANDES, L. L. ; SILVEIRA, R. N. P. O. . Estimativas de vazões de lixiviados de um aterro sanitário na região metropolitana de Belém. *Revista DAE*, 2021.

SILVA, Angela Tostes Alves. Aspectos meteorológicos e balanço hídrico em um aterro de resíduos sólidos urbanos. 2008. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, A. F. *et al.* Estimativa da produção de percolato do aterro de disposição de resíduos sólidos de Boa Vista por meio de metodologias empíricas. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 14, n. 2, p. 623, 6 ago. 2021.

SILVA, R. O., SOUZA, E. B., TAVARES, A. L., MOTA, J. A., FERREIRA, D., SOUZA-FILHO, P. W., & ROCHA, E. J. D. (2017). Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89, 1985-2002

SILVEIRA, GERALDO LOPES DA; TUCCI, CARLOS EDUARDO MORELLI. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica. **Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 3, n. 3 (jul./set. 1998), p. 97-110, 1998.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. Disponível em: <[http://snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico\\_RS2019.pdf](http://snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico_RS2019.pdf)> . Acesso em: 08 maio. 2021.

SNIS. "Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos", 2020. .

SNIS, Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Ministério do Desenvolvimento Regional. Diagnósticos SNIS 2021/2022 (ano de referência 2020). Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: 02 de abr. de 2022.

SOARES, P. B., CARNEIRO, T. C. J., CALMON, J. L., *et al.* "Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science", **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 175–185, 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212016000100067. .

SOBRINHO, L., PALMA, O., NAZÁRIO SILVA, L., *et al.* "Balanço hídrico climatológico mensal e classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o município de Rio Verde, Goiás", **Ano**, v. 16, p. 19–33, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v27i0.68692. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.68692>.

SOBTI, J., SINGH, S. K. "Techno-economic analysis for barrier materials in landfills", **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 5, p. 467–478, 2017. DOI: 10.1080/19386362.2016.1232634. .

SOH, I. T., HETTIARATCHI, J. A. "Potential lateral migration of leachate in flushing bioreactor landfills during aggressive leachate recirculation", **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 13, n. 3, p. 174–178, 2009a. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-025X(2009)13:3(174). .

SOH, I. T., HETTIARATCHI, J. A. "Potential lateral migration of leachate in flushing bioreactor landfills during aggressive leachate recirculation", **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 13, n. 3, p. 174–178, 2009b. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-025X(2009)13:3(174). .

SOUSA PINTO, Carlos. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos, 2016.

SOUZA, R. F. C. de. Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a técnica da transferência de vapor. 2014. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo.

SOUZA, H. P. de, SOARES, A. B., ELIAS, D. de S. "Ensaaios de infiltração em modelos experimentais de coberturas secas utilizando cinzas de carvão mineral da Termelétrica do Pecém", **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 4, 2019. DOI: 10.1590/s1517-707620190004.0849. .

STERN, J. C., CHANTON, J., ABICHOU, T., *et al.* "Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation", **Waste Management**, v. 27, n. 9, p. 1248–1258, 2007. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.07.018. .

STOCK, C., GORAKHKI, M. H., BAREITHER, C. A., *et al.* "Hydrologic Comparison of Prescriptive and Water Balance Covers", **Journal of Environmental Engineering (United States)**, v. 146, n. 7, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001733. .

TANTHACHOON, N., CHIEMCHASRI, C., CHIEMCHASRI, W., *et al.* "Methane oxidation in compost-based landfill cover with vegetation during wet and dry conditions in the tropics", **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 58, n. 5, p. 603–612, 2008. DOI: 10.3155/1047-3289.58.5.603. .

TANTHACHOON, Nathiya, CHIEMCHASRI, C., CHIEMCHASRI, W., *et al.* "Methane oxidation in compost-based landfill cover with vegetation during wet and dry conditions in the tropics", **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 58, n. 5, p. 603–612, 2008. DOI: 10.3155/1047-3289.58.5.603. .

TEIXEIRA, C. E., TORVES, J. C., FINOTTI, A. R., *et al.* "Studies on the aerobic methane oxidation at three sanitary landfills covers in Brazil", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 99–108, 2009. DOI: 10.1590/s1413-41522009000100011.

THOMASEN, T. B., SCHEUTZ, C., KJELDSSEN, P. "Treatment of landfill gas with low methane content by biocover systems", **Waste Management**, v. 84, p. 29–37, 2019. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.11.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.011>.

THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. "The water balance", **OECD**

**Observer**, v. 3, p. 101, 1955. DOI: 10.1201/9780203751435-9. .

THORNTHTWAITE, Charles W. "An approach toward a rational classification of climate", **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948. .

TINTNER, J., KLUG, B. "Can vegetation indicate landfill cover features?", **Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 206, n. 6, p. 559–566, 2011. DOI: 10.1016/j.flora.2011.01.005. .

TUCCI, C. E. (2004). Hidrologia: Ciência e Aplicação, 3ª edição. Porto Alegre, **Editora da UFRGS/ABRH**.

TURNER, D. A., BEAVEN, R. P., WOODMAN, N. D. "Evaluating landfill aftercare strategies: A life cycle assessment approach", **Waste Management**, v. 63, p. 417–431, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.12.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.005>.

UDOH, F. D. "Evaluation of the hydraulic conductivity of cover systems for mineral waste capping projects", **Journal of Industrial Pollution Control**, v. 28, n. 1, p. 1–8, 2012. .

VAN GENUCHTEN M. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980. .

VAN GENUCHTEN, M. V., LEIJ, F. J., & YATES, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.

VAN VERSEVELD, C. J. W., GEBERT, J. "Effect of compaction and soil moisture on the effective permeability of sands for use in methane oxidation systems", **Waste Management**, v. 107, p. 44–53, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.03.038. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.038>.

VERGARA, S. E., TCHOBANOGLIOUS, G. **Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective**. [S.l: s.n.], 2012. v. 37.

VIEIRA, A. M. **Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos**. 2005. 287 f. 2005. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005

WAISCZIK, D. H. D. R., DE LIMA, J. T. "Leachate production estimation for a landfill in south of Brazil using Hydrus-1D", **E3S Web of Conferences**, v. 195, p. 1–6, 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202019501016. .

WANG, X., JIA, M., LIN, X., *et al.* "A comparison of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>



emissions from three different cover types in a municipal solid waste landfill", **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 67, n. 4, p. 507–515, 2017. DOI: 10.1080/10962247.2016.1268547.

WANG, Xiaodong, BENSON, C. H. "Infiltration and saturated hydraulic conductivity of compacted clay", **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 121, n. 10, p. 713–722, 1995. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:10(713)..

WEI, W., DENG, H., LI, G., *et al.* "Performance study of compounded biocover material for methane removal based on cattle manure compost", **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 37, n. 5, p. 535–545, 2016. DOI: 10.1080/09593330.2015.1074722..

WENDLAND, E., PIZARRO, M. de L. P. "Modelagem computacional do fluxo unidimensional de água em meio não saturado do solo", **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 424–434, 2010. DOI: 10.1590/s0100-69162010000300007.

WHALEN, S. C., REEBURGH, W. S., SANDBECKT, K. A. "Rapid Methane Oxidation in a Landfill Cover Soil", Artigo seminal com abordagem de utilizar biocovers em cobertura de aterro sanitário, redução de emissão de gás metano., v. 56, n. 11, p. 3405–3411, 1990..

WICKRAMARACHCHI, P., RANASINGHE, K., HAMAMOTO, S., *et al.* "Gas transport parameters for compacted reddish-brown soil in sri lankan landfill final cover", **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 15, n. 4, p. 285–295, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000078..

WIDOMSKI, M. K., BROICHSITTER, S. B., ZINK, A., *et al.* "Numerical modeling of water balance for temporary landfill cover in North Germany", **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 3, p. 401–412, 2015. DOI: 10.1002/jpln.201400045..

WILLIAM H. ALBRIGHT; CRAIG H. BENSON; P.E. W. JOSEPH WAUGH. **Water Balance Covers for Waste Containment**. ASCE ed. Virginia - USA, [s.n.], 2010.

WOLFSBERGER, T., ALDRIAN, A., SARC, R., *et al.* "Landfill mining: Resource potential of Austrian landfills - Evaluation and quality assessment of recovered municipal solid waste by chemical analyses", **Waste Management and Research**, v. 33, n. 11, p. 962–974, 2015. DOI: 10.1177/0734242X15600051..

WORLD BANK GROUP. **What a Waste 2.0. A Global Snapshot of solid waste management to 2050**. [S.l: s.n.], 2018.

YANG, J., ZHANG, S., SHI, Y., *et al.* "Direct reuse of two deep-dewatered sludge cakes without a solidifying agent as landfill cover: geotechnical properties and heavy metal leaching characteristics", **RSC Advances**, v. 7, n. 7, p. 3823–3830, 2017. DOI: 10.1039/C6RA26480H. .

YANG, Jiakuan, ZHANG, S., SHI, Y., *et al.* "Direct reuse of two deep-dewatered sludge cakes without a solidifying agent as landfill cover: geotechnical properties and heavy metal leaching characteristics", **RSC Advances**, v. 7, n. 7, p. 3823–3830, 2017. DOI: 10.1039/C6RA26480H. .

YANG, Y., RENIERS, G., CHEN, G., *et al.* "A bibliometric review of laboratory safety in universities", **Safety Science**, v. 120, n. March, p. 14–24, 2019. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.06.022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.06.022>.

YARGICOGLU, E. N., REDDY, K. R. "Effects of biochar and wood pellets amendments added to landfill cover soil on microbial methane oxidation: A laboratory column study", **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 19–31, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.01.068. .

YESILLER, N., HANSON, J. L., RISKEN, J. L., *et al.* "Hydration Fluid and Field Exposure Effects on Moisture-Suction Response of Geosynthetic Clay Liners", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 145, n. 4, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002011. .

YESILLER, Nazli, HANSON, J. L., RISKEN, J. L., *et al.* "Hydration Fluid and Field Exposure Effects on Moisture-Suction Response of Geosynthetic Clay Liners", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 145, n. 4, p. 1–16, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002011. .

YOUNG, M. H., ALBRIGHT, W., POHLMANN, K. F., *et al.* "Incorporating parametric uncertainty in the design of alternative landfill covers in arid regions", **Vadose Zone Journal**, v. 5, n. 2, p. 742–750, 2006. DOI: 10.2136/vzj2005.0112. .

ZHAN, L.-T., JIAO, W.-G., KONG, L.-G., *et al.* "Feasibility analysis of using loess as soil cover material for landfills in Northwest China and its analysis of design thickness", **Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics**, v. 35, n. 12, p. 3361–3369, 2014. .

ZHAN, L. T., WU, T., FENG, S., *et al.* "A simple and rapid in situ method for measuring landfill gas emissions and methane oxidation rates in landfill covers", **Waste Management and Research**, v. 38, n. 5, p. 588–593, 2020. DOI:

10.1177/0734242X19893007.

Disponível

em:

<https://doi.org/10.1177/0734242X19893007>.

ZHAN, T. L. T., QIU, Q. W., XU, W. J. "Analytical solution for infiltration and deep percolation of rainwater into a monolithic cover subjected to different patterns of rainfall", **Computers and Geotechnics**, v. 77, p. 1–10, 2016. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.03.008. .

ZHANG, C., XU, T., FENG, H., *et al.* "Greenhouse gas emissions from landfills: A review and bibliometric analysis", **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 8, p. 1–15, 2019. DOI: 10.3390/su11082282. .

ZHANG, W., SUN, C. "Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humid regions", **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 6, n. 4, p. 356–365, 2014. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.12.005. .

ZHANG, Wenjie, SUN, C. "Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humid regions", **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 6, n. 4, p. 356–365, 2014. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.12.005. .

ZHANG, Z. F. "Algebraic expressions for estimating the impact depths of a surface barrier over a homogeneous soil", **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1002/vzj2.20003.

ZHANG, W. Analysis of moisture transport in an evapotranspiration cover. **Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, v. 27, n. SUPPL. 2, p. 3367–3373, 2008.

ZHAO L, XIA J, XU CY, WANG Z, SOBKOWIAK L AND LONG C. 2013. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. **J Geogr Sci** 23: 359-369.

## APÊNDICE I

Planilha formatação condicional dias com  
chuva e dias sem chuva  
(janeiro a dezembro, entre 1991 e 2020)

**JANEIRO (1991 A 2020)**

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2
3	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
4	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2
5	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2
6	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
8	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2
11	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
15	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16	1	2	1	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
18	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
19	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
20	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2
21	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
22	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2
23	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
24	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
25	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
26	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
27	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
28	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
29	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
30	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
31	1	2	1	2	2	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Legenda: 1 Sem chuva 2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	10	2	5	5	4	8	2	3	2	6	1	2	3	1	2	1	1	1	2	2	2	0	1	3	3	1	1	2	1	0	2,57
Sem Chuva	20	7	14	19	11	15	11	10	10	16	3	4	7	2	5	4	5	1	3	7	3	0	5	8	7	1	4	3	3	0	(Média)
Com Chuva	11	24	17	12	20	16	20	21	21	15	28	27	24	29	26	27	26	30	28	24	28	31	26	23	24	30	27	28	28	31	

**FEVEREIRO (1991 A 2020)**

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2
4	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
5	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
8	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2
10	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
11	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
13	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	2	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
15	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16	2	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
17	2	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
19	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
20	2	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
21	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
22	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
23	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
24	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2
25	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
26	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
27	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
28	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
29	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2

Legenda:      1 Sem chuva      2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	2	3	4	3	2	2	5	3	2	2	3	4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	2	2	1	0	1	0	1,73
Sem Chuva	7	10	13	9	9	7	9	12	10	7	6	9	1	1	2	1	1	1	0	2	1	1	2	2	4	4	1	0	3	0	(média)
Com Chuva	22	19	16	20	20	22	20	17	19	22	23	20	28	28	27	28	28	28	29	27	28	28	27	27	25	25	28	29	26	29	

MARÇO (1991 A 2020)

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2
4	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
6	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
9	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
11	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2
12	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
13	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
15	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
16	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
17	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
19	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
20	2	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
21	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
22	2	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
23	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
24	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
25	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
26	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
27	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
28	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
29	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
30	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
31	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Legenda: 1 Sem chuva 2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	3	3	5	9	3	4	3	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	3	4	1	3	2	1	2	0	1	1	1	0
Sem Chuva	13	11	11	19	10	14	9	7	5	6	2	1	4	6	1	1	1	2	4	5	2	7	3	1	4	0	2	1	3	0
Com Chuva	18	20	20	12	21	17	22	24	26	25	29	30	27	25	30	30	30	29	27	26	29	24	28	30	27	31	29	30	28	31

2,13  
(média)

ABRIL (1991 A 2020)

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
4	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
5	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
6	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
9	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
10	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
14	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
15	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2
17	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
18	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
19	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	2
20	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2
22	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2
23	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
24	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
25	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
26	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
27	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2
28	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
29	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
30	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1

Legenda: 1 Sem chuva 2 Com chuva

Nº dias Máximo sem  
chover

Sem Chuva

Com Chuva

2	4	3	9	5	3	3	3	3	1	1	2	5	1	5	0	1	1	0	1	0	2	1	2	1	2	2	1	1	1
8	12	9	18	10	10	12	13	3	4	5	6	9	5	7	0	3	2	0	2	0	8	5	2	3	4	5	1	2	1
22	18	21	12	20	20	18	17	27	26	25	24	21	25	23	30	27	28	30	28	30	22	25	28	27	26	25	29	28	29

2,20  
(média)



MAIO (1991 A 2020)																															
Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	
2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
4	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	
5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	
6	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	
7	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	
8	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	
9	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	
10	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	
11	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	
12	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	
13	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	
14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	
15	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	
16	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	
17	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	
18	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	
19	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	
20	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	
21	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	
22	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	
23	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	
24	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	
25	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	
26	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	
27	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	
28	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	
29	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	
31	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	

Legenda: 1 Sem chuva 2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	5	5	3	3	4	5	3	3	2	7	4	3	10	4	5	2	4	3	2	3	4	5	2	2	3	4	1	6	5	2	3,80 (média)	
Sem Chuva	11	10	12	12	16	13	10	9	9	19	8	5	16	12	12	5	10	6	5	6	8	13	6	5	8	8	4	13	12	5		
Com Chuva	20	21	19	19	15	18	21	22	22	12	23	26	15	19	19	26	21	25	26	25	23	25	26	23	23	27	18	19	26	26		

**JUNHO (1991 A 2020)**

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	2	2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1
2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	1
3	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2
4	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2
5	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2
6	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2
7	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1
8	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1
9	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2	2	1
10	1	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
11	1	1	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1
12	2	1	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
13	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2
14	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
15	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1
16	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2
17	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
18	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
19	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
20	2	1	2	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1
21	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1
22	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	1
23	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2
24	2	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1
27	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1
29	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1	1
30	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	2	1

Legenda: 1 Sem chuva 2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	2	8	3	5	5	2	10	5	2	6	6	3	5	8	11	13	11	19	8	8	7	5	3	5	4	6	7	10	6	7	6,67
Sem Chuva	9	14	10	18	12	7	20	15	10	18	15	12	16	20	22	21	20	27	16	16	19	15	13	19	9	13	20	25	18	23	(média)
Com Chuva	21	16	20	12	18	23	10	15	20	12	15	18	14	10	8	9	10	3	14	14	11	15	17	11	21	17	10	5	12	7	

**JULHO (1991 A 2020)**

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1
4	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1
5	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2
6	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1
7	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1
8	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1
9	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
10	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1
11	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1
12	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
13	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1
14	1	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	2	1
15	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2	1
16	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2
17	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2
19	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
20	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
21	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1
22	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1
23	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1
24	2	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1
25	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
26	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1
27	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1
29	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
30	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1
31	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Legenda:      1   Sem chuva   2   Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	5	4	3	4	8	3	5	2	4	6	7	6	27	11	11	12	11	31	13	13	16	11	3	9	3	9	19	10	12	15	9,77
Sem Chuva	16	16	12	19	16	15	16	12	19	15	23	18	30	25	26	25	22	31	27	24	26	23	13	21	14	24	27	21	21	29	(média)
Com Chuva	15	15	19	12	15	16	15	19	12	16	8	13	1	6	5	6	9	0	4	7	5	8	18	10	17	7	4	10	10	2	

**AGOSTO (1991 A 2020)**

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
5	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1
6	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1
7	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1
8	1	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1
9	2	2	2	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
12	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
13	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2
14	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1
15	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1
16	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1
17	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1
18	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1
19	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
20	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
21	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1
22	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1
23	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1
24	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2
25	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2
26	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	1
27	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1
28	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2
29	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2
30	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1

Legenda:

1 Sem chuva    2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	3	1	4	8	16	6	4	3	7	8	10	11	9	7	11	17	13	13	22	17	7	14	10	14	7	13	7	7	15	12
Sem Chuva	14	1	16	23	24	21	19	15	20	23	24	25	15	17	25	22	26	25	24	25	18	25	19	23	19	22	19	19	24	26
Com Chuva	17	30	15	8	7	10	12	16	11	8	7	6	16	14	6	9	5	6	7	6	13	6	12	8	12	9	12	12	7	5

9,87  
(média)

SETEMBRO (1991 A 2020)

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
3	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1
5	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1
6	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1
7	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1
9	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1
10	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1
12	2	1	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1
13	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2
14	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1
15	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1
16	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1
17	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1
18	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1
19	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1
20	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
21	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1
22	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
23	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2
24	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1
25	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2
26	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
27	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	2
28	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2
29	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	2
30	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1

Legenda: 1 Sem chuva 2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	6	16	8	12	28	10	14	6	13	4	6	5	3	2	4	12	5	3	5	7	8	6	6	5	9	4	8	6	5	11	7,90
Sem Chuva	19	27	22	25	29	21	20	13	24	7	20	13	12	10	14	17	18	11	20	22	22	20	13	16	23	10	21	18	16	22	(média)
Com Chuva	11	3	8	5	1	9	10	17	6	23	10	17	18	20	16	13	12	19	10	8	8	10	17	14	7	20	9	12	14	8	

**OUTUBRO (1991 A 2020)**

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	1
3	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2
4	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1
5	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
6	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	2
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1
9	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2
10	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2
11	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2
12	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2
13	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2
15	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1
16	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1
17	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2
18	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2
19	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1
20	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2
21	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2
22	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	2
23	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2
24	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2
25	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2
26	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2
27	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
28	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1
29	1	2	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2
30	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2
31	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2

Legenda:      1   Sem chuva   2   Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	10	28	12	8	17	6	17	9	8	3	7	6	2	3	7	7	5	3	6	3	3	4	4	2	6	5	3	6	1	2	6,77
Sem Chuva	20	30	26	23	28	19	23	26	23	11	13	16	7	9	16	15	15	12	14	11	7	10	13	12	21	10	9	15	3	9	(média)
Com Chuva	11	1	5	8	3	12	8	5	8	20	18	15	24	22	15	16	16	19	17	20	24	21	18	19	10	21	22	16	28	22	

NOVEMBRO (1991 A 2020)

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2
4	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1
6	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2
7	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2
8	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
9	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2
11	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2
12	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2
13	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1
14	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1
15	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2
16	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2
17	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2
18	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
19	1	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
20	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
21	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1
22	2	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2
23	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2
24	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
25	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2
26	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2
27	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
28	2	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2
29	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2
30	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2

Legenda: 1 Sem chuva 2 Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	6	16	8	4	13	3	5	12	5	3	4	2	3	4	2	3	1	3	4	2	4	1	2	5	2	3	2	2	2	2
Sem Chuva	20	22	22	15	21	13	20	20	17	24	22	15	5	9	10	7	12	4	12	10	8	9	2	12	12	8	7	4	5	4
Com Chuva	10	8	8	15	9	17	10	10	13	6	8	15	25	21	20	23	18	26	18	20	22	21	28	18	18	22	23	26	25	26

4,30  
(média)

**DEZEMBRO (1991 A 2020)**

Dias	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1
2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2
3	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2
4	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2
5	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1
6	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2
7	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2
8	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2
9	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	2
10	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2
11	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2
12	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2
13	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
14	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2
15	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2
18	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
19	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
20	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2
21	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
22	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
23	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2
24	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
25	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
26	1	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2
27	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2
28	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
29	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
30	1	2	2	1	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
31	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2

Legenda:      1   Sem chuva      2   Com chuva

Nº dias Máximo sem chover	6	8	4	3	4	5	5	4	2	3	1	2	3	3	2	2	2	1	0	1	5	2	4	2	5	2	1	1	2	1	2,87
Sem Chuva	17	16	19	12	16	16	15	14	9	6	2	9	13	7	6	6	6	3	0	3	12	5	9	5	17	6	3	3	5	2	(média)
Com Chuva	14	15	12	19	15	15	16	17	22	25	29	22	18	24	25	25	25	28	31	28	19	26	22	26	14	25	28	28	26	29	



## APÊNDICE II

# Balanço Hídrico Diário (março 1991 e fevereiro 2018)

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DIÁRIO MARABÁ-PA (Modelo de Balanço Thornthwaite e Mather (1957)/Koerner e Daniel (1997)-Fevereiro 2018																												Soma
fev/18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (EP)																												
Temperatura média (C°)	25,76	26,05	24,50	24,28	25,48	23,08	23,85	26,12	24,43	25,45	26,17	24,78	25,26	25,79	25,16	25,97	24,52	25,73	25,67	26,14	25,47	24,48	25,24	25,76	24,55	25,10	25,29	25,79
Índice de calor (Hm)	11,96	12,17	11,09	10,94	11,77	10,13	10,65	12,22	11,04	11,75	12,26	11,28	11,61	11,99	11,55	12,11	11,10	11,94	11,90	12,23	11,76	11,08	11,60	11,96	11,12	11,50	11,63	11,99
UPEF (mm)	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Luz solar média diária (N)	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90	27,90
Evapotranspiração potencial (EP) (mm)	0,11	0,14	0,04	0,03	0,09	0,01	0,02	0,15	0,04	0,09	0,16	0,05	0,07	0,11	0,07	0,13	0,04	0,11	0,10	0,15	0,09	0,04	0,07	0,11	0,04	0,06	0,08	0,11
CÁLCULO DO BALANÇO INFILTRAÇÃO (IN) x EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (EP) = (IN-EP)																												
Precipitação real diária - P (mm)	3,9	0,1	52,9	3,9	43,7	75,1	5	0,5	14,3	37,3	1	1,7	8,3	7,7	6,7	7,2	7,8	47,2	1,4	23,9	7,2	45,4	4,4	0,9	70,5	2,9	0,6	1,8
Escoamento superficial - R (mm)	0,86	0,02	11,64	0,86	9,61	16,52	1,10	0,11	3,15	8,21	0,22	0,37	1,83	1,69	1,47	1,58	1,72	10,38	0,31	5,26	1,58	9,99	0,97	0,20	15,51	0,64	0,13	0,40
Infiltração - (IN - P - R) (mm)	3,04	0,08	41,26	3,04	34,09	58,58	3,90	0,39	11,15	29,09	0,78	1,33	6,47	6,01	5,23	5,62	6,08	36,82	1,09	18,64	5,62	35,41	3,43	0,70	54,99	2,26	0,47	1,40
Balanço - (IN - EP) (mm)	2,93	-0,06	41,22	3,01	34,00	58,57	3,88	0,24	11,12	29,01	0,62	1,28	6,40	5,89	5,16	5,48	6,05	36,71	0,99	18,49	5,53	35,37	3,36	0,59	54,95	2,20	0,39	1,29
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ET)																												
Perda de água acumulada - WL (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	34,00	92,57	96,44	96,69	107,80	136,81	137,44	138,71	145,11	151,01	156,16	161,65	167,69	204,40	205,39	223,88	229,41	264,78	268,14	268,73	323,68	325,88	326,27	327,56
Água armazenada no solo - WS (mm)	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74	57,74
Armazenamento de água- AWS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evapotranspiração real - ET (mm)	0,11	0,14	0,04	0,03	0,09	0,01	0,02	0,15	0,04	0,09	0,16	0,05	0,07	0,11	0,07	0,13	0,04	0,11	0,10	0,15	0,09	0,04	0,07	0,11	0,04	0,06	0,08	0,11
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA A CAMADA INFERIOR (Q)																												
Percolação - PERC (mm)	2,93	-0,06	41,22	3,01	34,00	58,57	3,88	0,24	11,12	29,01	0,62	1,28	6,40	5,89	5,16	5,48	6,05	36,71	0,99	18,49	5,53	35,37	3,36	0,59	54,95	2,20	0,39	1,29
Fluxo de Chegagem - Ck (mm)	3,90	0,10	52,90	3,90	43,70	75,10	5,00	0,50	14,30	37,30	1,00	1,70	8,30	7,70	6,70	7,20	7,80	47,20	1,40	23,90	7,20	45,40	4,40	0,90	70,50	2,90	0,60	1,80
Fluxo de percolação - Qrec (m³/s)	2,26E-05	-4,83E-07	3,18E-04	2,33E-05	2,63E-04	4,52E-05	3,00E-05	1,80E-06	8,59E-05	2,24E-04	4,82E-06	9,87E-06	4,95E-05	4,55E-05	3,99E-05	4,24E-05	4,67E-05	2,84E-04	7,64E-06	4,33E-04	4,27E-05	2,73E-04	2,60E-05	4,57E-06	4,25E-04	1,70E-05	3,04E-06	9,97E-06