

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**CARLOS ALEXANDRE QUADROS DA SILVA**

**MODELAGEM NUMÉRICA DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA:  
Dois Sistemas de Cobertura Final de Aterro Sanitário no Vale do Rio dos Sinos**

**São Leopoldo  
2025**

CARLOS ALEXANDRE QUADROS DA SILVA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA:  
Dois Sistemas de Cobertura Final de Aterro Sanitário no Vale do Rio dos Sinos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciana Paulo Gomes

**São Leopoldo  
2025**

S586m Silva, Carlos Alexandre Quadros da.  
Modelagem numérica de infiltração de água : dois sistemas de cobertura final de aterro sanitário no Vale do Rio dos Sinos / Carlos Alexandre Quadros da Silva. – 2025.  
139 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.  
“Orientador: Prof. Dr. Luciana Paulo Gomes”.

1. Aterro sanitário. 2. Cobertura final de solos. 3. Fluxo vertical. 4. HYDRUS-1D. 5. Meteorologia. 6. Regressão linear múltipla. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

## **AGRADECIMENTOS À CAPES**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos meus pais (Ana Luiza e Jáder José), à minha irmã querida (Anne Louise), e aos meus avós maternos (Carlos Alberto e Domingas Quadros) que sempre me arrimaram. Que se orgulhem por tudo que arrisquei até chegar aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha profunda gratidão, em especial à minha família, por todo o apoio incansável que recebi ao embarcar na jornada que me levou de Araguaína-TO para longe de casa aos 17 anos, no ano de 2017. A confiança depositada por meus pais, Jáder José e Ana Luiza, foi a base sólida que sustentou cada passo dessa trajetória desafiadora. Amo-os não apenas pela credibilidade que depositaram em mim, mas também pelo suporte emocional e financeiro que tornaram possível essa caminhada.

À minha irmã Anne Louise, expresso minha gratidão pela compreensão diante da minha ausência, por entender cada momento em que estive ausente devido às demandas dessa jornada. Em meio às brincadeiras, abraços e carinhos compartilhados, sua compreensão foi um alicerce fundamental.

Aos meus avós maternos, Carlos Alberto e à saudosa Domingas, dedico meu agradecimento profundo. Herdei do meu avô não apenas o primeiro nome, mas também a ambição profissional que guiou meus passos. À minha avó, agradeço eternamente por todo o amor e fidelidade que ela e meu avô me ensinaram.

À minha orientadora, Luciana Paulo Gomes, expresso minha gratidão por todo o apoio fornecido durante a elaboração da dissertação, especialmente na fase de abordagem estatística.

Agradeço imensamente aos amigos Brenda Pereira e Leonardo Zanoelo pelo apoio em diversos projetos ao longo da graduação. Também expresso minha gratidão a Kamila Vedana, cujo auxílio foi essencial na obtenção de materiais para os ensaios laboratoriais.

À professora Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira, sou grato por ter me introduzido ao cativante universo da Geotecnia Ambiental. Seu apoio e entusiasmo foram fundamentais para minha trajetória acadêmica.

Expresso minha profunda gratidão à minha parceira Juliana Alves, a quem dedico imenso reconhecimento por ser uma fonte constante de serenidade em meio à agitação cotidiana. Agradeço por seu papel fundamental em me auxiliar a evoluir como ser humano, habilmente equilibrando meus pontos fracos e fortes. Sua presença tem sido um farol que ilumina meu caminho, ajudando-me a crescer e aprimorar-me em diversos aspectos da vida.

"Na busca pela sustentabilidade, erguemos barreiras que transcendem a mera contenção de resíduos. Na dualidade do solo, encontramos não apenas a proteção, mas a simbiose entre a natureza e a engenharia, moldando um futuro em que a preservação ambiental se enraíza em cada camada. Impermeabilizar é preservar; construir é harmonizar. Neste solo diverso, erguemos alicerces para um amanhã mais resiliente."

Carlos Alexandre Quadros da Silva

## RESUMO

Os métodos de cálculos numéricos tornaram-se muito mais eficientes, transformando sua aplicação na resolução de problemas cada vez mais difundida. As interfaces amigáveis estabelecem a configuração de um modelo muito mais fácil e intuitivo, enquanto o aumento da velocidade dos computadores pode resolver problemas difíceis em questão de minutos. Uma série de modelos computacionais para a estimativa dos processos pluviométricos e seu impacto no desempenho dos sistemas de cobertura de aterros tem se tornado valiosos aparatos na contemporaneidade, sobretudo para a avaliação da camada de cobertura final de solo compactado. Dentre eles, um dos mais notórios se trata do HYDRUS-1D, um software baseado no Método de Elementos Finitos, que simula o movimento unidimensional de água, calor e soluto, em meios porosos variavelmente saturados, para várias condições limite, incluindo precipitação e evaporação. Utilizou-se o HYDRUS-1D para modelar o balanço hídrico em camadas de cobertura final de aterros sanitários no Vale do Rio dos Sinos, empregando dados laboratoriais de granulometria, limites de Atterberg, compactação, permeabilidade e sucção de solos coletados em São Leopoldo e Esteio (RS), e ajustando séries meteorológicas (1991–2020) de precipitação, temperaturas, umidade relativa, evapotranspiração, insolação e vento por regressão linear múltipla ( $R^2$  ajustado  $\approx 0,895$ ) para os meses de maior e menor pluviosidade; comparou-se o desempenho de sistemas de cobertura convencional e evapotranspirativa em regime unidimensional, constatando que a cobertura evapotranspirativa reduz significativamente a percolação de água ao manter o solo em condição não saturada por mais tempo; conclui-se que a integração de ensaios de caracterização, análise estatística e simulação numérica fornece subsídios precisos para o dimensionamento e seleção de materiais, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais associados a entrada de água no Aterro Sanitário.

**Palavras-chave:** Fluxo Vertical. Aterro Sanitário. HYDRUS-1D. Cobertura Final de Solos. Infiltração. Meteorologia. Regressão Linear Múltipla.



## ABSTRACT

Numerical calculation methods have become much more efficient, making their application in problem-solving increasingly widespread. User-friendly interfaces make model configuration much easier and more intuitive, while the increase in computer speed can solve difficult problems in a matter of minutes. A series of computational models for estimating rainfall processes and their impact on the performance of landfill cover systems have become valuable tools in contemporary times, especially for evaluating the final cover layer of compacted soil. Among them, one of the most notable is HYDRUS-1D, a software based on the Finite Element Method that simulates the one-dimensional movement of water, heat and solute in variably saturated porous media for various limit conditions, including precipitation and evaporation. HYDRUS 1D was used to model the water balance in final cover layers of sanitary landfills in the Vale do Rio dos Sinos, using laboratory data on granulometry, Atterberg limits, compaction, permeability and suction of soils collected in São Leopoldo and Esteio (RS), and adjusting meteorological series (1991–2020) of precipitation, temperatures, relative humidity, evapotranspiration, insolation and wind by multiple linear regression (adjusted  $R^2 \approx 0.895$ ) for the months of highest and lowest rainfall; the performance of conventional and evapotranspiratory cover systems was compared in a one-dimensional regime, finding that the evapotranspiratory cover significantly reduces water percolation by keeping the soil in an unsaturated condition for longer; It is concluded that the integration of characterization tests, statistical analysis and numerical simulation provides precise subsidies for the dimensioning and selection of materials, contributing to the minimization of environmental impacts associated with water inlet the landfill.

**Key-words:** Vertical Flow. Sanitary Landfill. HYDRUS-1D. Final Soil Coverage. Infiltration. Meteorology. Multiple Linear Regression.

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AGRITEMPO	Sistema de Monitoramento Agrometeorológico
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCAS	Curva Característica de Água no Solo
EDP	Equação Diferencial Parcial
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RCC	Resíduo de Construção Civil
RPE	Regressão Polinomial Evolutiva
RSS	Resíduo de Serviço de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SciELO	Scientific Electronic Library Online
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
USDA	United States Department of Agriculture
USEPA	United States Environmental Protection Agency

## LISTA DE SIMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
G	Grama
J	Joule
K	Kelvin
Kg	Quilograma
Km	Quilômetro
K <sub>sat</sub>	Coeficiente de Permeabilidade
M	Metro
Mca	Metro de coluna d'água
mm	Milímetro
mol	Unidade de quantidade de substância
N	Newton
Pa	Pascal
S	Segundo
ton	Tonelada
W	Teor de Umidade
Θ	Umidade Volumétrica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resultados da Etapa de Inclusão e Exclusão dos trabalhos.....	23
Figura 2 - Ciclo Hidrológico (IMAGEM COLORIDA).....	25
Figura 3 - Mesorregião e Microrregião de coleta das amostras .....	50
Figura 4 - Bairros da Cidade de São Leopoldo/RS, com destaque em vermelho da localização da coleta .....	51
Figura 5 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos .....	56
Figura 6 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos .....	56
Figura 7 - Mapa da Altimetria do estado do Rio Grande do Sul .....	59
Figura 8 - Mapa dos Solos do estado do Rio Grande do Sul .....	61
Figura 9 – Representação esquemática das passagens dos estados de consistência do solo.....	71
Figura 10 - Esquema de montagem do ensaio de permeâmetro de carga variável ..	80
Figura 11 - Esquema de montagem do ensaio de permeâmetro de carga constante .....	82
Figura 12 - Temperatura e Precipitação Média de São Leopoldo/RS. ....	86
Figura 13 – Ilustração dos dois tipos de cobertura.....	89
Figura 14 – Limite de Liquidez – Areia Siltosa .....	100
Figura 15 – Limite de Liquidez – Argila Arenosa .....	100
Figura 16 – Curva Granulométrica – Areia Siltosa .....	105
Figura 17 – Curva Granulométrica – Areia Siltosa .....	106
Figura 18 – Compactação – Areia Siltosa .....	106
Figura 19 – Compactação – Argila Arenosa.....	107
Figura 20 – Precipitação média mensal acumulada de São Leopoldo entre 1991 a 2020 .....	114
Figura 21 – Insolação média mensal acumulada de São Leopoldo entre 1991 a 2020 .....	114
Figura 22 – Umidade relativa do ar média mensal de São Leopoldo entre 1991 a 2020. ....	115
Figura 23 – Evaporação média mensal acumulada de São Leopoldo entre 1991 a 2020. ....	115
Figura 24 – Velocidade média do vento (km/dia) em São Leopoldo entre 1991 a 2020. ....	116

Figura 25 – Temperatura Máxima, Mínima e Média Mensal de São Leopoldo entre 1991 a 2020. ....	117
Figura 26 – Precipitação média diária para o mês de abril em São Leopoldo entre 1991 a 2020. ....	118
Figura 27 – Precipitação média diária para o mês de outubro em São Leopoldo entre 1991 a 2020. ....	119
Figura 28 – Comparação da precipitação média diária para os meses de abril e outubro em São Leopoldo entre 1991 a 2020. ....	120
Figura 29 – Gráficos de CCAS das vertentes.....	121
Figura 30 – Gráficos de Coeficiente de Permeabilidade das vertentes.....	122
Figura 31 – Gráficos de Altura de Coluna d'Água das vertentes para o mês de abril .....	123
Figura 32 – Gráficos de Altura de Coluna d'Água das vertentes para o mês de outubro .....	123
Figura 33 – Gráficos de Fluxo de Água das vertentes para o mês de abril.....	124
Figura 34 – Gráficos de Fluxo de Água das vertentes para o mês de outubro .....	125
Figura 35 – Representação esquemática das coberturas convencionais e evapotranspirativas .....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de amostra a ser tomada .....	63
Tabela 2 – Energias de Compactação .....	74
Tabela 3 - Limite de Plasticidade – Areia Siltosa .....	100
Tabela 4 - Limite de Plasticidade – Argila Arenosa .....	101
Tabela 5 – Peneiramento – Areia Siltosa .....	101
Tabela 6 – Peneiramento – Argila Arenosa.....	101
Tabela 7 – Sedimentação – Areia Siltosa .....	102
Tabela 8 – Sedimentação – Argila Arenosa .....	103
Tabela 9 – Análise Granulométrica – Areia Siltosa .....	104
Tabela 10 – Análise Granulométrica – Argila Arenosa.....	105
Tabela 11 – Permeabilidade – Areia Siltosa.....	109
Tabela 12 – Permeabilidade – Argila Arenosa .....	110
Tabela 13 – Sucção .....	112
Tabela 14 – Estatísticas de Ajuste do Modelo de Regressão Linear Múltipla para Precipitação.....	113

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados da Pesquisa Exploratória Inicial .....	22
Quadro 2 - Propriedades das Estações Meteorológicas .....	86
Quadro 3 - Condições Gerais de Entrada no HYDRUS-1D.....	94
Quadro 4 - Condições de Contorno no HYDRUS-1D.....	95

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	17
1.1 TEMA .....	20
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	20
1.3 PROBLEMA .....	20
1.4 OBJETIVOS .....	20
1.4.1 Objetivo geral .....	20
1.4.2 Objetivos específicos.....	21
1.5 JUSTIFICATIVA .....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA .....	22
2.2 BALANÇO HÍDRICO .....	24
2.2.1 Infiltração .....	25
2.3 DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	27
2.3.1 Aterro Sanitário .....	28
2.3.2 Camada de Cobertura Diária e Intermediária .....	29
2.3.3 Camada de Cobertura Final.....	30
2.4 INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO .....	31
2.4.1 Fatores Influenciadores .....	32
2.4.2 Determinação da Taxa de Infiltração .....	34
2.4.3 Métodos Indiretos .....	34
2.4.4 Modelos Estatísticos .....	40
2.5 CORRELAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS .....	45
3 METODOLOGIA .....	48
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	49
3.1.1 Clima.....	52
3.1.2 Hidrografia .....	54
3.1.3 Topografia e Geomorfologia .....	57
3.1.4 Solo.....	59
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	61
3.2.1 Preparação da amostra de solo e verificação do teor de umidade.....	63
3.2.2 Granulometria .....	66



3.2.3 Limites de Atterberg.....	70
3.2.4 Compactação .....	73
3.2.5 Permeabilidade .....	77
3.2.6 Sucção.....	83
3.3 ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO CLIMA.....	85
3.4 MODELAGEM DE INFILTRAÇÃO .....	88
4 RESULTADOS .....	98
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....	98
4.2 ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO CLIMA.....	112
4.3 MODELAGEM DE INFILTRAÇÃO .....	121
4.3.1 Curva Característica de Água no Solo .....	121
4.3.2 Coeficiente de Permeabilidade .....	122
4.3.3 Altura de Coluna d'Água .....	122
4.3.4 Fluxo de Água.....	124
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS E MODELAGEM.....	125
4.4.1 Cobertura Convencional (CONV).....	126
4.4.2 Cobertura Evapotranspirativa (BARCAP) .....	127
4.4.3 Síntese da Convergência Ensaios × Modelagem .....	127
5 CONCLUSÕES .....	129
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	132
REFERÊNCIAS .....	133

## 1 INTRODUÇÃO

Na contemporaneidade, são realizadas uma série de estudos referentes ao impacto do balanço hídrico sobre a constituição dos solos. Desta forma, um conjunto de aparatos e equações desenvolvidas com o avanço tecnológico proveniente da Revolução Técnico-Científico-Informacional (Terceira Revolução Industrial) auxiliam a mensurar o quantitativo referente aos agentes do ciclo hidrológico, compondo a infiltração, precipitação, condensação e escoamento superficial da água e suas diversas etapas sobre a biosfera.

Logo, para inteligência e assimilação da constituição e estabilidade dos solos, com sua posterior relação climatológica, deve-se compreender as interatividades com o relevo e a atuação dos processos hidrológicos, no balanço hídrico, compondo assim os parâmetros hidrogeológicos (SÍRIO; BARBASSA, 2017).

A concepção de balanço hídrico é considerada como a soma dos processos que sucedem às precipitações pluviométricas, de modo a computar a totalidade entre as entradas e saídas de água disponíveis em um ecossistema (SANTOS, 2018).

Primeiramente, a água precipitada sobre uma bacia hidrográfica apresenta três principais caminhos. O primeiro caminho é composto pela infiltração no solo, o qual sofre intervenção do relevo e das propriedades geológicas apresentadas pelos solos, como índice de vazios (SILVA, 2017). Deve-se lembrar que existem três principais tipos de solos classificados com base na composição de suas partículas: argilosos, siltosos e arenosos, dispostos de acordo com o diâmetro de seus grãos e, portanto, propriedade que influencia em sua permeabilidade. Vale ressaltar que a infiltração se torna favorecida em um relevo plano ou com baixa declividade.

A segunda possibilidade inclui o chamado “Runoff” ou escoamento superficial. O escoamento superficial é intensificado de acordo com a declividade do relevo e característica do meio físico, de forma que uma disposição íngreme do solo diminui as taxas de infiltrações e de recarga de aquíferos subterrâneos (depósitos geológicos de água que permitam seu escoamento) (SÍRIO; BARBASSA, 2017).

A terceira parcela compreende à etapa de evaporação superficial do corpo de água, acentuada em regiões de temperatura elevada. Por conseguinte, balanço hídrico compreende ao montante de água disponível pela execução do ciclo hidrológico, subtraindo-se das águas que infiltram no solo e do total que compõe a evapotranspiração (BORGES NETO, 2021).

Os corpos de água responsáveis pelo escoamento superficial compõem os rios, sistemas de drenagem superficial. Além disto, a taxa de infiltração está diretamente relacionada com a quantia de precipitação e das características do relevo, influenciando a organização dos horizontes do solo (BORGES NETO, 2021).

O solo constitui-se como o principal recurso natural motivador da manutenção da flora e da fauna terrestre, bem da convivência com a agricultura e a pecuária. Tais corpos naturais são diretamente responsáveis pelo depósito de água e como sustentáculo para as obras de construção civil. Sem modificar suas propriedades naturais, age como filtro, visando a depuração das águas freáticas, que irão se deslocar para aquíferos e rochas matriz (SÍRIO; BARBASSA, 2017).

Importante destacar que a gestão inadequada das atividades agropecuárias tem a capacidade de ocasionar processos erosivos nos solos, favorecendo processos de assoreamento de rios, e contribuindo para a eventualidade de cheias e alagamentos (SILVA, 2017).

Da mesma forma o gerenciamento de resíduos sólidos, sejam estes urbanos, industriais, hospitalares, de construção civil ou nucleares, viabilizam a deterioração dos ecossistemas, provocando um desequilíbrio de suas características e da própria sustentabilidade no planeta (SILVA, 2017).

À correspondência dos resíduos sólidos, considera-se que a sua disposição seja amplamente aceita em aterros sanitários (BRASIL, 2010), uma vez que apresentam vida útil de cerca de 10 a 15 anos (USEPA, 2011) e são aprovados por diversos órgãos competentes no país (SILVA, 2019). Embora alguns aterros possam não atingir esse tempo máximo, a geração de **lixiviado** e gases continua por pelo menos 15 anos após o encerramento das atividades, sendo necessário monitoramento contínuo e medidas para minimizar impactos ambientais (USEPA, 2011).

A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), determina que a disposição final dos resíduos sólidos deve ser realizada de forma ambientalmente adequada, com ênfase na redução, reutilização, reciclagem e tratamento. A lei exige que os resíduos sejam descartados em aterros sanitários, que seguem normas rigorosas para evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública, como a contaminação do solo, da água e do ar. A destinação adequada visa garantir a segurança e o monitoramento contínuo dos resíduos, conforme estabelecido pela

PNRS, que busca minimizar os impactos ambientais e promover a responsabilidade compartilhada entre os diversos setores da sociedade (BRASIL, 2010).

Dentre os principais tipos de resíduos sólidos, juntamente com os resíduos de mineração, os resíduos urbanos são os de maior taxa de geração, de modo que são economicamente dispostos em aterros sanitários, substituindo os conhecidos “lixões”, minorando os impactos ambientais (BRAGAGNOLO *et al*, 2020).

Existem basicamente dois tipos de aterros sanitários: aterros convencionais e aterros em valas. Aterros convencionais são formados por camadas de resíduos compactados que são dispostos acima do nível do solo, criando uma estrutura semelhante a uma pirâmide ou escada. Aterros em valas, por outro lado, utilizam trincheiras ou valas escavadas no solo para receber os resíduos, que são então cobertos e compactados (SILVA, 2017).

Os principais tipos de aterros sanitários são cobertos por solos compactados, os quais apresentam como principal função a diminuição da infiltração das precipitações pluviométricas sobre as células que compõem o aterro, visando a minimização de produção **de lixiviado** (SILVA, 2019). Tal ação reprime os gastos com redes de drenos verticais interligados a drenos horizontais e sobretudo com o tratamento do lixiviado (SILVA, 2019). A água da chuva ao infiltrar entra em contato com o resíduo aterrado produz um líquido conhecido como lixiviado, uma fonte significativa de poluição que pode resultar em séria contaminação das águas superficiais e subterrâneas (MACHADO *et al*, 2019).

Destarte, deve-se estudar com muita cautela as propriedades hidrogeológicas do solo a ser utilizado como camada final de um aterro sanitário (SILVA, 2019). Contudo, a realidade brasileira é carente de estudos hidrogeológicos quanto à utilização de solos para cobertura final em aterros sanitários, urgindo seu estudo.

Este estudo simula a infiltração vertical em fluxo unidimensional em camadas de solo de São Leopoldo/RS e Esteio/RS, consideradas como cobertura final de aterro sanitário, utilizando a série histórica pluviométrica de 1991–2020 e os meses de precipitação média anual máxima e mínima.

Analizou-se as propriedades referentes à redução da precipitação pluviométrica sobre as células de resíduos sólidos urbanos, e com isto diminuir a percolação do lixiviado para os aquíferos e águas subterrâneas.

## 1.1 TEMA

Na contemporaneidade, os estudos sobre o impacto do balanço hídrico nos solos são frequentes. Tecnologias avançadas provenientes da Revolução Técnico-Científico-Informacional possibilitam a mensuração de agentes do ciclo hidrológico, como infiltração, precipitação, condensação e escoamento superficial, essenciais para compreender a constituição e estabilidade dos solos.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A compreensão das interações entre relevo, processos hidrológicos e balanço hídrico é crucial para a compreensão da relação climatológica e dos parâmetros hidrogeológicos. Busca-se ressaltar a importância da infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração, ressaltando a influência do relevo e das propriedades geológicas dos solos.

## 1.3 PROBLEMA

A adequada construção e manutenção da camada superior de cobertura de aterros sanitários é essencial para minimizar a infiltração de água de chuva e, conseqüentemente, a geração e percolação de lixiviado. Este estudo destaca a importância de sistemas de proteção na cobertura superior para reduzir o risco de contaminação de aquíferos e recursos hídricos subterrâneos em aterros sem barreiras de vazamento.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

Analisar o perfil de infiltração de água proveniente de precipitação pluviométrica padrão do município de São Leopoldo-RS em camada de cobertura de aterros sanitários através do emprego do software Hydrus-1D.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

- a) avaliar a infiltração de água de chuva até a camada de resíduos sólidos em dois tipos de cobertura (convencional e evapotranspirativa);
- b) quantificar o fluxo vertical de água de chuva que percola no solo compactado, em milímetros, em cada tipo de cobertura;
- c) comparar os resultados de infiltração simulados pelo software HYDRUS-1D com os obtidos em ensaios laboratoriais;
- d) analisar e confrontar o desempenho hidráulico das coberturas convencional e evapotranspirativa, evidenciando suas eficiências relativas a restrição da percolação de lixiviado.

#### 1.5 JUSTIFICATIVA

Considera-se a constante pretensão por informação presente desde a Revolução Técnico-Científico-Informacional, intensificada em referência aos materiais de construção civil em obras de terra da contemporaneidade, torna-se de suma importância a investigação das características físicas e propriedades hidrogeológicas desejáveis para aplicação do material natural em obras geotécnicas como em camadas de aterros sanitários.

A escolha adequada do tipo e da espessura da camada superior de cobertura em aterros sanitários é fundamental para garantir a minimização da infiltração de água de chuva e, conseqüentemente, reduzir a geração de lixiviado. A comparação entre sistemas de cobertura convencional e evapotranspirativa permite identificar o mais eficiente sob diferentes regimes hidrológicos, fornecendo subsídios práticos para o dimensionamento em projetos de encerramento de aterros. Assim, ao avaliar e contrastar o desempenho hidráulico dessas duas alternativas, este estudo contribui para a seleção otimizada de materiais e técnicas construtivas capazes de prevenir contaminações de aquíferos e reduzir impactos ambientais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A palavra sistemática refere-se a forma de condução da pesquisa, com ciclo de etapas pré-determinadas. Portanto, leva o autor a conseguir uma pesquisa da literatura de maneira planejada, sequenciadas, responsável e justificável, rigorosa, auditável, replicável e atualizável (DRESCH *et al.*, 2020).

Assim como os trabalhos de Afonso *et al.* (2012), Fahimnia *et al.* (2015) e Li *et al.* (2018), empregaram o uso da RSL inicialmente em um ciclo de tentativa de definição de strings (termos de busca).

A string criada e utilizada na base de pesquisa de artigos foi fundamentada em pesquisa exploratória inicial da literatura sobre a temática, formada pelas palavras-chave do presente trabalho (Fluxo Vertical; Aterro Sanitário; HYDRUS-1D; Cobertura Final de Solos; Infiltração), de modo a encontrar trabalhos com ao menos uma das palavras chave. As bases utilizadas foram os bancos de dados virtuais Elsevier, Scientific Electronic Library Online (SciELO) e ScienceDirect, entre os anos 2017 a 2021.

O Quadro 1 apresenta os termos de busca, período de pesquisa, fontes, tipos de publicação e strings utilizadas para a realização da pesquisa exploratória inicial.

Quadro 1 - Dados da Pesquisa Exploratória Inicial

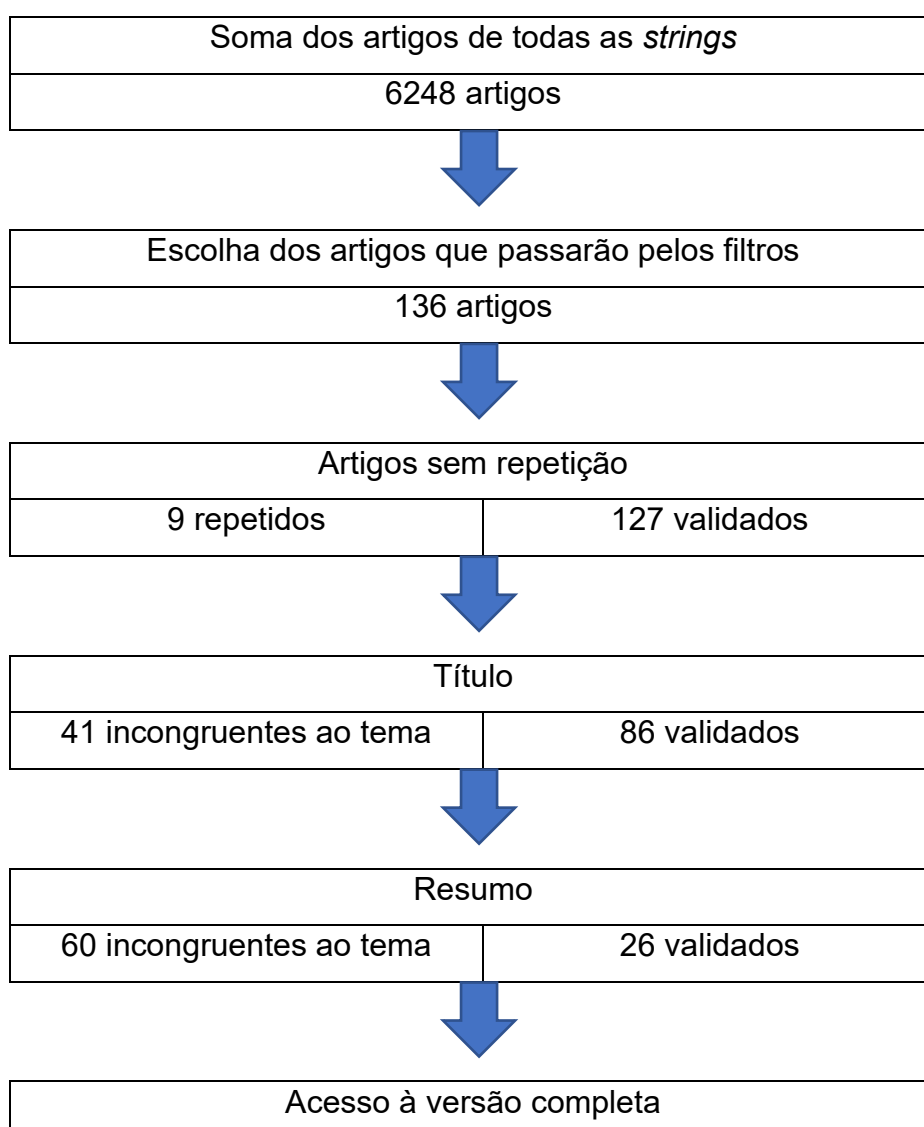
Termos de Busca	Período
1 <i>Vertical Flow</i> 2 <i>Sanitary Landfill</i> 3 <i>HYDRUS-1D</i> 4 <i>Final Soil Coverage</i> 5 <i>Infiltration</i> 6 <i>Meteorology</i> 7 <i>Multiple Linear Regression</i>	2013 a 2023
Fontes	Tipo de Publicação
1 <i>ICE Virtual Library</i> 2 <i>Science Direct</i> 3 <i>Elsevier</i>	Dissertação, Trabalho de Conclusão de Curso, Revista e Conferência

4 Scielo	
5 Web of Science	
<i>Strings de Busca</i>	
1 <i>Vertical Flow* AND Sanitary Landfill* AND HYDRUS-1D;</i>	
2 <i>Vertical Flow* AND Sanitary Landfill* AND Final Soil Coverage.</i>	
3 <i>Vertical Flow* AND Sanitary Landfill* AND Infiltration.</i>	
4 <i>Vertical Flow* AND Infiltration * AND Meteorology* AND Multiple Linear Regression.</i>	

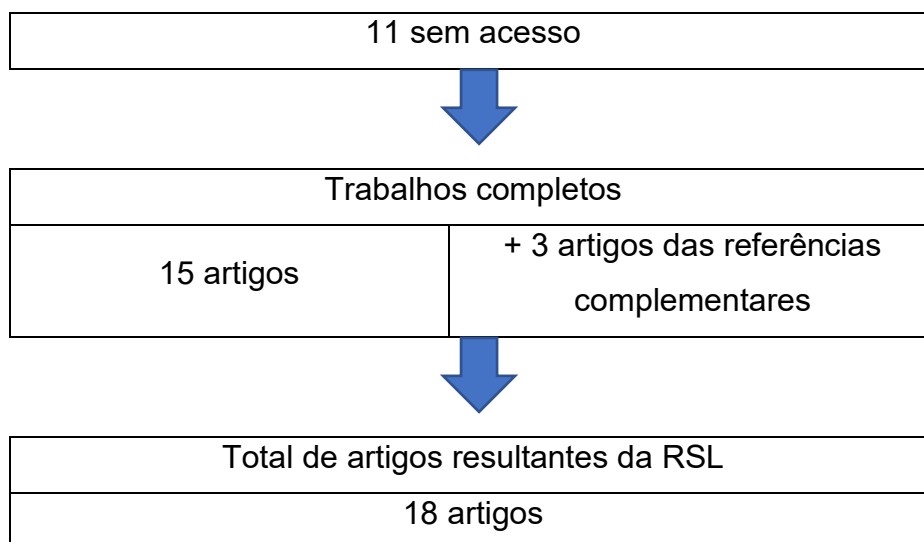
Fonte: Autor, 2025.

Realizada a pesquisa exploratória inicial, passou-se aos resultados da filtragem, dispostos na Figura 1:

Figura 1 - Resultados da Etapa de Inclusão e Exclusão dos trabalhos







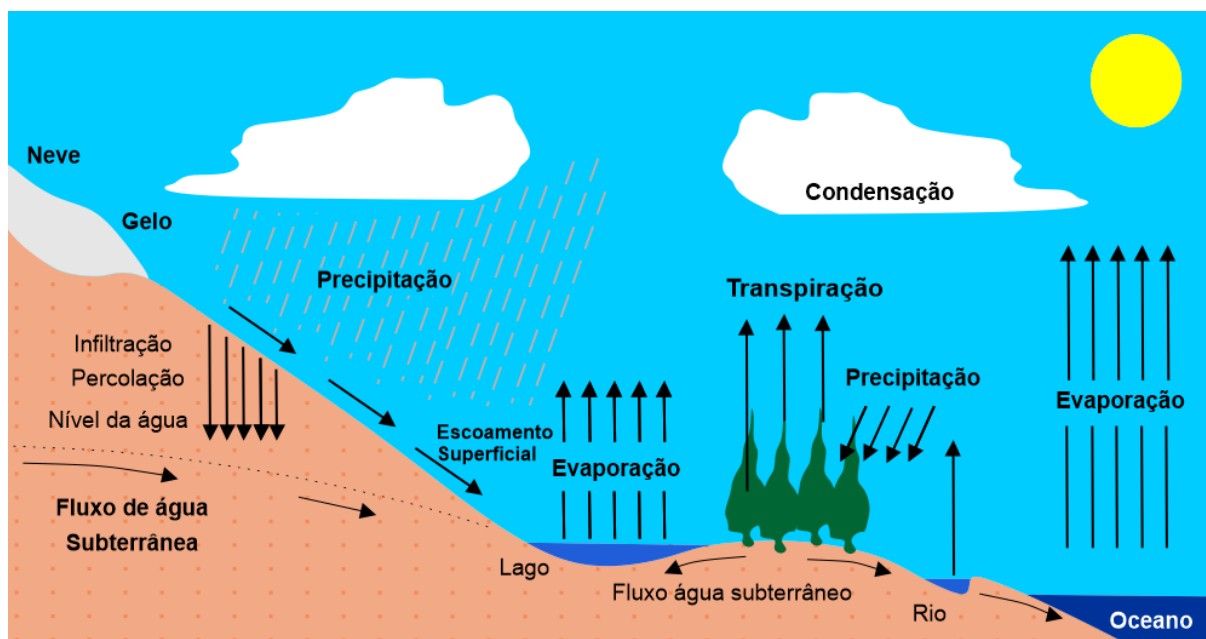
Fonte: Autor, 2025.

## 2.2 BALANÇO HÍDRICO

A água consiste em um dos principais recursos naturais encontrados no planeta, de suma importância para o desenvolvimento das ações realizadas pela intervenção humana ao passar das eras (ROSA, 2017). O equilíbrio de seu ciclo é substancial para o entendimento e planejamento de ações que visem o balanceamento entre o urbanismo e o meio ambiente, formando o balanço hídrico (HOLANDA; SOARES, 2019).

Dentro desse contexto, as principais etapas do ciclo hidrológico incluem a infiltração e depósito de água no solo, a evapotranspiração realizada por animais e vegetais, o escoamento superficial e a precipitação, todos com a exceção deste último processo são dependentes de condições geológicas e climatológicas que formam os solos (HOLANDA; SOARES, 2019). Desta forma, a Figura 2 apresenta as diversas etapas que formam o ciclo hidrológico.

Figura 2 - Ciclo Hidrológico (IMAGEM COLORIDA)



Fonte: Holanda e Soares, 2019.

Importante destacar que os processos de urbanização causados pela ação antrópica modificam o ciclo hidrológico, por meio da realização de queimadas, desmatamento, degradação de ecossistemas, desertificação, eutrofização, destinação inadequada de efluentes urbanos etc., processos que antecipam o crescimento populacional, o qual ocorre muitas das vezes de maneira desenfreada, causando a impermeabilização do solo e a poluição de aquíferos e mananciais subterrâneos (ROSA, 2017). Desse modo, dá-se importância ao estudo da infiltração, que é um dos processos de maior importância, uma vez que interfere diretamente no escoamento superficial, o qual atua diretamente no desenvolvimento de erosões e inundações (BORGES NETO, 2021).

### 2.2.1 Infiltração

A umidade é composta pela água retida do solo e tem uma grande responsabilidade para a separação entre os processos de precipitação infiltrada e o próprio escoamento superficial do excedente não infiltrado (BORGES NETO, 2021). A infiltração é essencial para a manutenção do processo da evapotranspiração, e intervém na resistência ao solo em meio a possíveis erosões hídricas, garantindo a manutenção da conservação da relação solo-água (ROSA, 2017).

A umidade contida pelo solo influencia sua resistência a compactação, essencial para uma série de construções civis, conferindo resistência mecânica ao solo às cargas solicitantes. Logo, são elaborados uma série de estudos de práticas de irrigação a respeito do movimento da água e sua relação com a umidade natural dos solos. (OLIVEIRA; SOARES; HOLANDA, 2018).

A quantia volumétrica da água no solo é resultante de uma série de processos hídricos que interagem entre si no solo (ROSA, 2017). A qualidade da solução de água infiltrada é diretamente influenciada pela porcentagem de umidade do ar e do solo que nutre os diversos corpos vegetais (BORGES NETO, 2021). Dentre outros fatores influenciadores deste processo, incluem-se a topografia, profundidade dos lençóis freáticos, precipitação, densidade da vegetação local, dentre outros fatores meteorológicos (BRAGAGNOLO *et al.*, 2020).

Determina-se a infiltração como o processo em que a água penetra o solo por meio da superfície, de modo a se movimentar de cima para baixo, hidratando as camadas profundas, dirigindo-se aos lençóis freáticos, com duração limitada à quantia volumétrica de água na superfície (OLIVEIRA; SOARES; HOLANDA, 2018). Sendo que a taxa de precipitação infiltrada não apenas influenciará em sua quantia para utilização dos vegetais, como também da quantia de água que será escoada superficialmente e deslocada para rios, lagos, dentre outros corpos d'água (WAISZICK; LIMA, 2020).

A capacidade de infiltração é definida como a taxa máxima com que a água consegue penetrar e percolar através do solo. Dentre os principais fatores influenciadores, destacam-se a camada de cobertura final do solo, as diversas propriedades hidráulicas do solo e suas repercussões na dinâmica hidrológica, como porosidade, condutividade hidráulica, umidade, dentre outras, além da existência de vegetais (BRAGAGNOLO *et al.*, 2020).

Durante a percolação da precipitação infiltrada, conforme a infiltração da água pelo solo, são formadas certas zonas saturadas de cima para baixo, de modo que a superfície é a primeira zona a se saturar, em direção aos perfis de solo não saturados (CARVALHO; SILVA, 2006). Por meio deste processo, ocorre a transferência de umidade de zonas saturadas para zonas de transferência de fluxo insaturado, até que a água enfim alcance os lençóis freáticos (HOLANDA; SOARES, 2019). Finalizada a precipitação, a superfície do solo inicia o processo de evapotranspiração, encerrando assim o processo de infiltração (WAISZICK; LIMA, 2020).

No interior do solo, as demais zonas saturadas se organizam de modo a redistribuir a umidade em seus perfis, seguindo gradientes de pressão e de gravidade, de modo a drenar a água (BORGES NETO, 2021). A taxa de infiltração da água no solo varia de acordo com a intensidade da precipitação e o tempo de exposição, enquanto a condutividade hidráulica é uma característica do solo que expressa a facilidade de percolação da água através de seus poros (ROSA, 2017).

Desta forma, o estudo da infiltração é imprescindível para a minimização de impactos ambientais causados por aterros sanitários, uma das principais construções com a finalidade da disposição final de resíduos sólidos urbanos (WAISZICK; LIMA, 2020).

## 2.3 DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2024), a gestão de resíduos sólidos tem se tornado um dos principais assuntos complexos ao redor do mundo nas últimas décadas, gerando uma série de debates, causados pela influência dos princípios e diretrizes criados nos últimos anos.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010) que determina a disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), também indica a distribuição e destinação de rejeitos<sup>1</sup> em aterros sanitários, de modo a minimizar seus impactos ambientais através de uma série de normas operacionais, visando impedir potenciais danos à saúde e à segurança pública.

Dentre as principais formas de disposição final de RSU praticadas no Brasil segundo a PNRS, incluem-se o aterro controlado e o aterro sanitário, esse último sendo o menos nocivo ao meio ambiente (BRASIL, 2010).

O aterro controlado consiste no aterro comum recoberto com camadas de solos e vegetação, o que atenua o mau cheiro e evita a propagação de animais e insetos à procura de alimentos, porém sem controle dos gases gerados ou da contaminação sobre o solo (ABRELPE, 2024). A PNRS também recomenda sua descontinuação.

---

<sup>1</sup> Resíduos sólidos os quais não há possibilidade de tratamento ou recuperação para sua destinação, de modo que não há outra possibilidade senão a disposição final ambientalmente adequada). BRASIL. *Lei n. 12.305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Brasília, 2010.

### 2.3.1 Aterro Sanitário

O aterro sanitário é considerado a principal técnica de disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos urbanos, concebido com base em princípios de engenharia que visam proteger o solo, a água e o ar contra a poluição decorrente dos rejeitos. Esse sistema busca a contenção e o tratamento dos subprodutos gerados, como o lixiviado e os gases de decomposição, de modo a reduzir riscos à saúde pública e ao meio ambiente (BRASIL, 2010).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece diretrizes para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, porém a classificação técnica dos resíduos é definida pela ABNT, por meio da NBR 10004, atualizada em 2024. Esta norma estabelece critérios para identificar resíduos perigosos (Classe I) e não perigosos (com subdivisões específicas). Assim, resíduos de Classe I devem ser encaminhados a aterros industriais para resíduos perigosos, a sistemas de tratamento térmico como incineração e coprocessamento, ou ainda a técnicas específicas, como autoclavagem no caso de resíduos de serviços de saúde. Já os resíduos não perigosos têm como destinação adequada os aterros sanitários, projetados e operados segundo critérios técnicos (ABNT, 2024).

A estrutura de impermeabilização de um aterro sanitário é um dos pontos mais relevantes do projeto. A solução tradicional adota um sistema composto de barreira de solo argiloso compactado associado a uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), reduzindo significativamente a percolação de lixiviados para o subsolo. Alternativamente, podem ser utilizadas camadas de argila geossintética (GCL) combinadas à geomembrana, configuração já aplicada em diversos empreendimentos no Brasil. Ressalta-se que a manta ou liner não é instalada “a cada 5 metros de resíduos”, mas sim na base de cada célula do aterro antes do início da disposição, compondo o sistema de fundo. A cobertura intermediária e a cobertura final, aplicadas em diferentes estágios da vida útil do aterro, também utilizam materiais impermeabilizantes e barreiras protetoras (USEPA, 2011).

Além da contenção, os aterros sanitários devem dispor de sistemas de drenagem e coleta de lixiviados, destinados ao seu tratamento adequado, assim como sistemas de coleta e queima ou aproveitamento energético dos gases emitidos, como metano e dióxido de carbono. Esses mecanismos são fundamentais para a redução

de impactos ambientais e podem contribuir inclusive para a geração de energia elétrica (BRASIL, 2010).

No que se refere à localização, a NBR 8419 estabelece que os aterros sanitários devem ser implantados em áreas amplas, afastadas de núcleos urbanos, de modo a reduzir o contato da população com odores desagradáveis, vetores e demais inconvenientes. O projeto deve prever sistemas de drenagem superficial para impedir a infiltração de águas pluviais nos resíduos, bem como o monitoramento contínuo da qualidade das águas subterrâneas, da emissão de gases e da estabilidade geotécnica das estruturas de contenção (ABNT, 1992).

Portanto, os aterros sanitários, embora representem uma solução economicamente viável e ambientalmente adequada para a disposição de rejeitos, demandam grande área de implantação, controle rigoroso de operação, sistemas de impermeabilização eficientes e monitoramento constante, de forma a garantir a proteção do meio ambiente e da saúde pública (SILVA, 2019).

### 2.3.2 Camada de Cobertura Diária e Intermediária

Dentre as principais barreiras impermeabilizantes presentes em aterros sanitários, incluem-se a camada diária, a camada intermediária, e a camada de cobertura final (USEPA, 2011).

As coberturas diárias são realizadas no final de cada jornada de trabalho na disposição de resíduos, de modo que suas principais funções incluem: a redução da emanção de odores; a minimização do impacto visual; a diminuição de infiltração de água pluvial sob os resíduos; limitação do contato de animais e microrganismos com os resíduos; e a contenção dos resíduos sob ação de veículos de terraplanagem (BRAGAGNOLO *et al.*, 2020). Souza *et al.* (2015) destacam que uma camada diária de solo compactado com 15 cm de espessura é essencial para o cumprimento destas funções.

As coberturas intermediárias apresentam a mesma função que as coberturas diárias, de modo que são mais espessas (costumeiramente, o dobro da espessura das camadas de cobertura diárias), utilizadas em células que serão inativas por período superior a 30 dias (USEPA, 2011).

A condutividade hidráulica dos solos empregados em aterros sanitários controla diretamente a quantidade de água que percola até os resíduos e, consequentemente,

a geração de lixiviado. Por isso, é imprescindível caracterizar e fiscalizar os parâmetros geotécnicos (granulometria, índice de vazios, condutividade, sucção, compactação etc.) de cada camada do sistema de vedação. Em aterros estruturados por células (ou “biocélulas”), cada célula é revestida e gerenciada de forma a reduzir infiltração — frequentemente utilizando geomembranas de PEAD combinadas a camadas de solo compactado e sistemas de drenagem — de modo que a verificação periódica da qualidade dos materiais e da execução construtiva é condição necessária para assegurar a integridade hidráulica do conjunto. (SOUZA *et al.*, 2015).

### 2.3.3 Camada de Cobertura Final

A camada de cobertura final de um aterro sanitário constitui uma das principais barreiras hidráulicas do sistema, tendo por finalidades o controle da umidade do perfil, a redução da percolação de águas pluviais, a prevenção da exposição direta dos resíduos à atmosfera e o controle das emissões líquidas e gasosas (lixiviado e biogás), além de propiciar escoamento superficial e reduzir a erosão. Essas funções tornam a cobertura final um elemento de projeto crítico, cujo desempenho depende da seleção adequada de materiais, da correta execução construtiva e de um plano de inspeção e manutenção ao longo da vida útil do aterro (USEPA, 2011).

A configuração típica da cobertura final, de cima para baixo, inclui: (i) camada vegetativa (topsoil) com gramíneas de sistema radicular superficial para controle de erosão e contribuição à evapotranspiração; (ii) camada de proteção contra bioturbação e dano mecânico (por exemplo, geotêxtil e solo de proteção); (iii) camada de drenagem superficial, quando necessária, para escoamento controlado das águas pluviais; (iv) barreira hidráulica — que pode ser uma camada compactada de argila (CCL), uma geomembrana de PEAD (HDPE) ou um liner composto (geomembrana + CCL ou geocomposto); e (v) camada de transição ou preparação imediatamente sobre a célula de resíduos. Cada uma dessas camadas tem papel específico na redução da percolação, na proteção mecânica da geomembrana e na compatibilização funcional entre a célula de resíduos e a infraestrutura superficial (USEPA, 2011).

As coberturas devem atender ao requisito de baixa condutividade hidráulica e garantir durabilidade e resistência mecânica perante sobrecargas, intempéries e potenciais erosões ou recalques; além disso, é mandatória a proteção da geomembrana contra danos por raízes e fauna, bem como a previsão de medidas de

reparo e inspeção periódica (SOUZA *et al.*, 2015). Do ponto de vista do controle ambiental, a cobertura final deve integrar dispositivos complementares de monitoramento e gestão — por exemplo, sistemas de coleta e controle de lixiviado e de colheita de biogás — para mitigar riscos de contaminação líquida e atmosférica.

Quanto à exigência de ser “100% impermeável”, é necessário distinguir conceitos de projeto: a solução impermeável (geomembrana/CCL ou liner composto) busca minimizar ao máximo a percolação e obter os menores fluxos possíveis, enquanto as coberturas evapotranspirativas (ET), aplicáveis em climas com alta evapotranspiração, reduzem a percolação por armazenamento no perfil não saturado e posterior perda para a atmosfera via evaporação e transpiração. A seleção entre liner impermeável e ET cover depende de variáveis climáticas, disponibilidade de materiais, custos, requisitos operacionais e da capacidade de garantir baixa permeabilidade a longo prazo; independentemente da escolha, o projeto deve incluir dimensionamento hidráulico, proteção contra penetração radicular e programas de monitoramento de umidade e desempenho (WAISZICK; LIMA, 2020).

A execução da terraplenagem e compactação da cobertura final deve assegurar que o solo de cobertura apresente coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro e atenda aos critérios geotécnicos especificados (granulometria, índice de vazios, grau de compactação, sucção, entre outros). Em consequência, o controle de qualidade durante a obra (ensaios de permeabilidade, grau de compactação, ensaios de extração de raízes e inspeções visuais) e o monitoramento pós-obra são imprescindíveis para garantir a integridade hidráulica e a proteção ambiental da unidade de disposição (WAISZICK; LIMA, 2020; SOUZA *et al.*, 2015).

## 2.4 INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

O solo constitui um meio poroso formado por grãos sólidos e poros preenchidos por ar e água, de modo que a água precipitada pode ocupar gradualmente esses vazios e deslocar o ar presente. Enquanto o perfil estiver em estado não saturado, o movimento da água é controlado por forças capilares e pela diferença de potencial matricial entre camadas, resultando numa taxa de infiltração dependente das propriedades do solo e das condições de contorno (HOLANDA; SOARES, 2019).



À medida que a umidade do solo aumenta e os poros de menor raio ficam ocupados, a taxa de infiltração tende a diminuir; contudo, a infiltração não “para” automaticamente ao atingir 100% de saturação do perfil superior. Quando uma região do solo atinge saturação, o fluxo passa de escoamento não saturado (controlado por sucção) para escoamento saturado, cujo valor é então limitado pela condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_{sat}$ ). Se a intensidade pluviométrica exceder a capacidade de infiltração controlada por  $K_{sat}$  e pelas condições superficiais, o excesso de água se manifesta como escoamento superficial (TUCCI, 2009).

Além das forças capilares e da gravidade, outros mecanismos influenciam a infiltração: fluxo preferencial por macroporos e rachaduras, transporte intersticial no domínio não saturado e percolação vertical até o nível freático quando houver continuidade hidrológica. A água infiltrada é parcialmente retida no perfil no chamado ponto de capacidade de campo, ficando disponível para uptake por raízes; plantas autotróficas retiram essa água e a devolvem à atmosfera por transpiração, integrando o balanço hídrico do solo e reduzindo a percolação efetiva para camadas mais profundas (CARVALHO; SILVA, 2006).

A taxa e o destino da água infiltrada são fortemente condicionados por propriedades texturais e estruturais (porosidade total e distribuição de poros), grau de compactação, presença de camada de baixa permeabilidade, conteúdo hídrico antecedente, cobertura vegetal e existência de macroporos. Em aplicações de engenharia geotécnica — por exemplo, na concepção de coberturas de aterros — é essencial considerar esses fatores no dimensionamento hidráulico: um solo com baixa  $K_{sat}$  ou a adoção de liners (geomembrana/CCL) reduz substancialmente a percolação, enquanto perfis com alta conectividade de macroporos ou solos compactados podem promover escoamento preferencial e reduzir a eficácia da barreira (TUCCI, 2009; HOLANDA; SOARES, 2019).

#### 2.4.1 Fatores Influenciadores

Segundo TUCCI (2009), os principais fatores que intervêm no processo de infiltração são: a natureza da superfície (por exemplo, áreas rurais tendem a apresentar maior taxa de infiltração que áreas urbanas impermeabilizadas), a textura e a estrutura do solo, as condições de preparo e manejo do solo e a umidade inicial do perfil. A umidade antecedente não altera o volume de vazios do solo de forma

significativa, mas determina o grau de saturação e o potencial matricial iniciais, influenciando diretamente a capacidade do perfil em armazenar água e a condutividade hidráulica no domínio não saturado; por consequência, solos com umidade antecedente elevada têm menor espaço disponível para armazenamento adicional e maior propensão ao escoamento superficial sob precipitações intensas, enquanto solos muito secos podem apresentar condutividades iniciais reduzidas que limitam a infiltração.

Entre os fatores secundários que afetam a taxa de infiltração destacam-se a carga hidráulica superficial (espessura da lâmina d'água), a temperatura (que influencia a viscosidade da água e, assim, a condutividade hidráulica), a presença de fendas e macroporos que possibilitam fluxo preferencial, e a compactação do solo por máquinas ou por processos naturais, em geral associada à redução da porosidade efetiva e à queda na infiltração. Esses mecanismos alteram localmente a distribuição de velocidades e regimes de fluxo, podendo transformar infiltração por capilaridade em escoamento preferencial ou em escoamento saturado quando a capacidade de armazenamento é excedida (CARVALHO; SILVA, 2006).

No que tange à ação de fauna e flora, a compactação por animais e o tráfego animal podem reduzir a permeabilidade superficial de maneira análoga à compactação mecânica, enquanto o sistema radicular das plantas tem efeitos duplos: por um lado, a cobertura vegetal diminui o impacto das gotas de chuva, reduzindo a erosão e favorecendo a infiltração; por outro, raízes maiores ou redes de raízes profundas podem criar macroporos que aumentem o fluxo preferencial vertical, exigindo cuidados de projeto quanto à escolha de espécies sobre estruturas sensíveis, como geomembranas (HOLANDA; SOARES, 2019).

A determinação experimental da taxa de infiltração utiliza diversos métodos — por exemplo, ensaios de infiltração em anel (infiltrômetros de carga constante e variável), ensaios de permeâmetro de laboratório para  $K_{sat}$ , e técnicas empíricas ou numéricas para estimar comportamentos transitórios — cuja descrição será discutida no tópico subsequente. Esses métodos devem ser selecionados considerando o objetivo (caracterização pontual versus fluxos de campo), a escala de interesse e as características do solo a serem avaliadas (TUCCI, 2009; HOLANDA; SOARES, 2019; CARVALHO; SILVA, 2006).

#### 2.4.2 Determinação da Taxa de Infiltração

Em relação a mensuração da infiltração, Carvalho e Silva (2006) comentam que existem diversos métodos utilizados para a determinação da capacidade de infiltração da água no solo. Os autores dividem os métodos denominados de diretos e indiretos.

Segundo Carvalho e Silva (2006), dentre os principais métodos diretos, incluem-se o infiltrômetro de anel e a utilização de simuladores de chuva ou infiltrômetros de aspersão. Já os métodos indiretos são utilizados por meio da correlação com propriedades geotécnicas (HOLANDA; SOARES, 2019).

Um dos principais ensaios que podem ser realizados *in situ* é a utilização do aparato infiltrômetro de anel, um equipamento composto por dois anéis cilíndricos de 25 e 30 cm de diâmetro e 30 cm de altura, instalados de forma concêntrica e enterrados a 15 cm no solo. (CARVALHO; SILVA, 2006).

O método de infiltrômetro de anel é um dos mais comuns e práticos métodos diretos de determinação de infiltração acumulada e velocidade de infiltração em solos da atualidade (HOLANDA; SOARES, 2019).

Outro método direto de capacidade de infiltração constitui-se nos simuladores de chuva, os quais são equipamentos que permitem controlar as características relativas à intensidade, duração e frequência da precipitação. De modo a realizar a coleta da lâmina de escoamento superficial formada pela aplicação de água pluvial de intensidade superior à capacidade de infiltração do solo, realizada sobre uma área específica a qual deseja-se coletar o escoamento superficial (CARVALHO; SILVA, 2006).

Consoante os autores, deve-se enfatizar que a taxa de infiltração é resultado da diferença entre a taxa de água aplicada pela taxa de escoamento coletada.

#### 2.4.3 Métodos Indiretos

Os métodos indiretos para estimativa da taxa de infiltração agrupam-se em três categorias funcionais: (i) equações empíricas de infiltração, (ii) correlações entre parâmetros de infiltração e a permeabilidade saturada ( $K_{sat}$ ) determinada em permeâmetros, e (iii) modelos estatísticos e pedotransferenciais. Essas abordagens não medem a infiltração diretamente em campo, mas relacionam grandezas mensuráveis (ex.: textura, porosidade,  $K_{sat}$ ) com parâmetros de infiltração, permitindo

estimativas quando ensaios diretos são impraticáveis ou de escala limitada (TUCCI, 2009; HOLANDA; SOARES, 2019).

As equações empíricas (por exemplo, formulações clássicas utilizadas para descrever a evolução temporal da infiltração) oferecem descrições paramétricas do processo e normalmente requerem calibração local em função da textura, estrutura e umidade antecedente do solo; por isso, sua aplicação deve ser acompanhada de validação com dados experimentais regionais (TUCCI, 2009; CARVALHO; SILVA, 2006).

No grupo das correlações com ensaios de permeabilidade, trata-se da relação entre a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), obtida por ensaios de permeabilidade em laboratório ou em campo, e taxas de infiltração medidas por métodos diretos (ex.: infiltração por anel). O ensaio de permeabilidade é realizado em permeâmetros de carga constante ou de queda de carga (carga variável) dependendo da permeabilidade do solo e da escala do ensaio; em seguida, correlações empíricas (regressões lineares ou não lineares) ou fatores de conversão são usados para estimar a taxa de infiltração, sempre considerando as limitações de escala e a influência de macroporos e heterogeneidades estruturais (TUCCI, 2009; HOLANDA; SOARES, 2019).

Os modelos estatísticos e pedotransferenciais empregam regressões múltiplas, funções pedotransferenciais ou algoritmos de aprendizado de máquina para relacionar propriedades de solo (distribuição granulométrica, densidade aparente seca, teor de matéria orgânica) a parâmetros hidráulicos e de infiltração. Tais modelos são úteis quando existe base de dados representativa, porém sua aplicabilidade espacial e temporal é condicionada ao conjunto de dados com que foram calibrados, requerendo sempre validação local antes de aplicação em projetos de engenharia (HOLANDA; SOARES, 2019; TUCCI, 2009).

Em todos os casos, a seleção do método indireto deve considerar o objetivo da caracterização (medição pontual versus estimativa de fluxos em escala de campo), a escala de interesse, a disponibilidade de dados e as características estruturais do solo. Recomenda-se que estimativas indiretas sejam complementadas por ensaios diretos e por procedimentos de controle de qualidade para reduzir incertezas em projetos sensíveis, como o dimensionamento de coberturas e liners em aterros sanitários (TUCCI, 2009; HOLANDA; SOARES, 2019; CARVALHO; SILVA, 2006).

#### 2.4.3.1 Equações

Dentre as principais relações empíricas para a realização do cálculo da taxa de infiltração em um solo, inclui-se a Equação de Hazen; a Equação de Richards; e a Equação de Van-Genuchten. Algumas destas equações visam o cálculo da curva de retenção da água no solo, imprescindível para os estudos de comportamentos mecânicos e hidráulicos dos solos não saturados (GONÇALVES, 2012), como a fórmula empírica de Van-Genuchten a qual se emprega uma série de parâmetros empíricos para ajuste da curva de retenção, com variáveis independentes que garantem maior flexibilidade e precisão (COSTA, 2020).

A Equação de Hazen é uma relação empírica destinada à estimativa da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) de solos granulares limpos a partir de parâmetros granulométricos (em particular o diâmetro efetivo  $D_{10}$ ). Sua aplicação é restrita a areias bem graduadas e condições em que o fluxo se comporta de forma homogênea; por isso, apresenta limitações importantes em solos com fração fina, alto conteúdo de matéria orgânica, estrutura pronunciada ou macroporos, e atualmente é pouco indicada como única base para projetos hidráulicos complexos. (GONÇALVES, 2012; TUCCI, 2009).

A Equação de Richards descreve o fluxo de água em meios porosos variavelmente saturados e constitui a base teórica para modelagem numérica da infiltração em perfis de solo. Trata-se de uma equação diferencial não linear que combina a lei de Darcy com a conservação de massa no domínio não saturado, exigindo como entrada funções constitutivas (curva de retenção e condutividade hidráulica não saturada); por isso, sua solução geralmente requer procedimentos numéricos e parametrização experimental, sendo a abordagem de escolha quando se busca simular o processo transiente de infiltração. (TUCCI, 2009; HOLANDA; SOARES, 2019).

A função de Van Genuchten não é uma “equação de infiltração” por si só, mas um modelo paramétrico amplamente utilizado para ajustar a curva de retenção água-sucção do solo ( $\theta(h)$ ) e, em combinação com modelos de condutividade (por exemplo, Mualem), para derivar a condutividade hidráulica não saturada necessária à formulação de Richards. Portanto, Van Genuchten fornece os parâmetros ( $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  etc.) que permitem caracterizar o comportamento hidráulico no domínio não saturado

e viabilizar a aplicação consistente da equação de Richards em estudos de infiltração. (COSTA, 2020; GONÇALVES, 2012).

#### 2.4.3.1.1 Equação de Hazen

Segundo Tucci (2009), a Equação de Hazen (1930) apresentada na Equação 1 é uma das principais equações de determinação do coeficiente de permeabilidade, sendo a mais frequentemente encontrada na literatura.

$$k = C \cdot (D_{10})^2 \quad (1)$$

Em que:

$k$  = Coeficiente de Permeabilidade (cm/s);

$C$  = Constante empírica tipicamente assumida entre 0,4 e 1,2 (comumente aproximada por 1,0);

$D_{10}$  = Tamanho do grão correspondente a 10% do material passante na curva granulométrica ou tamanho efetivo (mm).

A equação de Hazen (1930) é uma relação puramente empírica destinada à estimativa rápida de  $K$  em areias limpas e bem graduadas. A equação fornece um procedimento expedito e de baixo custo para estimativas preliminares de permeabilidade a partir de dados granulométricos, sendo largamente referenciada na literatura clássica de hidráulica de solos. (TUCCI, 2009; HAZEN, 1930).

Apesar de sua utilidade prática como estimador inicial, a aplicação da relação de Hazen apresenta limitações importantes que convém explicitar antes da apresentação de modelos mais gerais. A equação é válida essencialmente para solos granulares sem fração fina significativa e com comportamento hidráulico dominado pelo fluxo em poros intergranulares; sua pertinência reduz-se em solos com conteúdo apreciável de silte/argila, alta matéria orgânica, estrutura agregada pronunciada ou macroporos, situações em que a permeabilidade depende de fatores que Hazen não incorpora. Ademais, o coeficiente  $C$  é sensível ao grau de empacotamento e à porosidade, o que limita a transferência direta de valores entre locais distintos sem calibração local. (WAISZICK; LIMA, 2020; TUCCI, 2009).

Em termos de alcance prático, diversos autores apontam faixas de aplicação recomendadas para  $D_{10}$  (por exemplo, aproximadamente 0,1–3,0 mm), sendo fora desses intervalos a estimativa pouco confiável; por isso, a equação deve ser utilizada

como referência histórica e como referência rápida, mas não como substituto de ensaios de permeabilidade laboratoriais ou de abordagens numéricas baseadas em parâmetros hidráulicos mais completos. Em estudos que exigem maior precisão ou que abordam solos não granulares, recorre-se a ensaios diretos de permeabilidade e a modelos constitutivos (por ex., Richards combinado a funções de Van Genuchten/Mualem). (WAISZICK; LIMA, 2020; TUCCI, 2009).

Portanto, mantêm-se aqui a Equação de Hazen como item introdutório e de contexto histórico, enfatizando suas limitações operacionais e a necessidade de calibração/validação local sempre que empregada; nas seções subsequentes serão apresentadas equações e modelos de maior generalidade e aplicabilidade ao domínio não saturado. (TUCCI, 2009).

#### 2.4.3.1.2 Equação de Richards

A Equação de Richards (1931) descreve o fluxo de água em meios porosos variavelmente saturados e resulta da combinação da lei de Darcy com a equação da conservação de massa; por esse motivo constitui uma equação diferencial parcial não linear amplamente utilizada para simular infiltração vertical 1-D em perfis de solo. Em forma comumente empregada para coordenada vertical  $z$  (positiva para cima), a fórmula de cálculo da infiltração vertical 1-D é dada pela Equação 2:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K \cdot (\psi) \left( \frac{\partial(\psi+z)}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

Em que:

$z$  = Coordenada vertical, positiva no sentido de baixo para cima (L);

$K$  = Condutividade hidráulica dependente do estado hídrico (L/T);

$\psi$  = Potencial matricial (também denominado potencial capilar) (L);

$\theta$  = Teor volumétrico de água (L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>);

$t$  = Tempo (T).

O potencial matricial representa o potencial de retenção da água no solo e costuma assumir valores negativos em condições não saturadas. A formulação acima explicita que o fluxo é controlado tanto por gradientes de potencial matricial ( $\partial\psi/\partial z$ ) quanto pela contribuição gravitacional (termo “+1”) (TUCCI, 2009; MAÑAY, 2020).

A não linearidade da equação decorre da dependência funcional de  $\theta$  e de  $K$  em relação a  $\psi$  (ou, alternativamente,  $\theta(\psi)$  e  $K(\theta)$ ), o que impõe a necessidade de relações constitutivas — por exemplo, a função de retenção  $\theta(h)$  de Van Genuchten e modelos de condutividade não saturada (Mualem, Brooks–Corey etc.) — para fechamento do problema. Devido a essa não linearidade, a solução analítica é rara e a resolução prática do problema de infiltração requer normalmente métodos numéricos e especificação cuidadosa de condições iniciais e de contorno (TUCCI, 2009; COSTA, 2020).

Em termos de aplicabilidade, a equação de Richards é apropriada para simular fluxos transientes tanto em regimes não saturados quanto em situações que evoluem ao escoamento saturado local, desde que as relações constitutivas e as condições de contorno representem adequadamente a heterogeneidade do solo e a presença de macroporos. Para problemas de transporte de contaminantes a ela se adicionam termos advectivos-dispersivos e de reação, de modo que a predição do movimento de água e de solutos exige acoplamento entre Richards e as equações de transporte adequado. A utilização prática da equação em projetos de engenharia demanda calibração com ensaios laboratoriais e de campo (por exemplo, curvas de retenção e ensaios de permeabilidade) e verificação de sensibilidade aos parâmetros hidráulicos. (MAÑAY, 2020; HOLANDA; SOARES, 2019).

#### 2.4.3.1.3 Equação de van Genuchten

A função de van Genuchten (1980) é um modelo paramétrico amplamente utilizado para ajustar a curva característica água–sucção do solo (CCAS) a partir de dados experimentais de retenção hídrica; contudo, o modelo não “mede” diretamente a retenção — ele representa matematicamente os pontos experimentais obtidos por ensaios e, portanto, é sempre um ajuste aos dados observados. O modelo matemático de van Genuchten (1980) é dado pela Equação 3:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\Phi m|)^n]^m} \quad (3)$$

Em que:

$\theta$  = Teor de umidade volumétrico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ );

$\theta_r$  = Teor de água residual ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ );

$\theta_s$  = Teor de saturação ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ );



$\Phi_m$  = Potencial mátrico da água no solo (kPa);

$\alpha$  = Parâmetro de escala associado à posição da transição da curva (1/cm);

$m$  e  $n$  = Parâmetros de ajuste da curva (%).

Na notação usual, o conteúdo volumétrico de água  $\theta$  é expresso em função do potencial matricial  $\psi$  (negativo em condições não saturadas). Os valores de  $m$  e  $n$  são parâmetros adimensionais de forma (frequentemente adota-se  $m = 1 - \frac{1}{n}$  como restrição para reduzir graus de liberdade do ajuste). Esses parâmetros são obtidos por ajuste numérico (calibração) aos pontos experimentais da CCAS. (COSTA, 2020; GONÇALVES, 2012).

A construção da CCAS requer medidas em diferentes níveis de sucção até o equilíbrio em cada nível, o que torna o processo laborioso e cronofágico: métodos comuns incluem colunas de suspensão (*hanging-column*), placas de pressão (*pressure-plate*), centrífuga e métodos por ponto de orvalho (*dew-point*), além de procedimentos de campo adaptados para estimativas *in-situ* quando viável. Após a obtenção dos dados experimentais, aplica-se o ajuste (por exemplo, por mínimos quadrados não lineares) para estimar  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ ; a qualidade do ajuste depende da faixa de sucções amostradas e do equilíbrio alcançado em cada passo experimental. (COSTA, 2020).

Do ponto de vista de modelagem hidráulica, a curva ajustada por van Genuchten é frequentemente combinada com modelos de condutividade não saturada (por exemplo, a combinação van Genuchten–Mualem) para derivar  $K(\theta)$  ou  $K(\psi)$ , elementos essenciais para a resolução numérica da equação de Richards em problemas de infiltração transiente. Deve-se, porém, atentar para a transferibilidade dos parâmetros: ajustes realizados em laboratório podem não representar integralmente condições de campo heterogêneas (macroporos, estratificação), exigindo calibração/validação adicional quando empregados em simulações e projetos de engenharia. (TUCCI, 2009; COSTA, 2020; HOLANDA; SOARES, 2019).

#### 2.4.4 Modelos Estatísticos

Os chamados modelos estatísticos aplicados à estimativa da infiltração reúnem um conjunto de abordagens empiricamente orientadas, tais como regressões lineares e não lineares, funções pedotransferenciais e algoritmos de aprendizado de máquina,

que procuram relacionar propriedades mensuráveis do solo (distribuição granulométrica, porosidade, densidade aparente seca, teor de matéria orgânica etc.) a parâmetros hidráulicos e de infiltração. Essas técnicas são ferramentas valiosas quando se dispõe de bases de dados experimentais representativas, porém exigem calibração estatística, avaliação de incerteza e validação local antes de aplicação em projetos de engenharia. (WAISZICK; LIMA, 2020; OLIVEIRA; SOARES; HOLANDA, 2018)

A elaboração, tratamento e análise desses conjuntos de dados demandam tempo e recursos computacionais, além de procedimentos de controle de qualidade (filtragem, verificação de equilíbrio experimental, tratamento de valores extremos), porquanto a robustez dos modelos depende diretamente da quantidade e da qualidade das observações empíricas. Assim, a adoção de modelos pedotransferenciais ou de regressão requer atenção à representatividade amostral e à faixa de condições (textura, estrutura, umidade antecedente) cobertas pelos dados calibrantes. (OLIVEIRA; SOARES; HOLANDA, 2018)

É importante distinguir entre modelos estatísticos (ferramentas de inferência a partir de dados) e programas numéricos que resolvem equações físicas: HYDRUS-1D não é um “modelo” empírico, mas um software numérico que implementa a equação de Richards para fluxo de água em meios variavelmente saturados, acoplada, quando solicitado, à equação convectiva–dispersiva de transporte de solutos. No HYDRUS-1D a representação física da retenção hídrica é normalmente feita por funções constitutivas como a função de van Genuchten (combinada com o modelo de condutividade de Mualem), e a solução numérica é obtida por métodos de elementos finitos para problemas transientes unidimensionais. Logo, enquanto os modelos estatísticos estimam parâmetros a partir de dados, o HYDRUS-1D utiliza esses parâmetros para simular processos físicos detalhados de infiltração e transporte. (ŠIMŮNEK et al., 2013; TUCCI, 2009)

Por fim, a seleção entre abordagens estatísticas e simulações numéricas deve considerar o objetivo do estudo, a escala espacial, a disponibilidade de dados e o nível de detalhe exigido. Em aplicações de engenharia (por exemplo, dimensionamento de coberturas e liners), recomenda-se a combinação de métodos: empregar modelos estatísticos/pedotransferenciais para estimativas preliminares e preencher lacunas de dados, e confirmar/aperfeiçoar as previsões por meio de simulações numéricas

(HYDRUS-1D) e ensaios diretos quando a sensibilidade do projeto assim o justificar. (WAISZICK; LIMA, 2020; ŠIMŮNEK et al., 2013).

#### 2.4.4.1 *HYDRUS-1D*

O HYDRUS-1D é um software numérico amplamente utilizado para simulação do fluxo de água em meios porosos variavelmente saturados e do transporte de solutos em regime unidimensional; ele implementa a equação de Richards acoplada, quando requerido, à equação advectiva–dispersiva de transporte, resolvidas numericamente por elementos finitos. Assim, o HYDRUS-1D não é um modelo estatístico, mas uma plataforma de modelagem física que exige funções constitutivas e parâmetros hidráulicos para operar. (RADCLIFFE; ŠIMŮNEK, 2018; ŠIMŮNEK et al., 2013)

As curvas CCAS, de retenção água–sucção, são obtidas experimentalmente em laboratório ou em campo por ensaios de retenção (por exemplo, placas de pressão, coluna de suspensão, centrífuga, métodos por ponto de orvalho) e posteriormente ajustadas por modelos paramétricos (por exemplo, Van Genuchten) para produzir a função  $\theta(\psi)$ . No HYDRUS-1D esses parâmetros podem ser fornecidos diretamente a partir de medições experimentais ou estimados por funções de pedotransferência; o software então usa tais funções constitutivas para calcular a condutividade hidráulica não saturada  $K(\theta)$  e resolver o problema de fluxo. (COSTA, 2020; TUCCI, 2009)

Funções de pedotransferência são relações empíricas ou semi-empíricas que convertem propriedades de fácil medição (ex.: textura, frações de areia/silte/argila, densidade aparente seca, teor de matéria orgânica) em parâmetros hidráulicos mais difíceis de obter diretamente (por exemplo,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $K_{sat}$ ). Ferramentas como Rosetta implementam essas rotinas e oferecem estimativas dos parâmetros van Genuchten/Mualem quando faltam medições diretas; todavia, tais estimativas aumentam a incerteza e devem ser validadas sempre que possível com dados locais. (RADCLIFFE; ŠIMŮNEK, 2018; WAISZICK; LIMA, 2020)

No uso prático, o HYDRUS-1D recebe entradas climáticas e de contorno (por exemplo, precipitação, potencial de evapotranspiração/evaporação, temperaturas quando relevantes, condições de água livre na base do perfil) e produz saídas temporais como perfis de teor de água, fluxos verticais (infiltração/percolação), e

concentrações de solutos. Os gráficos de infiltração e as séries temporais apresentados pelo programa derivam, portanto, dos resultados das simulações numéricas e não de uma “produção direta de curvas” pelo software sem parâmetros de entrada; a qualidade das previsões depende da fidelidade das CCAS, da condutividade e das condições de contorno empregadas. (RADCLIFFE; ŠIMŮNEK, 2018; ŠIMŮNEK et al., 2013)

Por fim, recomenda-se que, em estudos de engenharia (como dimensionamento de coberturas e liners), as simulações HYDRUS sejam utilizadas em conjunto com ensaios laboratoriais e de campo e com análises de sensibilidade e incerteza, de modo a quantificar a robustez das previsões de infiltração e percolação obtidas numericamente. (WAISZICK; LIMA, 2020; ŠIMŮNEK et al., 2013).

#### 2.4.4.2 *Regressão Linear Múltipla*

A regressão linear múltipla é uma técnica estatística empregada para relacionar uma variável de resposta (por exemplo, taxa de infiltração ou fluxo de percolação) a um conjunto de variáveis explicativas mensuráveis (tais como condutividade hidráulica saturada  $K_{sat}$ , frações texturais, densidade aparente seca e umidade antecedente). Em estudos de infiltração, essas relações empíricas são úteis para desenvolver funções pedotransferenciais e modelos preditivos quando ensaios diretos em larga escala são impraticáveis (OLIVEIRA; SOARES; HOLANDA, 2018; WAISZICK; LIMA, 2020).

A regressão linear é um método de abordagem estatística que visa modelar a relação entre duas variáveis ajustando uma equação linear aos dados observados. Uma variável é considerada uma variável explicativa (ou variável independente) e a outra é considerada uma variável dependente (HOPE, 2020).

Se o objetivo for predição, previsão ou redução de erro, a regressão linear pode ser utilizada para ajustar um modelo preditivo a um conjunto de dados observados de valores da resposta e variáveis explicativas. Depois de desenvolver tal modelo, caso os valores adicionais das variáveis explicativas sejam coletados sem um valor de resposta acompanhante, o modelo ajustado pode ser usado para fazer uma previsão da resposta. (EBERLY, 2007). Diante deste aspecto, a regressão linear é um dos modelos de abordagem de correção de dados meteorológicos mais utilizados na contemporaneidade, uma vez que os modelos que dependem linearmente de seus

parâmetros desconhecidos são mais fáceis de ajustar do que os modelos não linearmente relacionados aos seus parâmetros, além de que as propriedades estatísticas dos estimadores resultantes são mais fáceis de determinar (HOPE, 2020). A fórmula matemática geral da regressão linear é dada por uma equação que descreve uma reta, dada abaixo pela Equação 4:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad (4)$$

Em que:

$Y$  = Variável Dependente.

$\alpha$  = Valor de intercepto.

$\beta$  = Coeficiente Angular.

$X$  = Variável Explicativa/Independente.

$\varepsilon$  = Termo de erro

A regressão linear múltipla é uma maneira compacta de realizar regressão linear simples para o caso de mais de uma variável independente, restritas a uma variável dependente. A regressão linear múltipla é essencial para casos de projeção de uma variável dependente a partir de um conjunto de outras variáveis explicativas (EBERLY, 2007). A fórmula matemática geral da regressão linear múltipla é dada pela Equação 5:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (5)$$

Embora a equação em si seja de caráter padrão, a estimação dos parâmetros exige cuidados metodológicos (verificação de linearidade, multicolinearidade entre preditores, homoscedasticidade dos resíduos, normalidade dos erros e validação cruzada) para garantir previsões consistentes e minimizar vieses (EBERLY, 2007; OLIVEIRA; SOARES; HOLANDA, 2018).

Entre as aplicações práticas para estudos de infiltração destacam-se: (i) construção de relações empíricas entre  $K_{sat}$  e taxas de infiltração medidas em campo; (ii) desenvolvimento de pedotransferenciais que estimam parâmetros van Genuchten/Mualem a partir de textura e densidade aparente seca; e (iii) ajuste de modelos de correção para variáveis meteorológicas ou de manejo que afetam a infiltração. Entretanto, deve-se reconhecer que modelos lineares podem não captar relações fortemente não lineares ou efeitos de fluxo preferencial e, portanto, convém confrontar estimativas com ensaios diretos e procedimentos de validação (teste em

subconjuntos independentes, análise de erro e sensibilidade) (WAISZICK; LIMA, 2020; OLIVEIRA; SOARES; HOLANDA, 2018).

Por fim, recomenda-se deslocar a apresentação detalhada de procedimentos estatísticos (diagnósticos de resíduos, critérios de seleção de variáveis, procedimentos de validação e métricas de desempenho) para a seção de Metodologia ou para um Apêndice técnico, mantendo no corpo do capítulo apenas a justificativa conceitual e as principais equações de referência (EBERLY, 2007).

## 2.5 CORRELAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS

As coberturas evapotranspirativas (ET covers) — também denominadas monocobertura, cobertura solo-planta ou cobertura de balanço hídrico — consistem em sistemas em que uma camada ativa de solo vegetado armazena temporariamente a precipitação e a restitui à atmosfera por evaporação e transpiração, funcionando como um reservatório cuja capacidade útil de armazenamento controla a percolação para o interior do aterro. Diferentemente das coberturas convencionais, que se baseiam numa barreira física de baixa condutividade hidráulica, as ET covers são projetadas com base em um balanço integrado solo-planta-atmosfera e dependem da combinação entre armazenamento disponível, profundidade radicular e demanda evaporativa/transpirativa para reduzir o fluxo basal (ZORNBERG *et al.*, 2003; USEPA, 2011).

Trabalhos experimentais e de modelagem clássicos mostram que, quando corretamente projetadas e estabelecidas (perfil ativo dimensionado, vegetação estabilizada e proteção contra bioturbação), as coberturas ET podem apresentar fluxos de percolação substancialmente inferiores aos observados em coberturas convencionais; contudo, esse desempenho é fortemente condicionado à climatologia local, à espessura da zona ativa, à condutividade hidráulica do perfil e à existência de camadas capilares que favoreçam redistribuição da água, pelo que estudos recomendam monitoramento com lisímetros e instrumentação de perfil para validação (SCANLON *et al.*, 2005; ZORNBERG *et al.*, 2003).

No contexto brasileiro e em climas temperados, investigações experimentais e de tese de doutorado (por exemplo, Catapreta, 2008) avaliaram combinações de espessura de solo e barreiras capilares visando minimizar a percolação, e apontaram que — sob determinadas faixas pluviométricas mensais (ordens de grandeza citadas

em demonstrações experimentais como  $\sim \leq 100$  mm/mês para os cenários avaliados) — um dimensionamento adequado do perfil ativo e da barreira capilar pode conduzir a desempenho hidráulico comparável ao de barreiras convencionais, desde que sejam respeitadas as condições de suporte vegetal e as limitações locais do solo (CATAPRETA, 2008; McCARTNEY; ZORNBERG, 2004).

Documentos de orientação técnica e revisões recentes consolidam procedimentos de projeto e monitoramento, descrevendo critérios como capacidade de armazenamento requerida, limites climáticos recomendados, proteção contra penetração radicular e exigências de validação experimental; tais guias também apresentam estudos de caso e apontam para a necessidade de análises de sensibilidade e de avaliação de ciclo de vida (LCA) como parte do processo decisório entre coberturas ET e coberturas convencionais (EPA, 2015; ROCK *et al.*, 2012).

Embora as ET covers tenham sido inicialmente recomendadas para regiões áridas e semiáridas, a literatura mais recente evidencia que, em climas temperados, elas podem ser eficazes desde que o projeto incorpore: (i) análise climática detalhada (precipitação histórica e evapotranspiração potencial), (ii) caracterização hidráulica do perfil (curvas de retenção — CCAS — e  $K_{sat}$ ) e (iii) garantias de manutenção e de proteção vegetativa; em particular, recomenda-se a realização de simulações numéricas de sensibilidade e de validação experimental em campo antes da adoção em larga escala (ZORNBERG *et al.*, 2003; SCANLON *et al.*, 2005).

Para o dimensionamento ótimo dessas coberturas, é imprescindível avaliar capacidade de armazenamento, condutividade hidráulica, regime pluviométrico local, custos de construção e manutenção, além de riscos específicos (bioturbação, penetração radicular, variações interanuais de precipitação). Na prática, combina-se caracterização laboratorial (CCAS,  $K_{sat}$ ), pedotransferência (quando necessário) e modelagem numérica (por exemplo, HYDRUS-1D) para testar cenários climáticos e operacionais e reduzir incertezas (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013; RADCLIFFE; ŠIMŮNEK, 2018).

Na comparação técnico-econômica entre coberturas convencionais e ET covers, as ET covers frequentemente apresentam custos iniciais menores e melhor integração paisagística, mas demandam garantias de desempenho de longo prazo (monitoramento de percolação, manutenção da vegetação e gestão de riscos de raízes/bioturbação). Consequentemente, a prática recomendada é o emprego combinado de medições de campo, modelagem numérica calibrada e análises de

sensibilidade/incerteza para apoiar a decisão de projeto (ROCK *et al.*, 2012; EPA, 2015)

Em síntese, a comparação entre os resultados deste trabalho e a literatura revela convergência metodológica: perfis de cobertura evapotranspirativa adequadamente projetados e monitorados tendem a reduzir de forma expressiva a percolação em relação às coberturas convencionais, desde que o projeto observe explicitamente os limites impostos pela variabilidade climática, pela estrutura e heterogeneidade do solo e pelas práticas de manejo e manutenção da vegetação. Para atingir esse desempenho é necessário que o dimensionamento considere a capacidade útil de armazenamento do perfil ativo, a condutividade hidráulica (em particular a presença ou ausência de macroporos e camadas capilares), a profundidade radicular admissível e margens de segurança para eventos extremos, e que esses parâmetros sejam validados por ensaios laboratoriais, medições de campo e simulações numéricas calibradas (CATAPRETA, 2008; ZORNBERG *et al.*, 2003; SCANLON *et al.*, 2005)

Adicionalmente, a viabilidade prática das ET covers depende de programas de monitoramento e de manutenção robustos: recomenda-se instrumentalização com lisímetros ou coletores de percolação, sensores de umidade ao longo do perfil (TDR/FDR), monitoramento da velocidade de estabelecimento e cobertura vegetal, inspeções periódicas para detecção de bioturbação e planos de intervenção para reparos e replantio. No plano de pesquisa e projeto, é importante incorporar análises de sensibilidade e incerteza (por exemplo, cenários climáticos e de manejo), estudos de escalabilidade entre ensaios em lisímetros e a escala operacional, e avaliações econômico-ambientais (LCA) para comparar custos de ciclo de vida e riscos, de modo a respaldar decisões técnicas e regulatórias sobre a adoção de ET covers em diferentes contextos climáticos e geotécnicos. (CATAPRETA, 2008; ZORNBERG *et al.*, 2003; SCANLON *et al.*, 2005).



### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo iniciou-se pela caracterização físico-geotécnica do material coletado, por meio de ensaios laboratoriais destinados a determinar umidade natural, limites de Atterberg (liquidez e plasticidade), massa específica real dos grãos, análise granulométrica, curva de compactação (Proctor), permeabilidade ( $K_{sat}$ ) e curva de sucção (CCAS). Esses ensaios forneceram os parâmetros essenciais para a classificação do solo e subsidiaram as funções constitutivas ( $\theta(\psi)$  e  $K(\theta)$ ) utilizadas como dados de entrada no software HYDRUS-1D, permitindo a simulação do comportamento hidráulico transiente e a comparação entre diferentes soluções de cobertura.

A expressão “estabilidade do solo”, empregada anteriormente, refere-se aqui à estabilidade estrutural e à suscetibilidade do perfil superficial à erosão e à deformação, e não a “horizontes pedológicos” em sentido estrito. Para essa avaliação a discussão combinou resultados índice (limites de Atterberg, granulometria, densidade aparente seca obtida nas provas de compactação) com indicadores de comportamento ( $K_{sat}$ , capacidade de armazenamento do perfil ativo, e curva de sucção), de modo a inferir a tendência do material à coesão, à produção de macroporos e ao risco de erosão superficial sob precipitação. Observações de campo e inspeção visual das amostras deformadas (~10 kg coletadas por ponto) complementaram a interpretação, sendo usadas para avaliar heterogeneidade, teor de matéria orgânica e presença de raízes/bioturbação que influenciam o desempenho hidráulico e a durabilidade da cobertura.

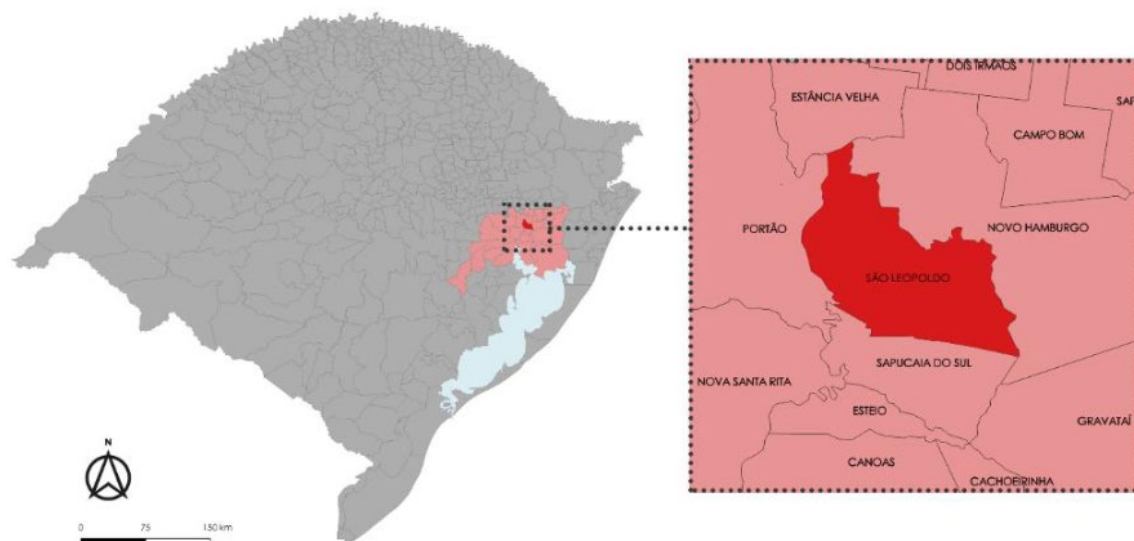
Por “camada superior de aterro” entende-se, neste trabalho, o perfil de cobertura final aplicado sobre as células de resíduos, cujo desempenho hidráulico e estrutural foi comparado entre duas soluções representativas: (i) cobertura convencional — solo compactado com características de baixa condutividade hidráulica (perfil compactado tipo CCL); e (ii) cobertura evapotranspirativa — perfil vegetado com zona ativa de armazenamento projetada para retenção e liberação por evapotranspiração. Os parâmetros hidráulicos específicos de cada perfil ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $K_{sat}$ , porosidade etc.) foram obtidos diretamente de ensaios quando possível ou estimados por pedotransferências e, em seguida, incorporados ao modelo HYDRUS-1D para simulação comparativa.

As simulações numéricas com HYDRUS-1D consideraram condições de contorno representativas (fornecimento de precipitação horário/dia, potencial de evapotranspiração, condição de base do perfil e cenários de precipitação extremos) e foram usadas para quantificar percolação, evolução temporal do teor de água no perfil e sensibilidade às variáveis de projeto (espessura do perfil ativo,  $K_{sat}$ , estabelecimento vegetativo). A comparação entre perfis baseou-se em métricas de interesse prático (fluxo acumulado de percolação anual, pico de percolação em eventos extremos e tempo de recuperação da umidade do perfil), e os resultados foram confrontados com dados experimentais e com a literatura para validação e discussão das implicações de projeto.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O primeiro material de ensaio foi coletado em 06 de outubro de 2023, às 16h56min, na unidade de aterro sanitário da CRVR (Companhia Rio-Grandense de Valorização de Resíduos), situada no bairro Arroio da Manteiga, São Leopoldo/RS (29°44'32" S; 51°11'40" W), conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4. Esta localização foi selecionada por representar a jazida efetivamente explorada pela CRVR para extração do material empregado na camada de cobertura final do próprio aterro; assim, as amostras coletadas são representativas do material em uso operacional e, portanto, apropriadas para caracterizações geotécnicas que visam avaliar o desempenho da cobertura em serviço.

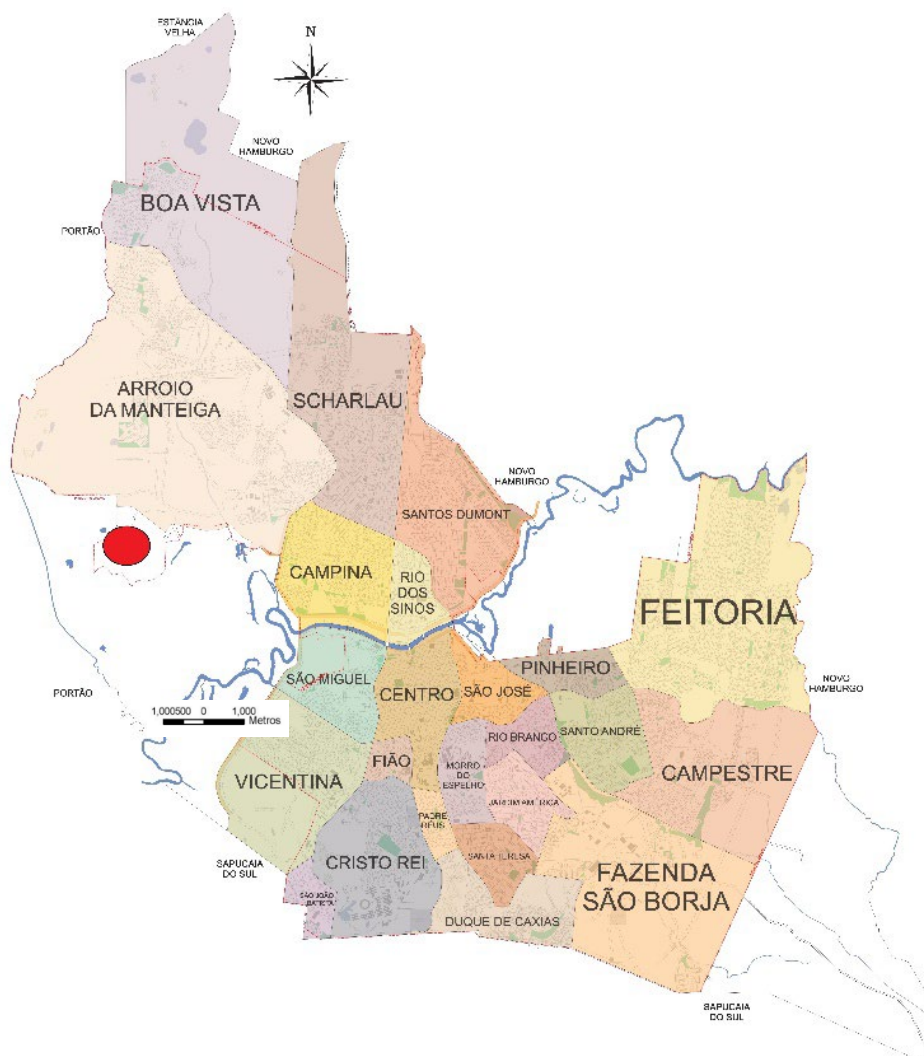
Figura 3 - Mesorregião e Microrregião de coleta das amostras



Fonte: CORRÊA; MARASCHIN, 2019.

Na Figura 4 apresenta-se um recorte cartográfico do perímetro do aterro (destacado em vermelho) sobreposto ao mapa municipal de São Leopoldo (fonte: adaptado de IBGE, 2023), permitindo localizar com precisão o ponto de amostragem em relação à malha urbana. Não foram incluídos outros grupos de solo do município por opção de estudo: o objetivo foi caracterizar especificamente o material extraído e usado pela CRVR, e não realizar levantamento pedológico municipal.

Figura 4 - Bairros da Cidade de São Leopoldo/RS, com destaque em vermelho da localização da coleta



Fonte: Adaptado de IBGE, 2023.

Foi realizado levantamento in loco das jazidas e inspeção visual/tátil das superfícies expostas para identificar pontos de extração e heterogeneidades aparentes. Deve-se observar que a análise tátil-visual é um procedimento preliminar e qualitativo — útil para guiar a coleta — que avalia cor, odor, umidade aparente, consistência e traços de cimentação ou presença de raízes; entretanto, a determinação de propriedades texturais e hidráulicas exige ensaios laboratoriais específicos, razão pela qual amostras foram devidamente acondicionadas e encaminhadas ao laboratório para análise detalhada.

A expressão “camada superior de cobertura” empregada ao longo do trabalho refere-se formalmente ao perfil de cobertura final aplicado sobre as células de resíduos (ou “top cover”), isto é, ao conjunto de camadas imediatamente sobre o corpo de resíduos cuja função é controlar infiltração, atuar como proteção mecânica da geomembrana (quando existente) e sustentar cobertura vegetal; neste trabalho comparou-se o comportamento hidráulico de dois perfis representativos desse “perfil de cobertura final”.

O segundo material foi coletado em 15 de março de 2024, às 16h45min, em um ponto de extração localizado em obra de terraplenagem em Esteio/RS (29,850842° S; 51,179731° W). A amostra foi retirada a 1,50 m de profundidade e, na descrição de campo, apresentou umidade natural (entenda-se: teor de água in situ presente no momento da amostragem, não alterado por secagem), baixo teor aparente de matéria orgânica e ausência de sinais óbvios de contaminação. A justificativa para a coleta deste segundo ponto foi comparativa: durante a inspeção da jazida da CRVR o material mostrou-se mais arenoso do que o esperado para a configuração de cobertura desejada; portanto buscou-se, em local próximo a São Leopoldo, um depósito com características mais areno-argilosas para compor a análise comparativa entre perfis de cobertura com texturas distintas.

Para a coleta de ambos os solos se empregaram ferramentas de campo (cabos de enxada), fita métrica, sacos plásticos e filme de PVC para acondicionamento imediato; cada amostra recebeu identificação única (por exemplo: CRVR\_06-10-2023-A; ESTEIO\_15-03-2024-B), registro de data/horário e coordenadas, e foi armazenada em condições que preservaram o teor de água natural até a chegada ao laboratório. Essas providências asseguram a rastreabilidade e reduzem vieses decorrentes de perda de umidade ou contaminação entre amostragem e ensaio.

### 3.1.1 Clima

A região de São Leopoldo está inserida no domínio do clima subtropical úmido, classificado como *Cfa* segundo Köppen–Geiger, caracterizando-se por verões quentes e úmidos e por invernos relativamente mais amenos e secos. Essas características climáticas são relevantes para o dimensionamento de sistemas de cobertura e para a avaliação do balanço hídrico solo–planta–atmosfera (ALVARES *et al.*, 2014).

Para caracterizar o clima local de forma comparável a estudos técnicos, adotaram-se as Normais Climatológicas oficiais calculadas pelo INMET para o período padrão 1991–2020. As normais correspondem a médias de longo prazo (mínimo de três décadas) que representam o clima “médio” da localidade e servem de referência para análises de tendência, dimensionamento hidrológico e avaliações ambientais (INMET, 1991–2020).

As normais indicam precipitação pluvial anual média na ordem de 1700–1800 mm, com distribuição relativamente bem distribuída ao longo do ano e sem estação seca pronunciada. Esses valores são apresentados aqui como resumo regional; para aplicações de projeto recomenda-se a adoção das normais mensais 1991–2020 e da série de precipitação observada na estação INMET mais próxima para assegurar representatividade local (INMET, 1991–2020).

Quanto às temperaturas, as normais 1991–2020 apontam temperatura média anual na faixa aproximada de 18–20 °C, com picos de temperatura máxima média diurna próximos de 30–31 °C em janeiro/fevereiro e médias mínimas próximas de 10–12 °C em julho. Valores pontuais de anos isolados não substituem as normais climatológicas; assim, séries históricas longas devem ser tratadas separadamente quando o objetivo for análise de tendência climática ou detecção de anomalias.

As médias aqui apresentadas referem-se estritamente às normais climatológicas (1991–2020) e não a médias anuais de um único ano; para simulações transientes (por exemplo, com HYDRUS) recomenda-se o uso das normais mensais complementadas por séries diárias ou horárias observadas da estação mais representativa. A extração e a montagem da tabela com as normais mensais (precipitação e temperatura) da estação INMET correspondente podem ser realizadas e incorporadas ao capítulo quando necessário para a etapa de modelagem ou para documentação técnica adicional (INMET, 1991–2020).

No que se refere a tendências climáticas, as normais 1991–2020 incorporam mudanças recentes em relação às normais 1961–1990 e estudos regionais apontam incrementos graduais de temperatura no Sul do Brasil; por isso, para projetos sensíveis à evapotranspiração recomenda-se complementar as normais com análises de tendência histórica e com cenários futuros (projeções e anomalias) quando requerido pelo escopo do projeto. Essas análises suportam decisões de projeto mais robustas, especialmente em sistemas de cobertura cujo desempenho depende

criticamente do balanço hídrico. (ALVARES *et al.*, 2014; INMET, 1991–2020). As estações do ano são marcadas pelas seguintes médias de temperatura:

Verão (de dezembro a março)

- Temperatura máxima média: 31 °C
- Temperatura mínima média: 21 °C

Outono (de abril a maio)

- Temperatura máxima média: 25 °C
- Temperatura mínima média: 15 °C

Inverno (de junho a agosto)

- Temperatura máxima média: 21 °C
- Temperatura mínima média: 11 °C

Primavera (de setembro a novembro)

- Temperatura máxima média: 27 °C
- Temperatura mínima média: 17 °C

A compreensão detalhada das características climáticas é crucial para avaliar os impactos ambientais, estruturais e geotécnicos em projetos diversos na localidade.

### 3.1.2 Hidrografia

A região do Vale dos Sinos, no estado do Rio Grande do Sul, é drenada pelo Rio dos Sinos, que constitui o principal curso d'água da bacia. O rio tem sua nascente na Serra Gaúcha, no município de Caraá, e percorre aproximadamente 180 km até a sua foz no Lago Guaíba, integrando uma bacia com área aproximada de 3.694 km<sup>2</sup> e envolvendo trinta municípios, conforme ilustra a Figura 5 (SEMA/RS, 2018).

O regime hídrico do Rio dos Sinos é do tipo misto, sendo a vazão fortemente influenciada pelos eventos pluviométricos da região; os maiores volumes e episódios de cheia costumam ocorrer nos meses de verão, enquanto o inverno tende a apresentar vazões mais reduzidas. Essas características temporais são relevantes para a avaliação de riscos hidrológicos e para a definição de cenários pluviométricos utilizados nas análises de infiltração e dimensionamento de sistemas de controle superficial (SEMA/RS, 2018).

Além do rio principal, a bacia integra uma rede de drenagem secundária formada por diversos afluentes que contribuem para o balanço hídrico regional, bem como por cursos d'água intermitentes e permanentes que influenciam a dinâmica local

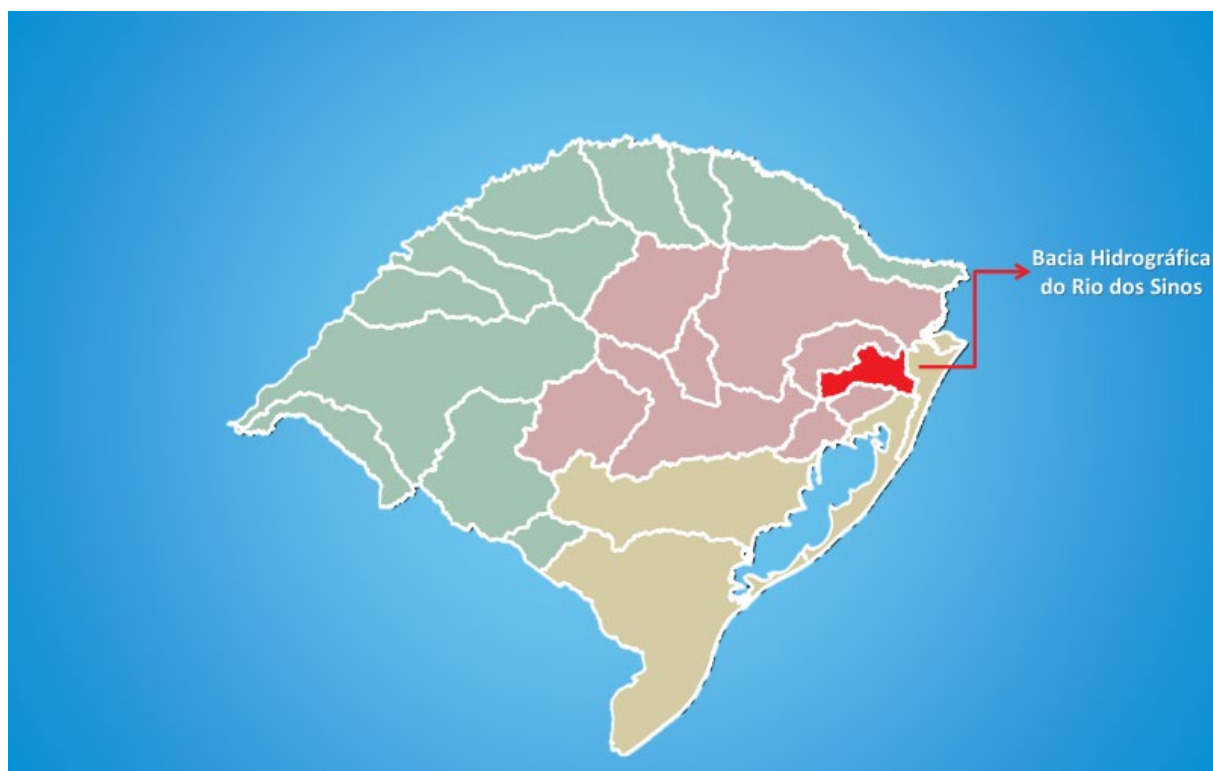
de escoamento. A bacia também dispõe de recursos hídricos subterrâneos (aquíferos e nascentes) que desempenham papel relevante no abastecimento e na manutenção de vazões de base, especialmente em períodos de estiagem (SEMA/RS, 2018).

A bacia do Rio dos Sinos enfrenta desafios ambientais significativos, entre os quais se destacam a poluição por efluentes industriais, agrícolas e urbanos, o assoreamento dos leitos fluviais e processos erosivos decorrentes do desmatamento e da impermeabilização do solo. Esses fatores aumentam a vulnerabilidade a eventos de inundação e exigem políticas integradas de gestão, controle de fontes de poluição e medidas de recuperação de áreas degradadas (SEMA/RS, 2018).

Do ponto de vista de planejamento e de engenharia, a gestão integrada da bacia é essencial para garantir a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos, bem como para reduzir riscos associados a inundações e ao transporte de cargas contaminantes. As ações recomendadas na literatura técnica incluem monitoramento contínuo das vazões e da qualidade da água, controle do uso do solo na zona ripária e programas de dragagem e desassoreamento quando tecnicamente justificados (SEMA/RS, 2018; SEMA/RS, 2021). As localizações da bacia hidrográfica e das sub-bacias relevantes estão representadas nas Figuras 5 e 6, que servem como referência espacial para os estudos de impacto e para a seleção de condicionantes hidrológicas adotadas nas simulações e análises deste trabalho, com a localização do aterro da CRVR destacada em vermelho na Figura 6 (SEMA/RS, 2018).

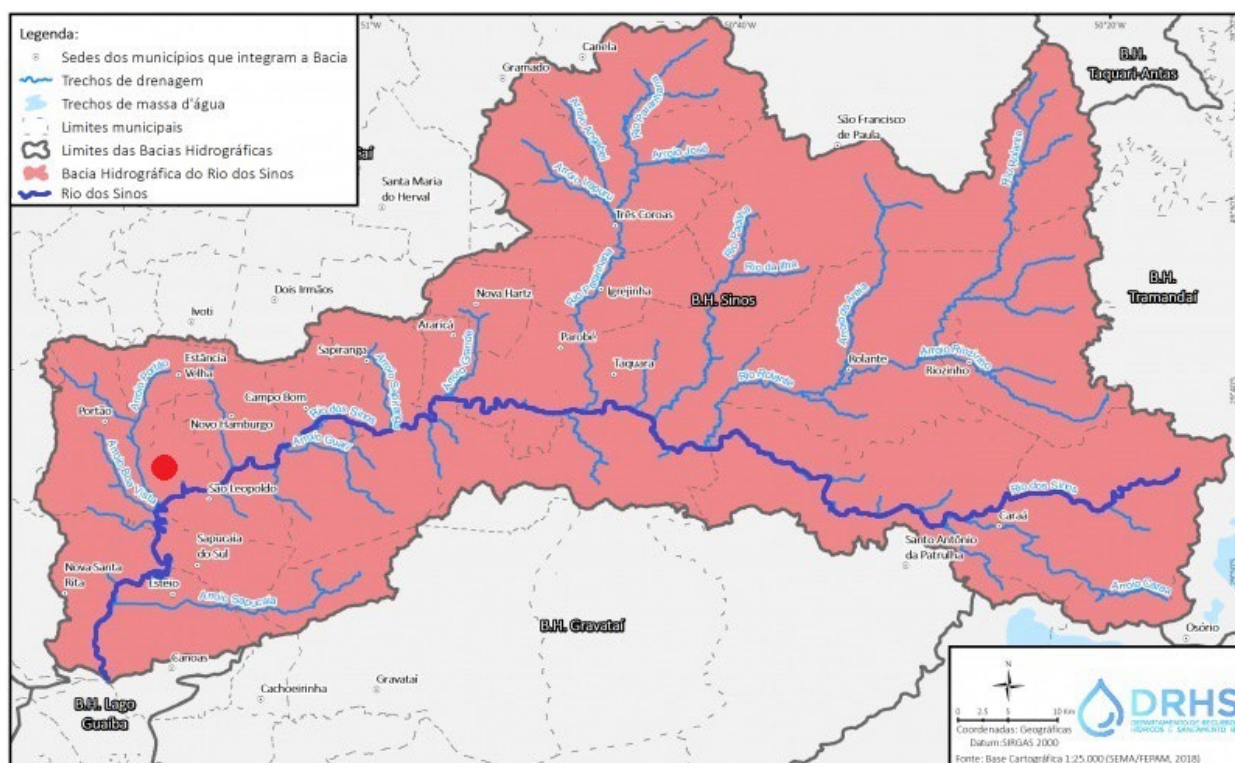


Figura 5 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos



Fonte: SEMA/RS, 2018.

Figura 6 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos



Fonte: adaptado de SEMA/RS, 2018.

Além do Rio dos Sinos, a bacia hidrográfica também é composta por outros cursos d'água, como os rios Caí, Gravataí e Taquara. A região também é rica em recursos hídricos subterrâneos, representados por aquíferos e nascentes. A bacia hidrográfica do Rio dos Sinos enfrenta uma série de problemas ambientais, como a poluição, a erosão e as inundações. A poluição é causada por atividades industriais, agrícolas e urbanas. A erosão é causada pela retirada de vegetação e pela impermeabilização do solo. As inundações são causadas por chuvas intensas e pelo assoreamento dos cursos d'água. A gestão da bacia hidrográfica é essencial para garantir a conservação dos recursos hídricos e a proteção do meio ambiente (SEMA/RS, 2018).

### 3.1.3 Topografia e Geomorfologia

A região do Vale dos Sinos apresenta uma topografia predominantemente de baixas declividades, com altitudes regionais situadas na faixa de aproximadamente 20 a 100 m acima do nível do mar, e a cidade de São Leopoldo apresenta altitude média em torno de 50 m (EMBRAPA, 2005). Essas características altimétricas regionais indicam um relevo de colinas suaves e planícies intercaladas, informação que é pertinente para avaliar riscos de escoamento superficial, assoreamento e erosão nas áreas de cobertura de aterros (EMBRAPA, 2005).

A relevância da topografia para o problema em estudo deve ser explicitada: enquanto a modelagem regional de escoamento e de contatos entre bacias demanda representação detalhada do relevo em planta (DEM) e de declividades, para a modelagem hidrodinâmica unidimensional de perfis de cobertura (HYDRUS-1D) o papel direto da altimetria regional é limitado. Ou seja, perfis verticais podem ser representativos quando a declividade local sobre a célula é suave e não há escoamento superficial concentrado ou forte componente de fluxo subsuperficial lateral; neste caso, a hipótese 1-D é razoável desde que as condições de contorno superficiais (precipitação menos perdas por escoamento superficial) e a condição de base do perfil (cota do aquífero ou nível de água) sejam corretamente definidas (EMBRAPA, 2005).

Todavia, a topografia local (microrrelevo e declividade da superfície da cobertura) tem efeitos práticos importantes sobre o desempenho das coberturas: declividades influenciam o potencial de escoamento superficial e a suscetibilidade à

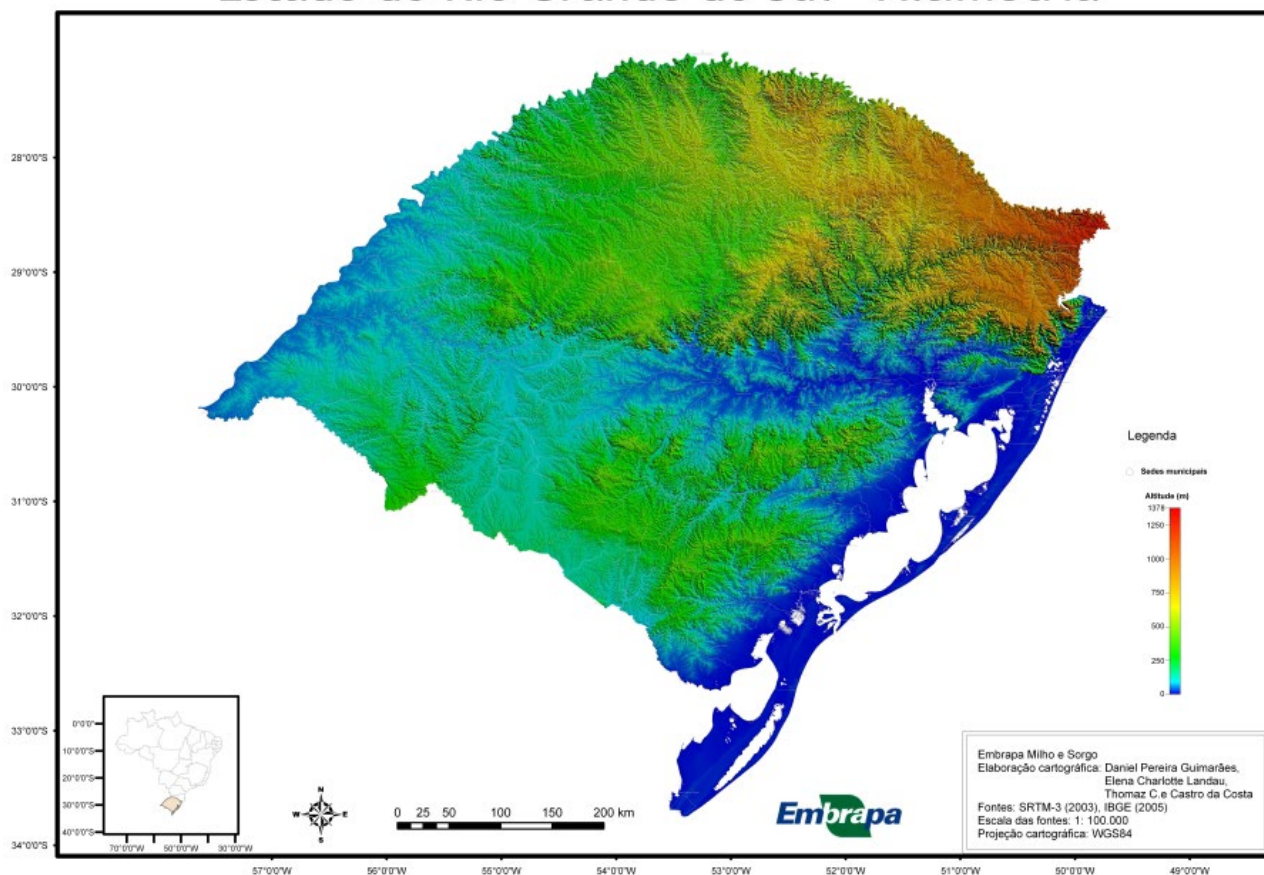
erosão, a formação de zonas de escoamento concentrado e a necessidade de obras de proteção superficial (banquetas, drenos, dispositivos de dissipação de energia). Por essa razão, o projeto de cobertura deve considerar mapeamento das declividades locais e medidas geomorfológicas para controle de erosão sempre que as superfícies não forem quase planas (EMBRAPA, 2005).

Do ponto de vista da modelagem numérica, recomenda-se proceder da seguinte forma: (i) quantificar a declividade média e o microrrelevo no local de estudo e documentar se existem áreas com escoamento concentrado; (ii) se a superfície for de declividade suave e sem escoamento concentrado, utilizar HYDRUS-1D para simulações verticais, adotando um termo de perda superficial que represente o escoamento superficial estimado (por exemplo, redução do aporte de água ao perfil); (iii) se houver declives acentuados, superfícies com canais ou evidência de fluxo lateral subsuperficial, considerar abordagens bidimensionais/ tridimensionais (HYDRUS-2D/3D) ou aplicar aproximações que incorporem fluxo lateral na condição de contorno. Essas precauções garantem que as hipóteses do modelo sejam coerentes com a realidade geomorfológica do sítio (EMBRAPA, 2005).

Em síntese, a variação altimétrica regional (20–100 m) e a descrição de relevo relativamente plano tornam plausível a aplicação de simulações 1-D nos perfis de cobertura deste trabalho, desde que: (a) a declividade local sobre as células estudadas seja baixa e não propensa a escoamento superficial concentrado; (b) a condição de contorno superficial da simulação represente adequadamente o balanço precipitação-escoamento; e (c) a posição da linha d'água/nível freático (condição de base) seja definida a partir de dados locais ou inferida por sondagens. Se qualquer uma dessas condições não for satisfeita, recomenda-se a adoção de modelagem 2-D/3-D ou inclusão de representações simplificadas de fluxo lateral (EMBRAPA, 2005). A Figura 7 ilustra o mapa da altimetria da região.

Figura 7 - Mapa da Altimetria do estado do Rio Grande do Sul

## Estado do Rio Grande do Sul - Altimetria



Fonte: EMBRAPA, 2005.

### 3.1.4 Solo

O solo de São Leopoldo/RS, assim como grande parte do Vale do Rio dos Sinos, é classificado, conforme a EMBRAPA (2002), como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (antigo Podzólico Vermelho-Amarelo). Esses solos apresentam saturação por bases inferior a 50% e argila de baixa atividade, caracterizando-se por gradiente textural abrupto ao longo do perfil (mudança textural ou “argissa”), com horizontes subsuperficiais mais argilosos em comparação aos superficiais. A textura varia de moderadamente arenosa a argilosa dependendo do ponto de amostragem, e a coloração vai de tons acinzentados nas camadas superficiais a matizes amarelados e avermelhados em maior profundidade. Do ponto de vista mineralógico, predominam argilas de baixa atividade, como a caulinita, e óxidos de ferro e alumínio, resultando em capacidade de troca catiônica geralmente inferior a  $27 \text{ cmolc} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Essas

propriedades influenciam diretamente o comportamento hidráulico, especialmente a condutividade, a capacidade de retenção de água e a estabilidade da cobertura quando empregada em aterros sanitários (EMBRAPA, 2002; EMBRAPA, 2018).

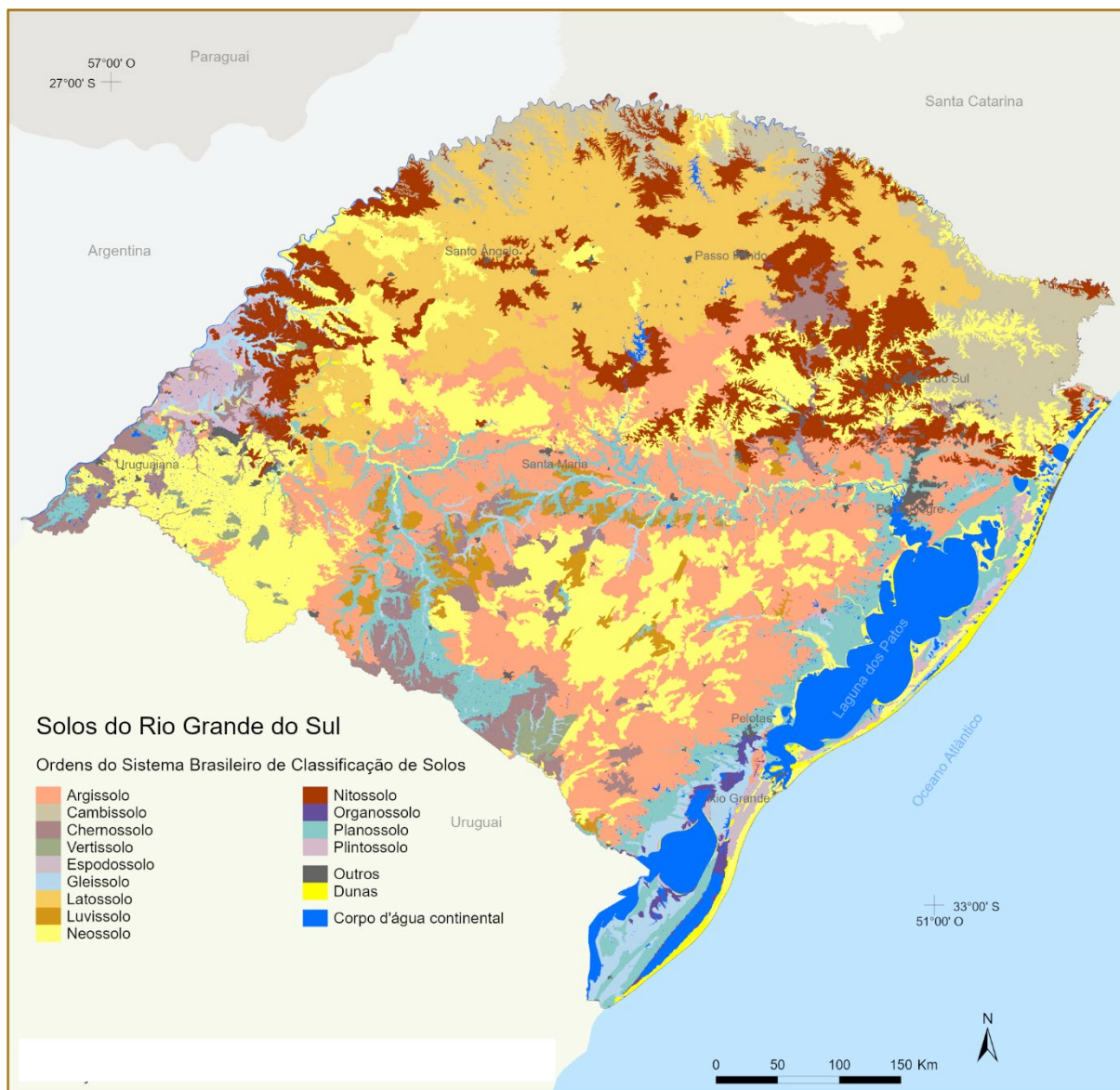
Em relação ao solo coletado em Esteio/RS (29,850842° S; 51,179731° W), os levantamentos pedológicos indicam predominância de Neossolos Quartzarênicos e Argissolos, associados à Depressão Central gaúcha. Os Neossolos, em especial, são solos pouco desenvolvidos, de textura arenosa e baixa fertilidade, apresentando elevada vulnerabilidade à erosão e alta condutividade hidráulica. Já os Argissolos locais apresentam frações mais finas, com horizontes subsuperficiais enriquecidos em argila, o que contribui para maior capacidade de retenção de água. A coleta em Esteio visou contemplar um material mais argiloso em comparação ao solo arenoso predominante na jazida explorada pela CRVR em São Leopoldo, permitindo avaliar a influência da granulometria e da fração de finos no desempenho hidráulico das camadas de cobertura de aterro.

De forma mais ampla, o Rio Grande do Sul apresenta grande diversidade pedológica, resultado da interação entre fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos ao longo do tempo. O mapeamento estadual mostra que as ordens de solos mais representativas são Argissolos (19,9%), Neossolos (19,5%), Latossolos (16,8%) e Nitossolos (10,1%), que juntas cobrem mais da metade do território (EMBRAPA, 2018; IBGE, 2023). No Planalto Meridional, de origem vulcânica, predominam Latossolos e Nitossolos, solos profundos e argilosos, mas também ocorrem Cambissolos e Neossolos em menor escala. Na Depressão Central, formada por rochas sedimentares, destacam-se Argissolos e Planossolos, geralmente arenosos, profundos e suscetíveis à erosão. No Escudo Sul-rio-grandense, de litologia ígnea e metamórfica, os solos são rasos, como Neossolos, associados a relevo mais acidentado. Já o Litoral gaúcho é dominado por Neossolos e Planossolos, resultantes da deposição de sedimentos arenosos, caracterizados por baixa fertilidade, baixa retenção hídrica e elevada permeabilidade. Essa diversidade pedológica condiciona o uso e manejo agrícola, além de influenciar diretamente os critérios de seleção de materiais em obras de engenharia, como aterros sanitários (EMBRAPA, 2018; IBGE, 2023).

A figura 8 ilustra o mapa exploratório dos solos do RS, com os principais tipos encontrados no território gaúcho.



Figura 8 - Mapa dos Solos do estado do Rio Grande do Sul



Fonte: IBGE, 2023.

### 3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Cada amostra recebeu código único (por exemplo: CRVR\_20231006\_01; ESTEIO\_20240315\_01) e todos os resultados laboratoriais foram vinculados a esses códigos nas planilhas de dados, assegurando rastreabilidade e cadeia de custódia. Esse procedimento permite correlacionar propriedades índice (limites de Atterberg, granulometria, massa específica dos grãos) e propriedades hidráulicas ( $K_{sat}$ , curva característica água-sucção — CCAS) para fins de parametrização e análise comparativa.

Os ensaios de caracterização física e indexante realizados no LMS/UNISINOS foram: teor de umidade natural (gravimetria), limites de Atterberg (liquidez e plasticidade), análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, massa específica real dos grãos, determinação de densidade seca e porosidade aparente, teor de matéria orgânica (quando aplicável por perda ao fogo ou outro método padrão) e observações de campo (descrição tátil-visual). Estes ensaios fornecem a base para classificação do solo e para estimativas iniciais do comportamento geotécnico.

Os ensaios geotécnicos adicionais executados para avaliar comportamento sob carregamento e fluxo foram: curva de compactação (ensaio Proctor modificada ou normal, conforme requerido pelo projeto), ensaios de permeabilidade ( $K_{sat}$ ) realizados em permeâmetro de carga variável e/ou carga constante conforme a granulometria do material (procedimento referenciado — ABNT, 2021), e determinação da curva característica água-sucção (CCAS) por método de equilíbrio com papel filtro (Whatman nº 42) para leitura de sucções controladas (MARINHO; OLIVEIRA, 2006). Esses ensaios permitiram obter as funções constitutivas  $\theta(\psi)$  e  $K(\theta)$  para uso nas simulações numéricas.

Foram realizadas dez (10) determinações replicadas para cada ensaio de 3.2.1 a 3.2.5 (limites de Atterberg, granulometria, massa específica, Proctor,  $K_{sat}$ , CCAS) com o mesmo material, de modo a permitir avaliação estatística da variabilidade, cálculo de médias e desvios-padrão e verificação da qualidade dos resultados. A adoção de replicatas elevadas visa reduzir incertezas e fornecer intervalos de confiança para os parâmetros hidráulicos empregados na modelagem.

Esclarece-se que a modelagem numérica (HYDRUS-1D) não constitui ensaio de caracterização laboratorial, mas sim uma etapa de simulação que utiliza os parâmetros obtidos experimentalmente; a metodologia, a parametrização e as condições de contorno empregadas nas simulações são descritas na Seção 3.3 (Modelagem Numérica). Em outras palavras, os ensaios de laboratório fornecem os dados de entrada e as rotinas de controle de qualidade, enquanto as simulações avaliam o comportamento hidráulico sob cenários climáticos e operacionais.

Os procedimentos laboratoriais seguiram as boas práticas do laboratório e protocolos usuais de execução e calibração de equipamentos; amostras sensíveis destinadas à CCAS e permeabilidade foram acondicionadas para minimizar alteração de microestrutura e teor hídrico entre campo e ensaio. Todos os equipamentos de teste estão localizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UNISINOS,

sala C03-126, e os relatórios de ensaio contêm dados brutos, replicatas e laudos técnicos para auditoria.

### 3.2.1 Preparação da amostra de solo e verificação do teor de umidade

A umidade do solo ( $h$ ) é definida como a razão entre a massa de água ( $M_a$ ) contida em um certo volume de solo e a massa da parte sólida ( $M_s$ ) existente nesse mesmo volume (Equação 6). Ela é uma propriedade importante do solo, pois influencia a sua estrutura, permeabilidade, capacidade de retenção de água e nutrientes (CAPUTO, 2017).

$$h(\%) = \frac{M_a}{M_s} \cdot 100 \quad (6)$$

No Brasil, a determinação da umidade do solo é padronizada pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016). O método mais utilizado é o método de secagem em estufa, que consiste em secar a amostra de solo em uma estufa a uma temperatura de 105°C a 110°C até que sua massa se torne constante. O procedimento do ensaio é a seguir, descrito:

Primeiramente, realiza-se a pesagem da amostra úmida. Seleciona-se uma quantidade de material com base nas dimensões dos grãos maiores presentes na amostra, conforme indicado na Tabela 1. Realiza-se a desagregação sem perda de umidade com auxílio de uma mão de gral revestida de borracha e transferir para cápsulas metálicas. Proceder à pesagem do conjunto.

Tabela 1 - Quantidade de amostra a ser tomada

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente (mm)	Quantidade de material (g)	Balança a ser utilizada	
		Capacidade (g)	Resolução (g)
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1500	0,1
20 a 76	300 a 3000	5000	0,5

Fonte: NBR 6457 (ABNT, 2016).

Logo após, processa-se a secagem da amostra. Coloca-se a cápsula na estufa, geralmente durante um período de 16 a 24 horas, necessário para a secagem do



material. Pode ser necessário estender os intervalos, dependendo do tipo e quantidade de solo ou se o solo estiver excessivamente úmido.

Em seguida, desenrola-se a pesagem da amostra seca. Realiza-se uma segunda pesagem após remover o conjunto da estufa. Deve-se conduzir, no mínimo, três medições do teor de umidade por amostra.

Por fim, calcula-se a umidade pela Equação 6. Por exemplo, se a massa da água da amostra for de 100 g e a massa da amostra seca for de 500 g, a umidade da amostra será de 20%.

A preparação das amostras por sua vez, também regulamentada pela NBR 6457 (ABNT, 2016) no Brasil, precede os ensaios de caracterização e envolve cinco etapas: secagem parcial, destorroamento, quarteamento, pesagem e peneiramento. O procedimento do ensaio segue adiante:

Primeiramente realiza-se a secagem parcial das amostras por exposição ao ar, à luz infravermelha ou em estufa a 60°C por 12 horas, esta última apenas se não afetar as características do material.

Posteriormente, é realizado o destorroamento da amostra. A finalidade do destorroamento é separar as partículas menores das maiores no solo. Insere-se a amostra em um almofariz de porcelana com capacidade para 5 kg de solo e, gradualmente, utilizando uma mão de gral revestida de borracha, aplica-se pressão na amostra, realizando movimentos circulares até alcançar uma completa desagregação das partículas do solo. É importante realizar o destorroamento de modo a não diminuir o tamanho natural das partículas, para o qual a mão de gral deve ter seu revestimento em perfeito estado.

Após o destorroamento da amostra, o quarteamento extrai uma amostra menor, homogênea e representativa do total, podendo ser feito diretamente ou com auxílio de um repartidor de amostras. No método de quarteamento direto, a amostra é disposta sobre uma superfície plana e limpa, misturada intensivamente com uma pá, no caso de amostras grandes, ou com uma colher, para amostras menores, e organizada em uma pilha cônica. Este cone é então achatado por pressão da pá, resultando na divisão da amostra em quatro partes. Duas partes diametralmente opostas são descartadas, e o material restante é misturado antes de repetir o processo de quarteamento, continuando até obter uma amostra homogênea com o peso necessário para os ensaios.

Em seguida, pesa-se a amostra representativa obtida no quarteamento com valores específicos para cada tipo de solo (1500 g para solos argilosos ou siltosos; 2000 g para solos arenosos ou pedregulhosos). O peso da amostra representativa, obtido com uma precisão de aproximadamente 5 g, deve ser registrado como o peso total da amostra seca ao ar.

A fase de peneiramento constitui o último estágio no processo de preparação da amostra, durante o qual o material é segregado para diferentes ensaios. Recomenda-se, antes do peneiramento, conduzir uma etapa adicional de destorroamento para assegurar a desagregação completa de quaisquer torrões presentes, garantindo que apenas grãos maiores, compatíveis com a abertura da malha, permaneçam retidos na peneira.

A amostra completa é submetida ao peneiramento com uma malha de 2,00 mm (nº 10). O material retido na peneira (nº 10) é reservado para a análise de granulometria grossa, em que se determinam os diâmetros de partículas superiores a 2,0 mm.

O material que passa pela peneira (nº 10) é dividido para diferentes finalidades: para a determinação da umidade higroscópica em solo parcialmente seco (aproximadamente 50 g); para a execução de análise granulometria fina, considerando os diâmetros das partículas inferiores a 2,0 mm (aproximadamente 70 g para solos argilosos e 120 g para solos arenosos ou pedregulhos); e para a determinação da densidade real dos grãos, que é a relação entre o peso e o volume real dos grãos sólidos, referida ao peso específico da água (aproximadamente 10 g).

Após retirar as quantidades mencionadas, o restante do material passa por uma peneira com abertura de 0,42 mm (nº 40), visando à separação do material para a determinação dos limites de consistência.

O material que passa pela peneira (nº 40) é destinado à determinação do limite de liquidez (aproximadamente 70 g), do limite de plasticidade (aproximadamente 50 g), e do limite de contração (aproximadamente 50 g). Este processo visa definir os teores de umidade que caracterizam as transições entre os estados líquido, plástico e semissólido no solo.

### 3.2.2 Granulometria

A análise granulométrica tem como objetivo quantificar a distribuição, por tamanho, das partículas individuais do solo. Além da quantificação, é necessário determinar com que frequência tais partículas ocorrem em uma classe ou faixa de tamanho específica. A NBR 7181 (ABNT, 2016) define os procedimentos a serem adotados para a análise granulométrica.

Inicialmente, utilizando como referência a Tabela 3 (quantidade de amostra para análise granulométrica segundo a dimensão dos grãos maiores contidos na amostra em mm) da NBR 6457 (ABNT, 2016), a abordagem adotada consiste em tomar 1 kg de amostra para a realização deste ensaio. Em seguida, destorroa-se a amostra, passando-a pela peneira de 2 mm. O material retido na peneira é lavado com auxílio de um pincel e, posteriormente, levado para secar em estufa a 105° a 110°C por um dia.

Para o peneiramento grosso, após a secagem do material retido na peneira de 2 mm, pesa-se o material retido e passa-se nas peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm, utilizando um agitador de peneiras. As peneiras são colocadas no agitador mecânico e agitadas por 4 minutos a uma velocidade constante.

Posteriormente, retira-se cuidadosamente o material retido em cada peneira e pesa-se para obter mais informações sobre a amostra passante.

O processo de peneiramento fino é semelhante ao descrito anteriormente, envolvendo os processos de secagem do material, passagem pelas peneiras, agitação com o agitador de peneiras e subsequente separação e pesagem da amostra passante.

Conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), para calcular as porcentagens de material que passam pelas peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm, utiliza-se a Equação 7:

$$Q_g = \frac{M_s - M_r}{M_s} \cdot 100 \quad (7)$$

Em que:

$Q_g$  = Porcentagem de material passado em cada peneira (%);

$M_s$  = Massa total da amostra seca (g);

$M_r$  = Massa do material retido acumulado em cada peneira (g).

Quanto aos cálculos para o peneiramento fino, que envolvem as peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, utiliza-se a Equação 8:

$$Qg = \frac{M_u \cdot 100 - M_r (100 + W)}{M_u \cdot 100} \cdot N \quad (8)$$

Em que:

$Q_f$  = Porcentagem de material passado em cada peneira (%);

$M_u$  = Massa do material submetido ao peneiramento fino ou a sedimentação (g);

$W$  = Umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0mm (%);

$M_r$  = Massa do material retido acumulado em cada peneira (g);

$N$  = Porcentagem de material que passa na peneira de 2.0mm.

Para o ensaio de sedimentação, toma-se 120 g do material passante na peneira de 2,0 mm. Em seguida, transfere-se o material obtido para um béquer de 250 cm<sup>3</sup>, com auxílio de uma proveta, e adiciona-se o defloculante, 125 cm<sup>3</sup> de solução de hexametáfosfato de sódio [(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>] com a concentração de 45,7 g do sal por 1.000 cm<sup>3</sup> de solução. Agita-se o béquer até que todo o material fique imerso e então deixado em repouso por 12 horas.

Posteriormente, verte-se a mistura no copo de dispersão, removendo com água destilada, usando a bisnaga, o material aderido ao béquer. Adiciona-se água destilada até que seu nível fique 5 cm abaixo das bordas do copo e submete-se à ação do aparelho dispersor por 15 minutos.

Em seguida, transfere-se a dispersão para a proveta e se remove com água destilada, usando a bisnaga, todo o material aderido ao copo. Adiciona-se água destilada até atingir o traço correspondente a 1.000 ml. Coloca-se a proveta no tanque para banho e agita-se frequentemente com uma baqueta de vidro para manter as partículas em suspensão. Assim que a dispersão atinge a temperatura de equilíbrio, toma-se a proveta, tampando-se a boca com uma das mãos, e executa-se movimentos enérgicos de rotação por 1 minuto, fazendo com que a boca da proveta passe de cima para baixo e vice-versa.

Imediatamente após a agitação, coloca-se a proveta sobre uma mesa, anotando-se a hora exata do início da sedimentação. Em seguida, mergulha-se cuidadosamente o densímetro na dispersão.

Finalmente, realizam-se as leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação (t) de 0,5, 1 e 2 minutos, retirando lentamente e cuidadosamente o densímetro da dispersão.

Para obter os resultados do ensaio de sedimentação, é necessário calcular duas variáveis: a porcentagem de material em suspensão e o diâmetro das partículas de solo em suspensão. Essas variáveis são obtidas por meio das Equações 9 e 10, respectivamente.

$$Q_s = N \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{wm}} \cdot \frac{V \cdot \rho_{wc} \cdot (L - L_d)}{\frac{M_w}{100+W} \cdot 100} \quad (9)$$

Em que:

$Q_s$  = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro (%);

$N$  = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0mm (%);

$\rho_s$  = massa específica dos grãos do solo, em g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_{wm}$  = massa específica da água, função da temperatura, utilizando o valor de 1.000g/cm<sup>3</sup>;

$V$  = volume da proveta igual a 100cm<sup>3</sup>;

$L$  = leitura do densímetro na suspensão;

$L_d$  = leitura do densímetro no meio dispersor na mesma temperatura da suspensão;

$M_w$  = massa do material úmido submetido a sedimentação, expressa em gramas;

$W$  = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0mm.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \cdot \mu}{\rho_s - \rho_{wm}} - \frac{Z}{t}} \quad (10)$$

Em que:

$d$  = diâmetro máximo das partículas (mm);

$\mu$  = coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio (g x s/cm<sup>2</sup>);

$Z$  = altura de queda das partículas, com resolução de 0.1 cm, correspondente a leitura do densímetro (cm);

$t$  = tempo de sedimentação (s);

$\rho_s$  = massa específica dos grãos do solo (g/cm<sup>3</sup>);

$\rho_{wm}$  = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/cm<sup>3</sup>.

Com todos os dados em mãos, é possível elaborar a curva granulométrica e determinar o percentual das frações que compõem o solo natural, bem como calcular os coeficientes extraídos da curva, como o coeficiente de uniformidade (CU) e de curvatura (CC), estabelecidos por meio das equações 11 e 12, respectivamente. Esses resultados também são úteis para estimar a condutividade hidráulica do solo.

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (11)$$

Em que:

CU = Coeficiente de Uniformidade;

D<sub>60</sub> = Diâmetro efetivo correspondente à percentagem acumulada de 60% do material retido;

D<sub>10</sub> = Diâmetro efetivo correspondente à percentagem acumulada de 10% do material retido.

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (12)$$

Em que:

CC = Coeficiente de Curvatura;

D<sub>30</sub> = Diâmetro efetivo correspondente à percentagem acumulada de 30% do material retido;

D<sub>10</sub> = Diâmetro efetivo correspondente à percentagem acumulada de 10% do material retido.

D<sub>60</sub> = Diâmetro efetivo correspondente à percentagem acumulada de 60% do material retido;

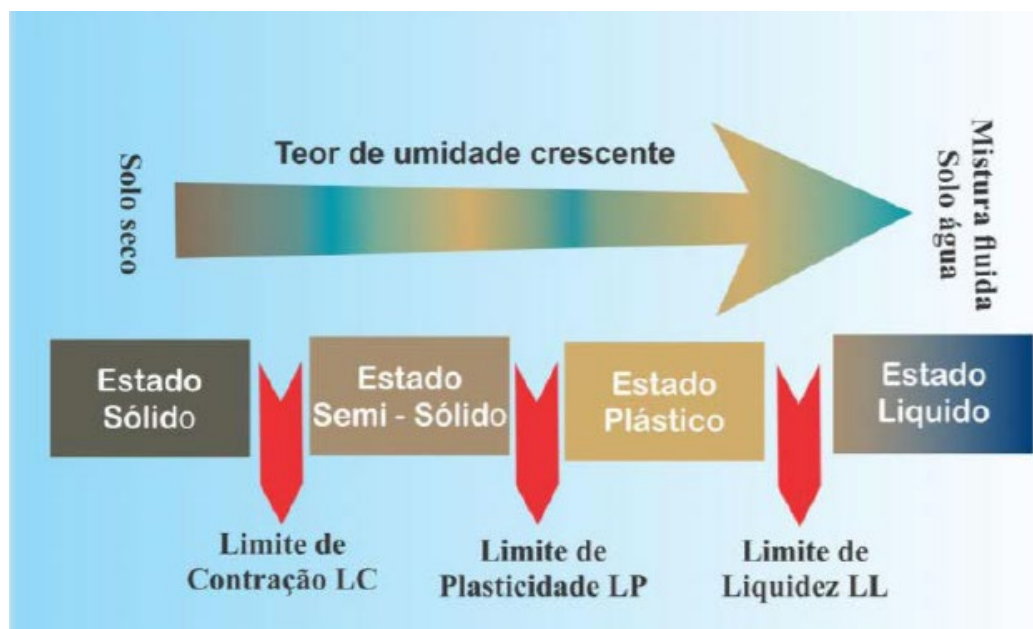
Esses diâmetros efetivos (D<sub>10</sub>, D<sub>30</sub> e D<sub>60</sub>) representam os diâmetros das partículas em que 10%, 30% e 60%, respectivamente, do material são retidos durante o processo de peneiramento. Esses valores são encontrados na curva granulométrica. O coeficiente de uniformidade (CU) fornece uma indicação da uniformidade do solo em termos de tamanho das partículas, enquanto o coeficiente de curvatura (CC) indica a curvatura da curva granulométrica, relacionando os percentis 10, 30 e 60.

### 3.2.3 Limites de Atterberg

A consistência do solo é uma característica de grande relevância para a engenharia, pois condiciona o comportamento mecânico e hidráulico do material sob diferentes estados de tensão e teor de água. Em particular, os limites de Atterberg fornecem informações sobre os intervalos hídricos nos quais o solo apresenta comportamento líquido, plástico ou sólido, o que é essencial para interpretações de campo e para a seleção de parâmetros de projeto (SOUZA et al., 2000).

Os limites clássicos definidos por Atterberg são: limite de liquidez (LL) — teor de água no qual o solo passa do estado plástico para o líquido; limite de plasticidade (LP) — teor de água limite entre o estado plástico e o semissólido; e limite de contração (LC) (ou limite de retração) — teor de água abaixo do qual não ocorre redução volumétrica adicional por secagem. Essas passagens descrevem a transição de estados físicos do solo com as variações de teor hídrico e são normalmente ilustradas em esquemas de consistência (ver Figura 9) (JONG et al., 1990; SÁVIO; BENITES, 2017).

Figura 9 – Representação esquemática das passagens dos estados de consistência do solo



Fonte: Sávio e Benites (2017).

Os limites de Atterberg — limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) — fornecem teores de água de referência que delimitam faixas de comportamento físico do solo (estados líquido, plástico e semissólido). Esses pontos de referência são úteis para inferir, de maneira qualitativa, a posição e a inclinação da relação entre teor de água e potencial matricial de um dado solo, o que por sua vez auxilia na previsão do grau de saturação e na estimativa aproximada da condutividade hidráulica no domínio não saturado, sobretudo quando se dispõe de dados complementares de textura e porosidade (SOUZA et al., 2000).

Para a execução dos ensaios adotaram-se as normas técnicas aplicáveis: NBR 6459 para determinação do limite de liquidez, NBR 7180 para o limite de plasticidade e NBR 6457 para os procedimentos de preparo das amostras. O preparo envolve desagregação controlada, passagem pela peneira de 0,42 mm e obtenção da massa passante necessária ( $\approx 200$  g por ensaio), garantindo condições padronizadas que minimizam vieses experimentais e viabilizam o cálculo do Índice de Plasticidade (IP) conforme a norma (ABNT, 2016).



### 3.2.3.1 Limite de Liquidez

Para realizar este ensaio, conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016), deve-se utilizar os seguintes equipamentos: estufa, balança de alta precisão, espátula, almofariz, cápsulas metálicas, cinzel, gabarito para verificar a altura de queda da concha e o aparelho de Casagrande.

Primeiramente, coloca-se a amostra de solo previamente escolhida em um almofariz. Logo após, é necessário adicionar água destilada gradualmente, homogeneizando o solo com uma espátula até obter uma uniformidade visível. Em seguida, transfere-se parte da amostra para o aparelho de Casagrande, colocando-a cuidadosamente no recipiente côncavo do aparelho e moldando-a para atingir uma espessura de 1cm no centro. Deve-se utilizar um gabarito para medir essa espessura.

Na etapa seguinte, faz-se uma ranhura simétrica na amostra com o cinzel e em seguida deve-se medir a espessura com o gabarito. É preciso realizar uma sequência uniforme de giros no apoio do aparelho até que as duas partes do solo entrem em contato, atingindo 1,3cm. Deve-se contar e anotar a quantidade de giros. Em seguida, é necessário pegar parte da amostra em que houve o contato, colocar em uma cápsula, realizar a pesagem e levar imediatamente à estufa. Esse processo é repetido até coletar cinco amostras para elaborar o gráfico do limite de liquidez.

### 3.2.3.2 Limite de Plasticidade

Para realizar este ensaio, conforme a NBR 7180 (ABNT, 2016), deve-se utilizar os seguintes equipamentos: estufa, balança de alta precisão, espátula, almofariz, cápsulas metálicas, gabarito cilíndrico e placa de vidro fosco.

O procedimento inicial assemelha-se ao do Limite de Liquidez, consistindo na adição gradual de água destilada para homogeneização até que a amostra atinja uma consistência de pasta homogênea.

Na etapa seguinte, deve-se retirar uma pequena parte da amostra preparada, formando uma pequena bola, que será rolada sobre a placa de vidro com uma leve pressão da palma da mão para adquirir forma cilíndrica.

Assim que a pequena parte atingir forma cilíndrica, com diâmetro de 3mm e comprimento próximo de 100mm (confirmado com o auxílio do gabarito), deve-se colocar a amostra em uma cápsula, pesá-la e imediatamente levá-la à estufa. Esse

processo é repetido até coletar três amostras para elaborar o gráfico do limite de plasticidade.

### 3.2.3.3 Índice de Plasticidade

Finalmente, para determinar o Índice de Plasticidade (IP), obteve-se os resultados do limite de liquidez e limite de plasticidade, utilizando a Equação 13:

$$IP = LL - LP \quad (13)$$

Em que:

IP = Índice de Plasticidade (%);

LL = Limite de Liquidez (%);

LP = Limite de Plasticidade (%).

A importância do índice de plasticidade na aplicação em aterro sanitário é atestada pela USEPA (2004), afirmando que o solo utilizado deve apresentar IP entre 7 a 15%, ou seja, possuir capacidade de moldagem e acomodação diferencial das partículas, além de resistência ao craqueamento causado pelas variações de umidade.

O IP define a zona em que o terreno se acha no estado plástico e, por ser máximo para as argilas e nulo para as areias, fornece um critério para se ajuizar do caráter argiloso de um solo. Assim, quanto maior o IP, tanto mais plástico será o solo. Quando um material não tem plasticidade (areia, por exemplo), considera-se o índice de plasticidade nulo.

Sabe-se que as argilas são tanto mais compressíveis quanto maior for o IP. Segundo Caputo (1988), os solos poderão ser classificados em:

Fracamente plásticos:  $1 < IP < 7$

Medianamente plásticos:  $7 < IP < 15$

Altamente plásticos:  $IP > 15$ .

### 3.2.4 Compactação

A compactação de um solo envolve a aplicação de forças manuais e/ou mecânicas para aprimorar suas propriedades, resultando na redução do volume de vazios entre os grãos. Esse processo conduz ao aumento da resistência, à diminuição

da permeabilidade e à criação de um material mais homogêneo. O ensaio de Compactação é regido segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016). A norma menciona a possibilidade de utilizar diferentes tipos de energia, afetando os equipamentos a serem empregados e o número de golpes a serem aplicados, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Energias de Compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Pequeno	Grande
	Número de Camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de Camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182 (ABNT, 2016).

Os objetivos de uma compactação podem envolver a redução de futuros recalques, o aumento da rigidez e resistência do solo, bem como a diminuição da permeabilidade, entre outros. O processo de compactação visa aumentar a união entre as partículas, expulsando o ar presente entre elas por meio da aplicação repetida de cargas.

Para realizar o ensaio de compactação, adota-se o ensaio Proctor Normal utilizando um cilindro de 10 cm de diâmetro, altura de 12,73 cm e volume de 1.000 cm<sup>3</sup>, submetido a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5 kg, caindo de 30,5 cm. Isso corresponde ao efeito de compactação com os equipamentos tradicionais de campo.

O material deverá ser previamente seco ao ar e destorroado com o auxílio do almofariz. Após passar pela peneira nº 4 (4,8 mm), separam-se 3 kg de amostra para a realização deste ensaio. Antes da inicialização, utilizando um paquímetro, devem ser obtidas as dimensões do cilindro para calcular seu volume, utilizado na expressão para calcular o peso específico úmido, conforme demonstrado na Equação 14:

$$\gamma_s = \frac{P_u}{V} \quad (14)$$

Em que:

$\gamma_s$  = Peso Específico Úmido ( $\text{kN/m}^3$ );

$P_u$  = Peso úmido, calculado pela subtração da massa do cilindro pelo cilindro + solo (g);

$V$  = Volume ( $\text{m}^3$ ).

O ensaio deve ser iniciado com antecedência de 24 horas a fim de homogeneizar a amostra, adicionando água destilada até verificar a possibilidade de formação de torrões e atingir visualmente uma umidade em torno de 10%. Após completa umidificação, a amostra deve ser selada em um saco plástico e deixada em repouso por 24 horas para obter uma umidificação homogênea. No dia seguinte, após a etapa de umidificação, uma parcela do solo deve ser colocada em um cilindro padronizado (10 cm de diâmetro, 12,73 cm de altura,  $1000 \text{ cm}^3$  de volume), de modo que a parcela compactada ocupe aproximadamente um terço da altura do cilindro. Em seguida, aplicam-se 26 golpes uniformemente distribuídos sobre a superfície da primeira camada. Após a compactação de cada camada, faz-se ranhuras em sua superfície para melhorar a aderência entre elas. Esse processo deve ser repetido mais duas vezes até obter três camadas.

Após compactar a última camada, deve-se remover o anel complementar, a fim de verificar se a altura alcançada pelo corpo de prova foi ou não ligeiramente superior à do cilindro, possibilitado pelo uso do anel. Em caso positivo, o excedente deverá ser raspado para acertar o volume do molde cilíndrico.

Posteriormente, o conjunto cilindro e solo úmido compactado deve ser levado à balança para determinação de sua massa. Deve-se retirar a amostra do molde com auxílio de um macaco hidráulico, e uma pequena porção deverá ser coletada para a determinação da umidade, calculada conforme a Equação 15, sendo a parcela restante unida à amostra inicial:

$$W (\%) = \frac{(P_u + t) - (P_s + t)}{P_s + t} \cdot 100 \quad (15)$$

Em que:

$W$  = Umidade (%);

$P_u$  = Peso úmido (g);

$t$  = Tara da cápsula (g);

$P_s$  = Peso seco (g).

Em seguida, adiciona-se mais uma porção de água destilada à amostra inicial, homogeneizando-a completamente. Esse procedimento deve ser repetido até obter cinco pontos. As cápsulas, contendo uma pequena porção do solo, devem ser levadas à balança para determinação de sua massa e, em seguida, à estufa por 24 horas para a determinação do peso seco.

Para as três cápsulas de cada corpo de prova, calcula-se a média da umidade. Esses valores, juntamente com o peso específico úmido, são utilizados para calcular o peso específico seco, conforme a Equação 16:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{w}{100}} \quad (16)$$

Em que:

$\gamma_d$  = Peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_s$  = Peso específico úmido (g/cm<sup>3</sup>);

W = Umidade (%).

Com todos os dados obtidos, elabora-se a curva de compactação, que representa graficamente o peso específico seco em função da umidade. A curva define um peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d\text{máx}}$ ), correspondente a uma umidade ótima ( $W_{\text{ótima}}$ ). De modo geral, a curva assume uma forma que se assemelha a uma parábola, com a concavidade voltada para baixo. Nessa configuração, a área anterior ao vértice teórico é denominada "ramo seco", enquanto a região posterior ao vértice é identificada como "ramo úmido".

Os ensaios de compactação (Proctor) fornecem os parâmetros de referência de engenharia — em especial o peso específico seco máximo ( $\gamma_{d\text{máx}}$ ) e a umidade ótima ( $W_{\text{ótima}}$ ) — que são empregados em duas frentes analíticas no presente trabalho. Primeiramente, os valores obtidos permitem calcular grandezas derivadas relevantes para a caracterização hidráulica do perfil compactado (densidade aparente e porosidade associada ao estado de compactação), as quais subsidiam a interpretação da permeabilidade medida em ensaios de laboratório e a especificação de condições de execução da camada de cobertura (ABNT, 2016).

Em segundo lugar,  $\gamma_{d\text{máx}}$ ,  $W_{\text{ótima}}$  e as frações granulométricas (areia, silte e argila) são usados como entradas em um modelo preditivo do tipo *neural network* (redes neurais) desenvolvido para estimar a condutividade hidráulica saturada  $K_{\text{sat}}$  nas condições de campo representadas. Esse procedimento adota as propriedades índice

(incluindo  $\gamma_{d\text{máx}}$  e composição textural) como variáveis preditoras porque a densidade seca influencia diretamente a porosidade efetiva e a conectividade dos vazios, parâmetros que controlam  $K_{\text{sat}}$ . As estimativas resultantes da rede neural são posteriormente comparadas e validadas com os ensaios diretos de permeabilidade realizados em laboratório, servindo como entradas alternativas ou complementares para as simulações numéricas (WAISZICK; LIMA, 2020).

As estimativas de  $K_{\text{sat}}$  — quer obtidas experimentalmente, quer previstas pela rede neural — são convertidas em parâmetros hidráulicos utilizáveis em HYDRUS-1D (por exemplo,  $K_s$  e  $\theta_s$ , juntamente com parâmetros van Genuchten calibrados a partir de CCAS) e empregadas nas simulações de infiltração e percolação. Adicionalmente, os cenários de simulação consideram variações de compactação (por exemplo, perfis compactados em  $\gamma_d$  próximos a  $\gamma_{d\text{máx}}$  versus perfis menos compactados) para analisar sensibilidade do fluxo vertical à energia de compactação e à textura do material. Esse encadeamento (ensaio  $\rightarrow$  predição  $\rightarrow$  validação  $\rightarrow$  modelagem) assegura coerência entre os dados de campo, as estimativas empíricas e as projeções numéricas utilizadas para comparar coberturas convencionais e evapotranspirativas (ŠIMŮNEK et al., 2013; ABNT, 2016).

### 3.2.5 Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade é uma constante que expressa a facilidade com que um fluxo de água penetra em um meio com determinada porosidade. A compreensão desse coeficiente é essencial, uma vez que ele é utilizado para estimar a vazão que se infiltrará através do maciço. O conceito de permeabilidade consiste na propriedade em que determinado solo possui em permitir o escoamento de água através de seus perfis, e é calculada através de ensaios *in situ* ou laboratoriais (STALTER et al, 2017).

O ensaio de permeabilidade teve por objetivo determinar a condutividade hidráulica representativa do material de cobertura, seguindo procedimentos de laboratório padronizados e as rotinas do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UNISINOS. Os corpos de prova foram moldados a partir do lote homogeneizado coletado em campo e compactados de modo a reproduzir, sempre que aplicável, a condição construtiva prevista: a compactação foi realizada próximo ao peso específico seco máximo ( $\gamma_{d\text{máx}}$ ) e à umidade ótima ( $W_{\text{ótima}}$ ) obtidos no ensaio Proctor, com

realização também de corpos de prova em condição menos densificada para análise de sensibilidade.

A seleção do tipo de ensaio (carga constante — *constant-head* — ou queda de carga — *falling-head*) foi condicionada pela textura do material: amostras com predominância de fração grossa (arenosa) foram ensaiadas preferencialmente em regime de carga constante, enquanto materiais mais finos (silte/argila) foram avaliados em carga variável, conforme orientação prática e normativa (ABNT, 2021; STALTER *et al.*, 2017). Em todos os casos os moldes e dimensões seguiram os procedimentos do equipamento de permeâmetro disponível no LMS, e a instalação e vedação foram verificadas antes do início do ensaio para evitar vazamentos e leituras espúrias.

Foram executadas replicatas para quantificar a variabilidade experimental e permitir tratamento estatístico dos resultados: adotou-se, como padrão, dez (10) determinações por condição de compactação e por material testado, o que possibilitou o cálculo de médias, desvios-padrão e coeficientes de variação e a identificação de valores atípicos mediante critério documentado. Os dados brutos e as estatísticas resumo foram arquivados e serão apresentados na tabela de resultados, permitindo transparência na avaliação de incerteza e suportando a validação das previsões por modelos pedotransferenciais.

Todos os ensaios realizados referiram-se à condutividade hidráulica em condição saturada ( $K_{sat}$ ). A saturação prévia dos corpos de prova foi obtida por imersão combinada com desaireação a vácuo e purga com água destilada até observação de fluxo contínuo sem degaseificação perceptível; quando necessário, aplicou-se purga adicional ou leve pressão de pré-saturação conforme capacidade do equipamento. A condição de saturação foi confirmada por observação visual do efluente (ausência de bolhas) e pelo cálculo do grau de saturação a partir das massas úmida e seca e da porosidade estimada; admitiu-se grau de saturação  $\geq 0,98$  como critério de aceitação para registro de  $K_{sat}$ , e em ensaios em carga constante exigiu-se estabilização do fluxo (variação inferior a um limite percentual pré-definido) antes da tomada de leituras.

O processamento dos resultados baseou-se nas equações clássicas de Darcy (regime estacionário para *constant-head* e equação exponencial para *falling-head*) e incluiu correções geométricas e de temperatura quando aplicáveis. As medições

consolidadas de  $K_{sat}$  foram utilizadas tanto para comparação direta entre materiais (CRVR versus Esteio) quanto como insumo para calibração de pedotransferenciais e como parâmetro de entrada em simulações numéricas (HYDRUS-1D), além de serem confrontadas com as estimativas obtidas por redes neurais e outras rotinas preditivas empregadas neste trabalho. Procedimentos de exclusão de valores foram adotados somente mediante evidência de erro experimental (por exemplo, presença persistente de bolhas, vazamentos detectados ou instabilidade do equipamento), registrando-se sempre a justificativa técnica para a exclusão (ABNT, 2021; STALTER *et al.*, 2017; ŠIMŮNEK *et al.*, 2013).

#### 3.2.5.1 Ensaio de Permeâmetro de Carga Variável

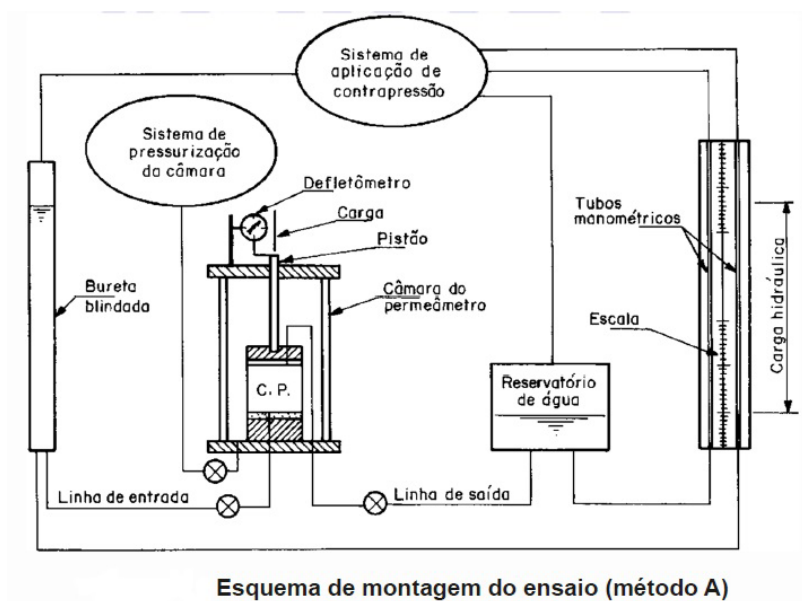
O ensaio de permeâmetro de carga variável é regido pela NBR 14545 (ABNT, 2021), o qual segundo STALTER *et al* (2017), é recomendado para solos argilosos (não granulares) e corpos de prova cujos coeficiente de permeabilidade sejam inferiores a  $10^{-3}$  cm/s, uma vez que é um dos aparatos mais precisos para a determinação de baixos índices de coeficiente de permeabilidade.

As amostras são inseridas em um tubo de dimensão superior ao diâmetro do corpo de prova, de modo que o espaço entre as paredes do aparelho e da amostra é vedado para fins de cálculo da carga hidráulica em regime de escoamento linear.

O esquema de montagem do permeâmetro de carga variável é disposto por meio da Figura 10.



Figura 10 - Esquema de montagem do ensaio de permeâmetro de carga variável



Fonte: ABNT, 2021.

Os resultados deste ensaio são expressos por meio das seguintes equações (ABNT, 2021).

$$M_s = \left( \frac{M}{100+W} \right) \cdot 100 \quad (17)$$

Em que:

$M_s$  = Massa seca dos sólidos do corpo de prova (g);

$M$  = Massa do corpo de prova (g);

$W$  = Teor de Umidade Inicial (%).

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_{cp}} \quad (18)$$

Em que:

$\rho_d$  = Massa específica aparente seca inicial do corpo de prova (g/cm³);

$V_{cp}$  = Volume inicial do corpo de prova determinado a partir de suas dimensões iniciais (cm³).

$$A_f = \left( \frac{V_f}{H_f} \right) \quad (19)$$

Em que:

$A_f$  = Área do corpo de prova após o adensamento (cm<sup>2</sup>);

$V_f$  = Volume do corpo de prova após o adensamento (cm<sup>3</sup>);

$H_f$  = Altura do corpo de prova após o adensamento (cm).

$$k = \frac{a \cdot H}{A \cdot \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (20)$$

Em que:

$k$  = Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$\Delta t$  = Diferença entre os instantes  $t_2$  e  $t_1$  (s);

$h_1$  = Carga Hidráulica no instante  $t_1$  (s);

$h_2$  = Carga Hidráulica no instante  $t_2$  (s);

$a$  = Área interna da bureta, somada a área do tubo manométrico (cm<sup>2</sup>);

$H$  = Altura do corpo de prova (cm);

$A$  = Área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>).

$$V_v = V_f \cdot \left( \frac{e}{1+e} \right) \quad (21)$$

Em que:

$V_v$  = Volume de vazios do corpo de prova (cm<sup>3</sup>);

$V$  = Volume do corpo de prova após o adensamento (cm<sup>3</sup>);

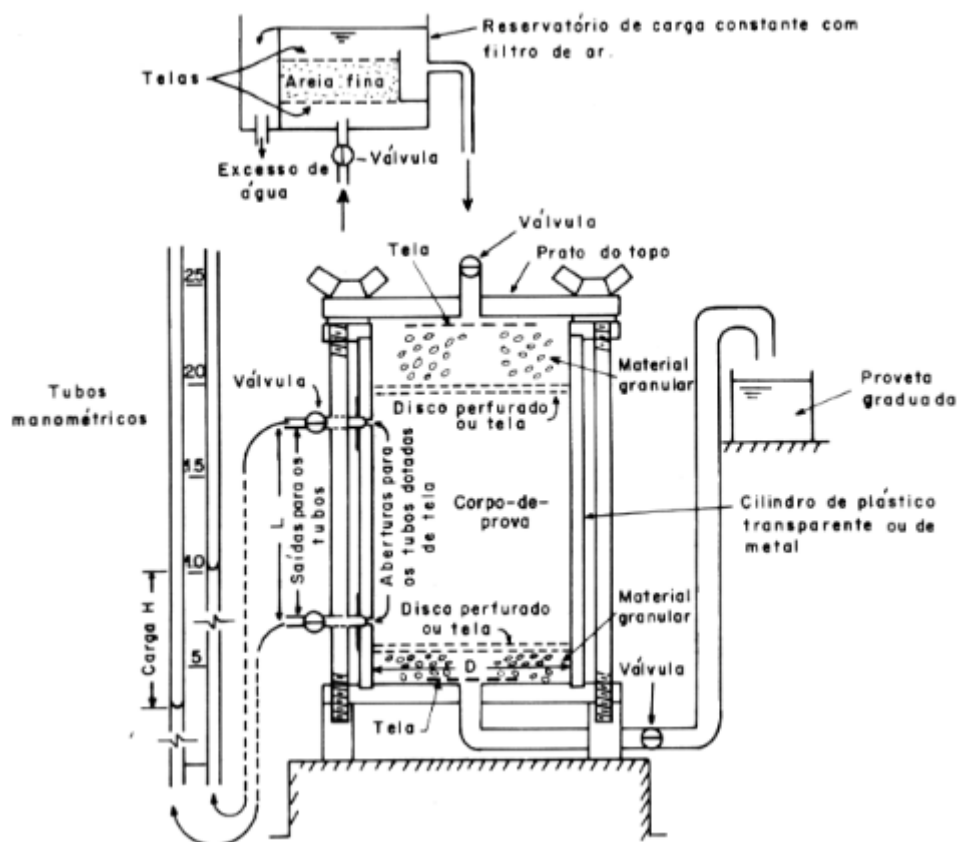
$e$  = Índice de vazios após o adensamento.

### 3.2.5.2 Ensaio de Permeâmetro de Carga Constante

O ensaio de permeâmetro de carga constante é regido pela NBR 13292 (ABNT, 2021), o qual segundo STALTER *et al* (2017), é recomendado para solos arenosos (granulares) e corpos de prova cujos coeficiente de permeabilidade sejam superiores a 10<sup>-3</sup> cm/s.

O esquema de montagem do permeâmetro de carga constante foi disposto por meio da Figura 11.

Figura 11 - Esquema de montagem do ensaio de permeâmetro de carga constante



Fonte: ABNT, 2021.

Os resultados deste ensaio foram expressos por meio das seguintes equações (ABNT, 2021).

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot T} \quad (22)$$

Em que:

$k$  = Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$Q$  = Vazão da água através da amostra (cm<sup>3</sup>/s);

$h$  = Altura da carga hidráulica/coluna d'água, constante durante o ensaio (cm);

$A$  = Área da secção do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);

$L$  = Altura do corpo de prova (cm);

$t$  = Tempo decorrido durante o ensaio (s)

$$i = \frac{h}{L} \quad (23)$$

Em que:

$i$  = Perda de carga ao longo da amostra (gradiente hidráulico, adimensional).

Ao calcular o coeficiente de permeabilidade durante o ensaio, foi essencial realizar o cálculo à temperatura de 20°C, utilizando a seguinte relação:

$$k_{20} = k_t \cdot \frac{\eta_t}{\eta_{20}} \quad (24)$$

Em que:

$k_{20}$  = Coeficiente de permeabilidade a 20° C;

$k_t$  = Coeficiente de permeabilidade a temperatura T em que é realizado o ensaio;

$\eta_{20}$  = Viscosidade do fluido na temperatura de 20° C, que corresponde a 0,01005;

$\eta_t$  = Viscosidade do fluido na temperatura T.

$$\gamma_s = \frac{(M_1 - M_2) \cdot 100}{A(h_1 - h_2)(100 + w)} \quad (25)$$

Em que:

$\gamma_s$  = massa específica aparente seca (g/cm³);

(M1 - M2) ou M = massa do corpo de prova (g);

A = área da seção transversal do corpo de prova (cm²);

(h1 - h2) ou h = altura do corpo de prova (cm);

w = teor de umidade do corpo de prova (%).

### 3.2.6 Sucção

A metodologia para a obtenção da curva característica água-sucção (CCAS) neste trabalho combinou um ponto experimental obtido por ensaio de papel-filtro com uma construção numérica da curva por meio do software HYDRUS-1D. Em laboratório realizou-se um ensaio de equilíbrio com papel-filtro Whatman nº 42 para uma amostra representativa do material, obtendo-se o teor de umidade do papel após equilíbrio com o solo. Esse ponto experimental foi convertido em sucção por meio das equações de calibração propostas por Chandler et al. (1992), adotadas por diversos autores para o método do papel-filtro (MENDES; MARINHO, 2020; SOUZA et al., 2014). Para teores de umidade do papel > 47% e ≤ 47% utilizaram-se, respectivamente, as expressões empíricas de Chandler:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \cdot \log w)} \quad (26)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 w)} \quad (27)$$

Em que:

$w$  = teor de umidade do papel filtro (%).

Esclarece-se que, experimentalmente, foi obtido um ponto de equilíbrio da CCAS por amostra, resultante do ensaio com papel-filtro. O procedimento laboratorial envolveu acondicionamento e contato entre amostra de solo e o papel-filtro até estabilidade de massa do papel; o teor de umidade do papel foi então medido gravimetricamente e convertido em sucção pelas equações acima (MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

Em laboratório realizou-se um ensaio de equilíbrio com papel-filtro Whatman nº 42 para uma amostra representativa do material, obtendo-se o teor de umidade do papel após equilíbrio com o solo; esse ponto experimental foi convertido em sucção por meio das equações de calibração propostas por Chandler *et al.* (1992). Foram realizadas 3 repetições, com tempo de equilíbrio adotado entre 3 a 7 dias ou até estabilização de massa em duas leituras consecutivas; os valores reportados correspondem à média aritmética das réplicas, acompanhada do desvio-padrão obtido (CHANDLER *et al.*, 1992; MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

A CCAS completa foi construída de forma “virtual” por modelagem numérica em HYDRUS-1D, utilizando como pontos de partida (I) os parâmetros obtidos em ensaio(s) laboratoriais (incluindo o ponto de sucção experimental convertido por Chandler), (II) as curvas de retenção ajustadas por função paramétrica (van Genuchten) estimadas por pedotransferências e/ou ajuste numérico, e (III) a parametrização de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) proveniente dos ensaios de permeabilidade e de predições (rede neural/pedotransferenciais). Dessa forma, a única medição laboratorial direta de sucção foi usada para ancorar e validar localmente o ajuste numérico da CCAS (SOUZA *et al.*, 2014; MENDES; MARINHO, 2020; ŠIMŮNEK *et al.*, 2013).

O procedimento de integração entre laboratório e modelagem seguiu os passos a seguir: (1) obtenção do ponto experimental de sucção por método de papel-filtro e conversão pelo ajuste de Chandler (Eq. 26–27); (2) determinação de  $\theta_s$  (teor de saturação) e de  $K_{sat}$  em ensaios complementares; (3) estimativa inicial dos parâmetros van Genuchten ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ ) por pedotransferência (Rosetta ou equações empíricas) ou

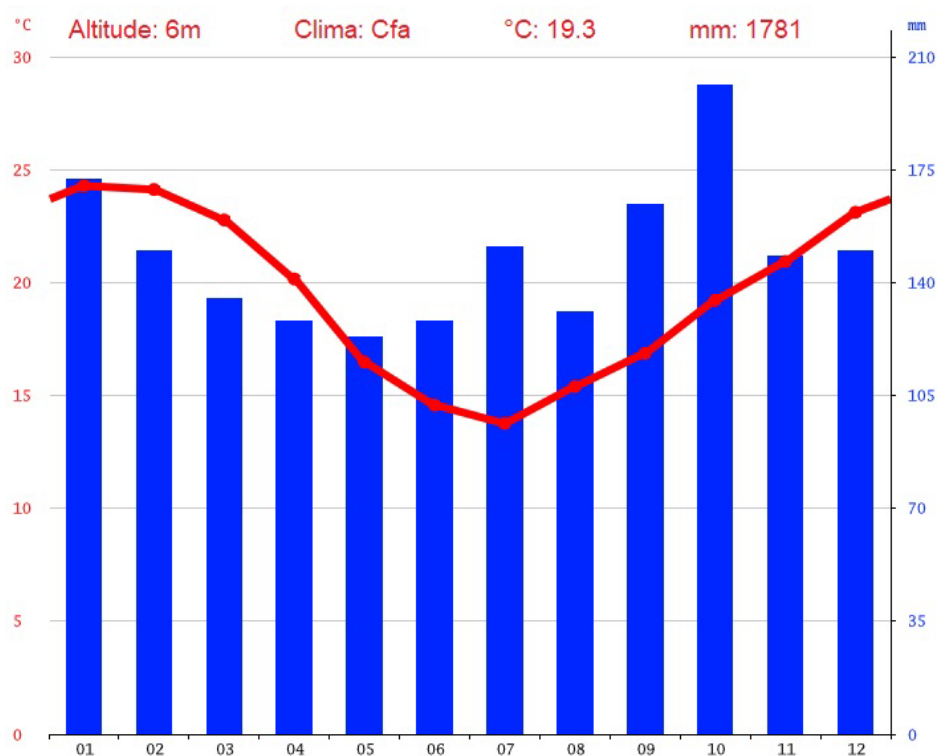
por ajuste direto a dados experimentais disponíveis; (4) calibração numérica em HYDRUS-1D, variando iterativamente os parâmetros constitutivos até que a curva modelada passasse pela região do ponto experimental e as previsões de fluxo/infiltração reproduzissem observações de campo ou de lisímetro quando houveram; e (5) validação cruzada, quando possível, confrontando a CCAS modelada com qualquer outro dado de retenção (por exemplo, dados de centrífuga, placas de pressão) ou com o comportamento hidrodinâmico obtido em simulações e medições (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013; MENDES; MARINHO, 2020).

Ressalta-se que a opção por construir a CCAS majoritariamente por modelagem — ancorada em um ponto experimental — responde à limitação prática de execução integral de curvas laboratoriais completas (que exigem vários níveis de sucção e longos tempos de equilíbrio). No entanto, a existência do ponto experimental torna a modelagem mais confiável do que uma CCAS puramente estimada por pedotransferência, pois fornece uma referência de campo que orienta o ajuste e reduz incertezas. Recomenda-se indicar no relatório final o número de réplicas do ponto experimental e o tratamento estatístico adotado (média, desvio-padrão), além de documentar os procedimentos de calibração numérica (métricas de erro e sensibilidade) (SOUZA *et al.*, 2014; MENDES; MARINHO, 2020).

### 3.3 ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO CLIMA

O conhecimento de características climáticas da localidade foi essencial para a realização do estudo, de modo que influenciou diretamente no desempenho das camadas de cobertura final de aterros sanitários. No tocante à precipitação, o banco de dados meteorológicos permitiu analisar o mês comumente o mais seco do ano e o mês com maior valor de precipitação em mm, de modo que a taxa de infiltração de água que chegará à camada de cobertura final será maior em relação aos outros meses. A Figura 12 ilustra as temperaturas e precipitações médias de 1991 a 2020 em São Leopoldo, segundo o INMET, um dos órgãos pesquisados.

Figura 12 - Temperatura e Precipitação Média de São Leopoldo/RS.



Fonte: INMET, 2023.

Os dados meteorológicos utilizados neste trabalho foram obtidos nas bases oficiais do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), ANA (Agência Nacional de Águas) e EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (período de referência 1991–2020) e organizados em planilhas eletrônicas para posterior tratamento e análise. As séries diárias de precipitação e temperatura foram adotadas como unidade básica de trabalho, pois permitem tanto a construção de climatologias quanto a geração de séries para simulações transientes; os identificadores das estações empregadas constam no Quadro 2, juntamente com as coordenadas georreferenciadas.

Quadro 2 - Propriedades das Estações Meteorológicas

Órgão Meteorológico	Estações Meteorológicas	Coordenadas Latitude/Longitude
EMBRAPA	TRMM.13766	29.749° S; 51.16° W
ANA	2951126	29.62° S; 51.157° W
	87382000	29.758° S; 51.148° W
INMET	[D7672] CEMADEN	29.79° S; 51.132° W

	[D3321] ARROIO DO MANTEIGA – RS (CEMADEN)	29.727° S; 51.184° W
--	--	----------------------

Fonte: EMBRAPA (2024); ANA (2024); INMET (2024).

O tratamento inicial consistiu em um procedimento de controle de qualidade (QC) que incluiu: verificação de duplicatas e de datas/hora inconsistentes, identificação e marcação de valores impossíveis ou manifestamente errôneos, remoção ou sinalização de outliers isolados e catalogação de lacunas temporais. Após o QC, procedeu-se à seleção das séries candidatas a preditoras com base em sobreposição temporal e correlação preliminar com a série alvo; séries com sobreposição insuficiente ou comportamento estatístico discrepante foram descartadas como preditoras.

O preenchimento de lacunas foi realizado por modelos de regressão linear múltipla (MLR). Para cada série com falhas selecionou-se um conjunto de estações previsoras correlacionadas e foi ajustado um modelo MLR para prever os valores ausentes. A seleção dos preditores considerou coeficientes de correlação e disponibilidade de dados coincidentes; os modelos foram calibrados em janelas históricas e validados em partições independentes (amostragem treino/teste) para avaliar viés e erro de predição. Os ajustes foram avaliados por métricas padrão ( $R^2$ , RMSE) e por inspeção gráfica dos resíduos, e somente as imputações originadas por modelos com desempenho compatível com a variabilidade observada foram incorporadas à série final.

Como procedimento complementar, adotaram-se métodos alternativos de preenchimento (por exemplo, modelos paramétricos e interpolação espacial quando apropriado) e análises de sensibilidade (ANOVA e comparações entre séries) para verificar a robustez das imputações e identificar possíveis discrepâncias entre estações. Esses testes documentaram incertezas e subsidiaram decisões sobre inclusão ou exclusão de determinadas séries na composição do conjunto final de trabalho.

A série completa diária resultante do processo de QC e imputação (1991–2020) foi agregada em duas saídas principais para uso nas simulações: (I) climatologia diária média, obtida pela média aritmética para cada dia do ano ao longo das 30 anos (ciclo anual de 365 dias), e (II) normais mensais (média mensal 1991–2020) e somas



mensais climatológicas, utilizadas para identificar os meses médios mais secos e mais chuvosos. As séries geradas foram exportadas em formatos compatíveis com as entradas requeridas pelo HYDRUS-1D (sequências diárias e séries mensais) e documentadas em planilhas anexas.

Todo o fluxo de trabalho (planilhas de dados, códigos de imputação e scripts de agregação) foi registrado de modo a permitir reprodução dos procedimentos; recomenda-se incluir em anexo as planilhas usadas, os parâmetros dos modelos ajustados e o quadro com identificação e coordenadas das estações, para que terceiros possam replicar integralmente a construção das séries. As figuras que ilustram as normais mensais e a climatologia diária (gráficos de barras e linha) foram geradas a partir da série 1991–2020 e estão indicadas entre as ilustrações do capítulo de resultados.

### 3.4 MODELAGEM DE INFILTRAÇÃO

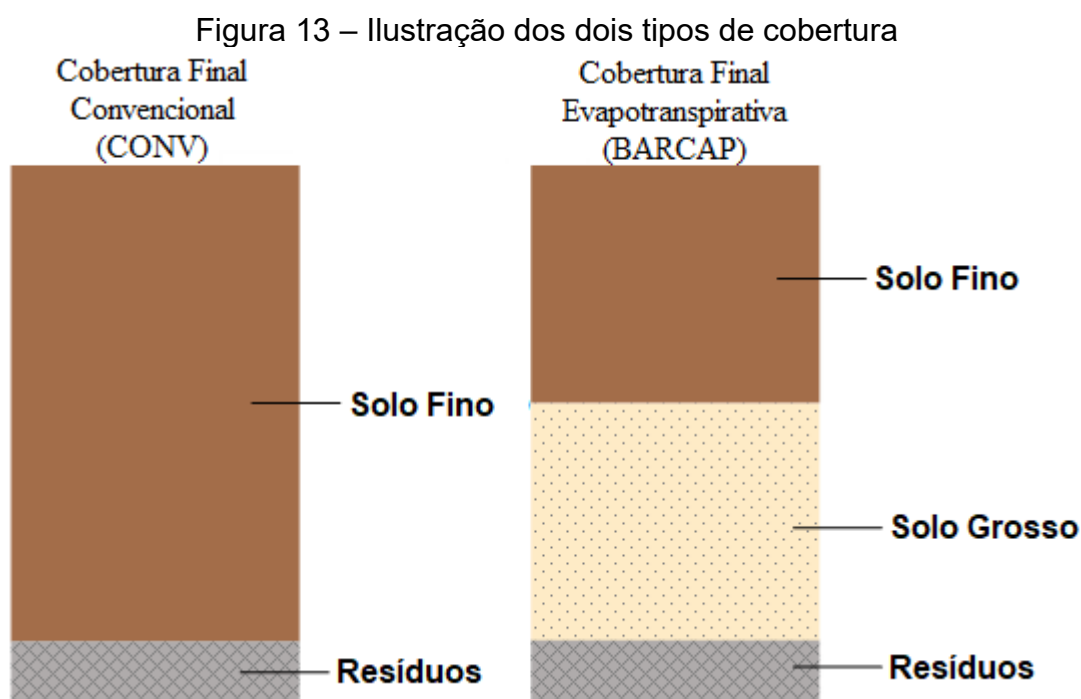
A modelagem numérica do fluxo de água em perfis de cobertura foi conduzida com o software HYDRUS-1D (versão 4.17), que resolve numericamente a equação de Richards para meios variavelmente saturados e permite o acoplamento com rotinas de evaporação/transpiração e transporte de solutos (ŠIMŮNEK et al., 2013). As simulações tiveram por objetivo comparar o comportamento hidráulico de duas soluções de cobertura (convencional e alternativa com contraste textural) mediante métricas como percolação acumulada, fluxo de percolação de pico e evolução temporal dos perfis de umidade.

Os dados de entrada fundamentais para o modelo foram obtidos experimentalmente e por estimativas pedotransferenciais. Em laboratório determinaram-se: curva de retenção hídrica (ponto experimental por papel-filtro convertido por Chandler et al., 1992 e, quando possível, outros pontos de retenção), curva de compactação ( $\gamma_{d\max}$  e  $W_{ótima}$ ), condutividade hidráulica saturada  $K_{sat}$  (ensaios em permeâmetro) e granulometria (frações areia, silte e argila). A partir desses resultados obtiveram-se ou ajustaram-se os parâmetros da função van Genuchten ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ ) e a função de condutividade não saturada (van Genuchten–Mualem ou alternativa), que constaram como as funções constitutivas  $\theta(\psi)$  e  $K(\theta)$  fornecidas ao HYDRUS-1D. Em particular, a CCAS utilizada no modelo foi

construída combinando os pontos experimentais e ajuste paramétrico por van Genuchten, de modo a ancorar a curva modelada em medições de laboratório.

Foram modelados dois cenários principais, ambos com 50 cm de espessura total da cobertura: (i) cobertura convencional, perfil monolítico de 50 cm composto pelo material coletado na CRVR (parâmetros derivados da granulometria e dos ensaios de compactação); e (ii) cobertura alternativa (contraste textural), composta por duas camadas em contato direto — camada superior de 25 cm (material argiloso/fino) e camada inferior de 25 cm (material granular/grosso) — visando representar uma cobertura do tipo evapotranspirativa/barreira capilar em que o contraste de propriedades hidráulicas entre camadas controla o armazenamento e o eventual percolado. As duas camadas foram parametrizadas segundo as características físicas medidas nas amostras de São Leopoldo e em Esteio, respectivamente.

A Figura 13 ilustra os dois tipos de cobertura, e suas cotas de espessuras.



Fonte: Autor, 2025.

As condições de contorno superficiais corresponderam à entrada atmosférica (precipitação observada ou séries climatológicas agregadas 1991–2020) e ao balanço de perdas por evaporação/transpiração. Para representar a perda superficial foram usados dados de potencial de evapotranspiração (PET) calculados a partir das normais climatológicas e aplicados no modelo por rotina de

evaporação/evapotranspiração do HYDRUS (opções de corte por radiação/potencial e partição entre evaporação superficial e transpiração). Na base do perfil adotou-se condição de fluxo livre/Neumann com nível freático distante (ou fluxo de drenagem zero), conforme sondagens locais ou presunção conservadora; em simulações de sensibilidade foram também testadas condições de base com nível freático mais elevado para avaliar o efeito de lençol próximo.

Na discretização vertical empregou-se malha não uniforme com refinamento próximo à superfície e à interface entre camadas (passo espacial típico entre 0,01 e 0,02 m nas zonas de interesse), garantindo resolução suficiente para capturar gradientes de umidade rápidos; o esquema temporal adotou passo máximo diário para simulações de longo termo e subdiário (horário) quando necessário para captar eventos extremos. O solucionador numérico foi o padrão do HYDRUS-1D (elementos finitos implícitos), com critérios de convergência e tolerâncias ajustadas para estabilidade (redução residual e limite máximo de iterações) e monitoramento de massa hídrica para evitar perdas numéricas (ŠIMŮNEK et al., 2013).

Para garantir avaliação robusta de incertezas, foram executados experimentos de sensibilidade e cenários: variação de  $K_{sat}$  ( $\pm 20\%$ ), variação de  $\gamma_d$  em torno de  $\gamma_{dmax}$  ( $\pm 10-15\%$ ), espessura das camadas ( $\pm 25\%$ ) e variações de PET/precipitação (cenários secos e úmidos). Foram também realizados testes de sensibilidade à parametrização da curva van Genuchten (perturbação de  $\alpha$  e  $n$ ) e ao grau de estabelecimento vegetal (redução da transpiração). Em cada cenário registraram-se as saídas temporais de fluxo na base do perfil ( $L \cdot T^{-1}$ ), o conteúdo volumétrico de água ao longo do perfil e a evolução do grau de saturação nas interfaces para avaliar ocorrência de perched water (água pendente) típico de barreiras capilares.

As métricas de comparação entre cenários incluíram: percolação acumulada durante o ano de simulação ( $mm \cdot ano^{-1}$ ); pico de fluxo de percolação em eventos extremos ( $mm \cdot h^{-1}$ ); tempo até saturação da interface e extensão vertical da zona saturada; e tempo de recuperação da umidade após evento de chuva. Os resultados numéricos foram exportados em arquivos CSV e plotados para análise comparativa; as discrepâncias entre simulação e pontos experimentais (por ex., ponto de sucção do papel-filtro) foram utilizadas para recalibração iterativa dos parâmetros constitutivos quando justificadas por critérios de ajuste.

Todas as configurações de entrada (versão do HYDRUS-1D 4.17, funções  $\theta(\psi)/K(\theta)$ , condições de contorno, malha, parâmetros de solver) foram documentadas

em planilhas e arquivos de projeto HYDRUS-1D para permitir reprodução. As simulações foram executadas em conjunto de cenários representativos e acompanhadas de análise de sensibilidade para apoiar recomendações de projeto sobre a escolha entre cobertura convencional e cobertura com contraste textural (HYDRUS-1D v.4.17; ŠIMŮNEK et al., 2013).

As condições iniciais das simulações foram definidas em termos do teor volumétrico de água no perfil. Sempre que disponível, adotou-se o teor medido *in situ* imediatamente anterior ao início da simulação; na ausência desse dado, utilizou-se o teor correspondente à umidade ótima de compactação para representar o estado “*as-built*”. Em simulações de sensibilidade também foram testados estados iniciais alternativos (por exemplo, teor natural médio e teor correspondente a compactação reduzida) para avaliar a influência do estado inicial sobre a resposta transiente.

Ressalta-se que a condutividade hidráulica usada no modelo é dependente do estado hídrico do solo (função não-linear de teor/sucção): o parâmetro  $K_{sat}$  foi informado a partir dos ensaios laboratoriais e a curva de condutividade não saturada foi definida pela relação constitutiva empregada (van Genuchten–Mualem ou equivalente). Sempre que necessário o teor inicial foi convertido internamente pelo modelo para a variável de potencial exigida pela rotina de inicialização, e os valores adotados de teor de umidade inicial e  $K_{sat}$  são reportados na seção de resultados. A versão 4.17 do modelo HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013), foi utilizada para resolver numericamente a equação do escoamento unidimensional da água em meios porosos de saturação variável (Equação 28).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (28)$$

Em que:

$h$  = Potencial matricial (kPa);

$t$  = Tempo (T);

$z$  = Profundidade (L);

$K$  = Condutividade hidráulica não saturada do solo (L/T).

Na simulação, foi utilizado o modelo hidráulico proposto por Van Genuchten (1980), em que as curvas de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica são expressas pelas equações 29 e 30.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (ah)^n)^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (29)$$

$$K(\theta) = K_{sat} \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1 - \frac{1}{n}}} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \right]^2 \quad (30)$$

Em que:

$\theta_r$  = Umidade volumétrica residual (%);

$\theta_s$  = Umidade volumétrica saturada (%);

$\alpha$  = Parâmetro de escala associado à posição da transição da curva (1/cm);

$n$  = Parâmetro de ajuste da curva (%);

$K_{sat}$  = Condutividade hidráulica saturada (cm/d).

Os valores de  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$  e  $n$  são valores de entrada necessários para a modelagem HYDRUS-1D, e foram obtidos por meio da utilização de funções de pedotransferência propostas por Barros *et al.* (2013), enquanto os valores de  $K_{sat}$  são propostos por Cosby *et al.* (1984). Os valores destes parâmetros foram obtidos via modelagem por meio das Equações 31 a 35.

$$\theta_r = 0,13 - 0,15A + 0,36G \quad (31)$$

$$\theta_s = 0,55 - 0,23A - 0,12G \quad (32)$$

$$\alpha = 10^{0,93 - 1,60G} \quad (33)$$

$$n = 1,53 + 0,33A - 0,39G \quad (34)$$

$$K_{sat} = 25,94 + 10^{0,0126A - 0,0064G - 0,6} \quad (35)$$

As Equações 31 a 35 levam em consideração a contribuição de cada componente do solo, em que:

$A$  = Fração de Areia (kg/kg);

$G$  = Fração de Argila (kg/kg).

Para gerar os parâmetros hidráulicos por pedotransferência, foi utilizada a rotina Rosetta-Lite integrada ao HYDRUS-1D. A entrada para o Rosetta foi fornecida em termos de percentuais de areia, silte e argila, expressos em massa (%) e somando 100%, conforme a convenção da USDA (escolhido por ser mais semelhante à ABNT quando comparado à ASTM). Quando disponível, a densidade aparente do solo (g/cm<sup>3</sup>) e pontos de retenção ( $\theta@33$  kPa) também foram informados para aumentar a

fidelidade da estimativa. Os parâmetros resultantes ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$  e  $K_{sat}$ ) foram importados para o HYDRUS como funções constitutivas, constituindo-se nos principais parâmetros hidráulicos de entrada para cada solo.

As condições iniciais de umidade foram definidas em termos do teor volumétrico de água ( $\theta_{inicial}$ ). Sempre que disponível, adotou-se o teor medido in situ; na ausência de medida, utilizou-se o teor correspondente à umidade ótima de compactação. Para avaliar a sensibilidade ao estado inicial, foram simulados três cenários: (i) teor natural médio, (ii) teor correspondente à umidade ótima (condição “*as-built*”) e (iii) condição seca (redução de 20% relativa ao teor natural). Os valores numéricos adotados para cada material são apresentados na tabela de resultados do ensaio de permeabilidade, no valor descrito como “umidade”.

Dentre outros parâmetros calculados durante a modelagem da infiltração, destacam-se o potencial matricial ( $\psi$ ) disposto na Equação 36 e a altura crítica de coluna d’água no solo ( $h_{crit}$ ), disposta na Equação 37.

$$\psi = \frac{P}{\rho * g} \quad (36)$$

Em que:

$\psi$  = Potencial Matricial (carga hidrostática), expresso em metros de coluna d’água (mca) ou em kPa quando convertido para pressão;

$P$  = Pressão do Solo (Pa);

$\rho$  = Densidade da Água (Kg/m<sup>3</sup>);

$g$  = Gravidade (m/s<sup>2</sup>).

$$h_{crit} = \frac{[\ln(H_r)] \cdot R \cdot T}{M \cdot g} \quad (37)$$

Em que:

$h_{crit}$  = Altura crítica de coluna d'água (mca);

$H_r$  = Umidade relativa do ar (%);

$R$  = Constante universal dos Gases (8,314 J/mol\*K)

$T$  = Temperatura (K);

$M$  = Massa molar da água (0,018015 kg/mol);

$g$  = Aceleração gravitacional (9,81 m/s<sup>2</sup>).

O valor de  $h_{crit}$  representa a altura crítica de coluna d'água (mca) associada ao potencial termodinâmico correspondente a uma dada umidade relativa do ar ( $H_r$ ); trata-se de uma interpretação derivada da relação de equilíbrio entre vapor e líquido (forma prática de Kelvin). No presente trabalho,  $h_{crit}$  é usada apenas para avaliação teórica da possibilidade de condensação/capilaridade superficial.

Para as simulações hidrodinâmicas foram fornecidos como condições de entrada os parâmetros atmosféricos: precipitação, temperatura (máxima e mínima), radiação/insolação, velocidade do vento, umidade relativa e potencial de evapotranspiração (PET). Esses dados foram empregados para definir o limite superficial atmosférico (precipitação e taxa de perda por evaporação/transpiração) no HYDRUS-1D.

Foram definidos cenários de simulação representativos para avaliar a resposta transiente do perfil: cenário com precipitação correspondente ao mês climatologicamente mais seco e cenário com precipitação correspondente ao mês climatologicamente mais chuvoso, ambos obtidos a partir das normais mensais 1991–2020 (Fonte: EMBRAPA, ANA e INMET). As simulações transientes geraram séries temporais de fluxo no fundo do perfil e de teor de água ao longo do tempo; a fim de ilustrar o comportamento hidrodinâmico sob os cenários seco e úmido. As condições gerais de entrada no HYDRUS-1D são dadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Condições Gerais de Entrada no HYDRUS-1D.

Condições de Entrada	Valor
----------------------	-------

Tempo (mês)	1
Precipitação (mm)	Dada de acordo com a Equação 5 (Regressão Linear Múltipla), para cada dia da série histórica.
Evaporação (mm)	
Temperatura Máxima (°C)	
Temperatura Mínima (°C)	
Insolação (h)	
Umidade Relativa do Ar (%)	
Vento (km/dia)	
hCritA (mm)	Dada de acordo a Equação 37, para cada dia da série histórica.
Espessura das camadas (mm)	500

Fonte: Autor, 2025.

Entre as condições de contorno, foi considerado o parâmetro de variações diárias de dados meteorológicos durante o dia gerados automaticamente pelo HYDRUS-1D. Nenhuma absorção de água pela raiz vegetal foi considerada. Houve dependência de temperatura no cálculo dos parâmetros de perfis de solo. As condições de contorno são dadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Condições de Contorno no HYDRUS-1D

Condições de Contorno	Valor
Densidade Nodal	0,01
Quantidade Máxima de Iterações	10
Tipo de Dados Meteorológicos	Equação Penman–Monteith
Modelo de Porosidade Única	Van Genuchten–Mualem
Histereses	Sem Histereses
Lâmina d'Água Máxima Acima da Superfície (mm)	50
Ponto Fixo (mm)	50
Condição de Contorno Superior	Acúmulo de Água Superficial
Condição de Contorno Inferior	Drenagem Livre
Pontos de Observação	50mm, 250mm, 500mm
Condição de Entrada	Média mensal dos dados meteorológicos diários

Fonte: Autor, 2025.

A densidade nodal define a discretização da malha numérica, controlando o comprimento relativo dos elementos finitos. Trata-se de um número adimensional, que varia entre 0,01 e 100, especificado em pontos fixos para ajustar o refinamento local. Neste trabalho, foram aplicados pontos fixos com densidade nodal de 0,01 na superfície e na base do perfil para garantir a resolução, com um refinamento adicional (densidade mais alta) na interface entre as camadas do solo.



O método de Picard modificado, empregado pelo HYDRUS-1D para resolver a equação de Richards não linear, limita-se, por padrão, a 10 iterações em cada passo de tempo. Na prática, aumentar esse número costuma ser ineficaz: se o modelo não convergir em 10 passagens, é pouco provável que convirja em mais iterações. Nesses casos, o próprio programa reduz automaticamente o tamanho do passo de tempo, buscando a convergência de forma mais eficiente.

A dependência térmica foi considerada na forma de correção da viscosidade da água. Para isso, foi aplicado um fator de ajuste de temperatura para a condutividade hidráulica, conforme as rotinas do HYDRUS e práticas consolidadas de correção empírica para a variação de  $K_{sat}$  com a temperatura. A equação de Penman–Monteith foi empregada para estimar a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) a partir dos dados meteorológicos (temperatura, radiação/insolação, umidade relativa e vento). A  $ET_0$  foi usada no HYDRUS-1D para definir as perdas por evaporação superficial e transpiração (quando a componente de vegetação é considerada), aplicando as rotinas internas do programa para particionar a demanda atmosférica entre evaporação do solo e transpiração vegetal conforme a parametrização do dossel.

A “lâmina d’água máxima” corresponde à profundidade máxima de acúmulo superficial (ponding) que o modelo permite antes de equacionar escoamento superficial. Para as simulações adotou-se 50 mm como valor conservador representativo de acumulação local em superfícies de baixas declividades; esse valor foi testado em análise de sensibilidade ( $\pm 50\%$ ). O critério de seleção baseou-se na microtopografia típica das células e na necessidade de representar eventos de chuva intensa sem gerar runoff imediato. Caso exista informação topográfica local (drains, bermas), esse valor deve ser ajustado.

A condição de contorno inferior foi tratada como drenagem livre nas simulações padrão, sendo alterada para um nível freático fixo apenas em análises de sensibilidade. O parâmetro teórico  $h_{CritA}$  foi utilizado para análises complementares do potencial de condensação e ascensão capilar. Seus valores diários foram calculados conforme a literatura, mas não foram empregados como uma condição de contorno primária nas simulações.

Para a análise dos resultados, foram definidos três pontos fixos de observação em cada vertente (50, 250 e 500 mm). Esses pontos indicam profundidades onde a malha numérica foi obrigatoriamente refinada e onde as variáveis de saída, como

conteúdo de água e fluxo, foram registradas para a análise comparativa entre os cenários.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados de forma integrada os procedimentos laboratoriais de caracterização dos solos, a análise estatística dos parâmetros climáticos de São Leopoldo (1991–2020) e os resultados das simulações de infiltração realizadas no HYDRUS-1D. Busca-se demonstrar como cada conjunto de dados empíricos e meteorológicos alimentou a modelagem numérica e embasou as discussões sobre a performance das coberturas convencional e evapotranspirativa.

### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os ensaios laboratoriais foram conduzidos com o objetivo de obter os parâmetros índices e funcionais necessários à classificação dos materiais e à parametrização numérica (HYDRUS-1D). Nesta seção apresentam-se os procedimentos e resultados relativos aos Limites de Atterberg, à granulometria e à curva de compactação (valores de umidade ótima e densidade seca aparente máxima), que constituem a base para as etapas subsequentes de modelagem. Todos os ensaios índice foram executados em réplicas para avaliação da variabilidade experimental; adotou-se  $n = 10$  determinações por parâmetro e por material, conforme detalhado na Seção 3.2.

Os Limites de Atterberg (limite de liquidez — LL; limite de plasticidade — LP) foram determinados para caracterizar a consistência e a plasticidade dos materiais e serviram de suporte à classificação textural e à interpretação geotécnica; esses limites não constituem, por si só, medida da transição hidráulica entre regimes saturado e não saturado. Os procedimentos seguiram as normas pertinentes e as amostras foram preparadas conforme protocolo laboratorial.

A análise granulométrica (peneiramento e sedimentação) quantificou as frações de areia, silte e argila em percentagem de massa; esses percentuais foram convertidos para os separadores sand/silt/clay segundo a convenção USDA (necessária para as rotinas Rosetta-Lite utilizadas na pedotransferência), sendo apresentada também a classificação segundo SiBCS/EMBRAPA e as referências ABNT/ASTM quando aplicável. Observa-se que a granulometria permite inferir tendências relativas do tamanho de poros, mas a determinação direta da distribuição

de poros (porosimetria) não foi realizada; por isso não se faz afirmação sobre “poros críticos” sem técnicas específicas.

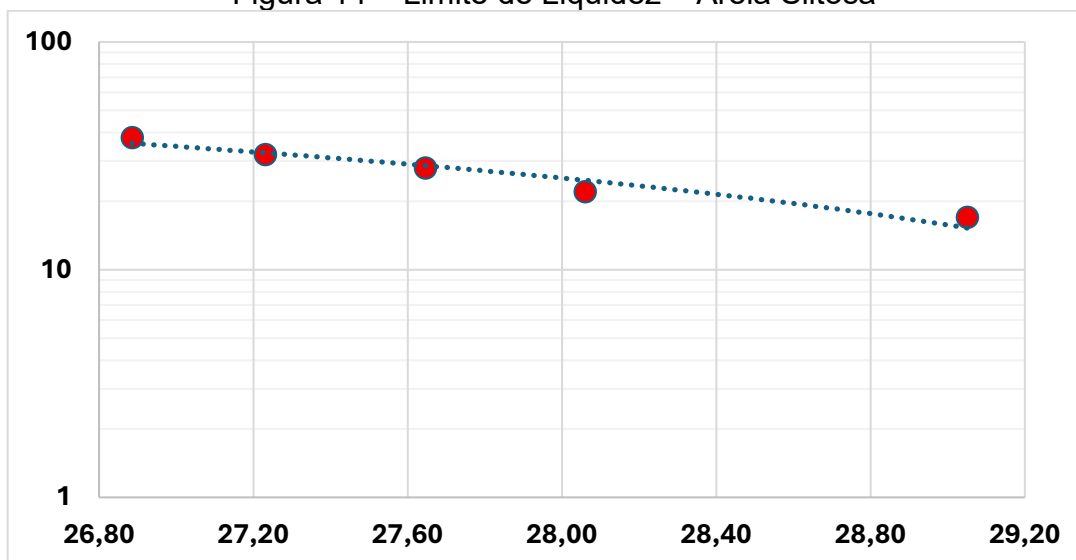
O ensaio de compactação (Proctor modificado) resultou na curva densidade aparente seca  $\times$  teor de umidade, da qual foram extraídos os parâmetros operacionais relevantes: umidade ótima ( $W_{ótima}$ ) e densidade seca aparente máxima ( $\gamma_{d\text{máx}}$ ). Esses parâmetros são apresentados numericamente nas tabelas e foram usados como referência para a moldagem de corpos de prova sujeitos aos ensaios de permeabilidade e para cenários de sensibilidade nas simulações. Ajustes não significativos da forma da curva não serão destacados além da apresentação dos pontos experimentais e dos parâmetros-chave.

Quanto à permeabilidade, realizaram-se ensaios em dois regimes conforme a granulometria: infiltração em carga constante (constant-head) para materiais mais permeáveis e ensaio de rebaixamento / queda de carga (falling-head) para materiais mais finos, seguindo os procedimentos normativos do laboratório. Estes ensaios forneceram as estimativas de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), obtidas após saturação controlada dos corpos de prova; as réplicas e estatísticas resumo dos valores medidos são apresentadas na tabela correspondente.

Por fim, o ensaio por papel-filtro gerou um ponto experimental de retenção por material, o qual foi utilizado como ancoragem no ajuste paramétrico da curva característica água-sucção (CCAS) em conjunto com pedotransferências e calibração numérica. Deve-se observar a limitação inerente ao uso de um único ponto de sucção: a CCAS resultante possui maior incerteza do que uma curva obtida experimentalmente por múltiplos níveis de sucção controlada.

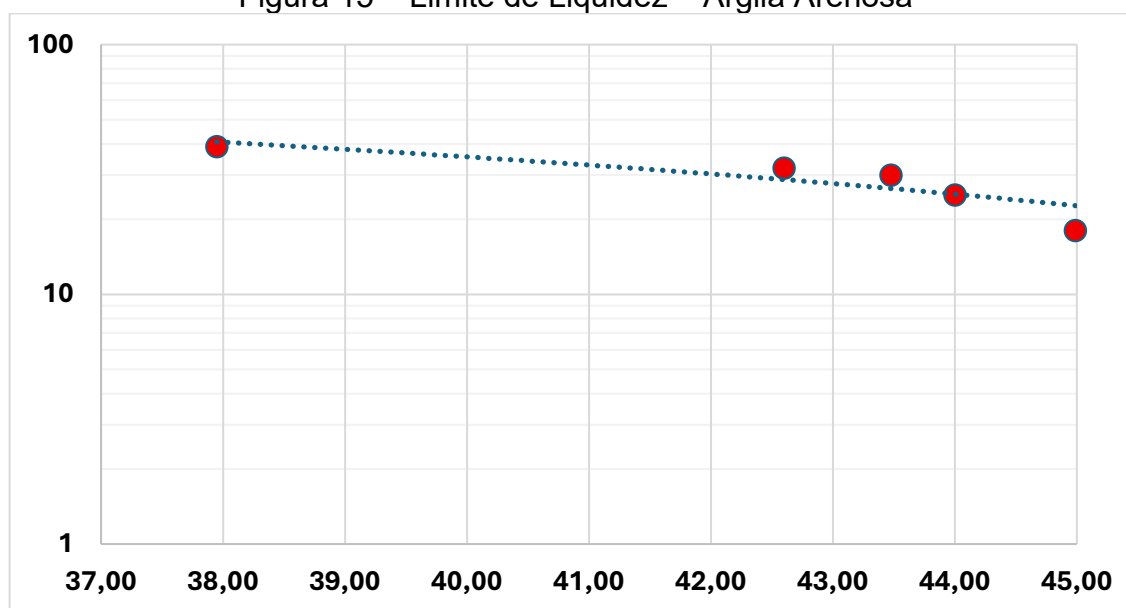
Com base nos ensaios laboratoriais, o limite de liquidez foi determinado em 28% para a areia siltosa e 44% para a argila arenosa. Já o limite de plasticidade correspondeu a 20% e 19%, respectivamente. A partir da diferença entre esses valores, obteve-se o índice de plasticidade de 8% para a areia siltosa e 24% para a argila arenosa. Esses resultados indicam que a areia siltosa possui plasticidade média, enquanto a argila arenosa apresenta alta plasticidade. As figuras 14 e 15 ilustram os gráficos de limite de liquidez para os materiais, e as tabelas 3 e 4 indicam os valores de limite de plasticidade.

Figura 14 – Limite de Liquidez – Areia Siltosa



Fonte: Autor, 2025.

Figura 15 – Limite de Liquidez – Argila Arenosa



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 3 - Limite de Plasticidade – Areia Siltosa

Cápsula + solo úmido	8,58	8,9	9,73	9,98	9,14
Cápsula + solo seco	8,36	8,59	9,39	9,73	8,89
Água	0,22	0,31	0,34	0,25	0,25
Peso cápsula	7,06	7,19	7,98	8,35	7,58
Solo seco	1,3	1,4	1,41	1,38	1,31
Umidade (%)	16,92	22,14	24,11	18,12	19,08
Umidade média (%)	20,08				

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 4 - Limite de Plasticidade – Argila Arenosa

Cápsula + solo úmido	8,5	8,93	9,78	10,4	10,38
Cápsula + solo seco	8,32	8,64	9,5	10,08	10,05
Água	0,18	0,29	0,28	0,32	0,33
Peso cápsula	7,28	7,09	7,94	8,46	8,53
Solo seco	1,04	1,55	1,56	1,62	1,52
Umidade (%)	17,31	18,71	17,95	19,75	21,71
Umidade média (%)	19,09				

Fonte: Autor, 2025.

No que se refere à granulometria, a composição da areia siltosa é de 61,25% de areia, 29,21% de silte e 9,54% de argila. A argila arenosa, por sua vez, apresenta 33,32% de areia, 19,05% de silte e 47,63% de argila. As tabelas 5 e 6 se referem aos ensaios de peneiramento, e as tabelas 7 e 8 indicam os valores dos ensaios de sedimentação para ambos os solos.

Tabela 5 – Peneiramento – Areia Siltosa

Peneira		Material Retido (g)	Amostra Úmida (W): 70 g	Amostra Seca (Ws): 61,05
n°	mm		Material Retido Acumulado (g)	Material Passado (%)
16	1,2	0,06	0,06	99,33
30	0,6	0,09	0,15	98,32
40	0,42	0,58	0,73	91,84
60	0,25	0,83	1,56	82,57
100	0,15	1,50	3,06	65,81
200	0,075	2,11	5,17	42,23

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 6 – Peneiramento – Argila Arenosa

Peneira		Material Retido (g)	Amostra Úmida (W): 70 g	Amostra Seca (Ws): 33,01
n°	mm		Material Retido Acumulado (g)	Material Passado (%)
16	1,2	0,15	0,15	99,59
30	0,6	0,81	0,96	97,40
40	0,42	1,03	1,99	94,62
60	0,25	2,54	4,53	87,75
100	0,15	3,32	7,85	78,78
200	0,075	4,11	11,96	67,67

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 7 – Sedimentação – Areia Siltosa

Data	Hora	$\Delta t$	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Leitura (L)	Ld	a (cm)	$\gamma_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (g * s/cm <sup>2</sup> )	Diâmetro dos Grãos (mm)	Q = % da Amostra Total
20/mai	10h24	0,5 min	30	21,0	1,0330	1,0030018	19,195824	0,9978391	1,01E-05	0,070	41,18
20/mai	10h25	1 min	60	21,0	1,0325	1,0030018	19,195824	0,9978391	1,01E-05	0,060	38,75
20/mai	10h26	2 min	120	21,0	1,0320	1,0030018	19,195824	0,9978391	1,01E-05	0,040	35,67
20/mai	10h28	4 min	240	21,0	1,0305	1,0030018	19,195824	0,9978391	1,01E-05	0,028	31,65
20/mai	10h32	8 min	480	21,0	1,0290	1,0030018	19,195824	0,9978391	1,01E-05	0,020	30,12
20/mai	10h39	15 min	900	21,1	1,0275	1,002986	19,199208	0,9978187	1,00E-05	0,014	27,56
20/mai	10h54	30 min	1800	21,1	1,0260	1,002986	19,199208	0,9978187	1,00E-05	0,010	25,68
20/mai	11h24	1 h	3600	21,3	1,0245	1,0029542	19,20602	0,997778	9,99E-06	0,007	23,16
20/mai	12h24	2 h	7200	21,6	1,0230	1,0029061	19,216351	0,9977168	9,91E-06	0,006	21,75
20/mai	14h44	4 h	14400	21,7	1,0215	1,0028899	19,219824	0,9976965	9,89E-06	0,004	18,23
20/mai	18h44	8 h	28800	21,7	1,0170	1,0028899	19,219824	0,9976965	9,89E-06	0,003	12,28
21/mai	10h24	24 h	86400	20,0	1,0075	1,0031556	19,162803	0,9980429	1,03E-05	0,002	9,54

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 8 – Sedimentação – Argila Arenosa

Data	Hora	$\Delta t$	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Leitura (L)	Ld	a (cm)	$\gamma_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (g * s/cm <sup>2</sup> )	Diâmetro dos Grãos (mm)	Q = % da Amostra Total
05/jun	9h11	0,5 min	30	24,3	1,002	1,0024	19,3154	0,9972	9,29E-06	0,070	67,26
05/jun	9H11	1 min	60	24,3	1,0190	1,0024	19,3154	0,9972	9,29E-06	0,060	66,68
05/jun	10h26	2 min	120	24,3	1,018	1,0024	19,3154	0,9972	9,29E-06	0,042	64,74
05/jun	10h28	4 min	240	24,3	1,0180	1,0024	19,3154	0,9972	9,29E-06	0,029	62,59
05/jun	10h32	8 min	480	24,2	1,018	1,0025	19,3115	0,9972	9,31E-06	0,020	60,68
05/jun	10h39	15 min	900	23,8	1,0175	1,0025	19,2962	0,9973	9,40E-06	0,015	58,82
05/jun	10h54	30 min	1800	23,0	1,0175	1,0027	19,2663	0,9974	9,58E-06	0,011	58,37
05/jun	11h24	1 h	3600	22,3	1,017	1,0028	19,2410	0,9976	9,75E-06	0,008	56,36
05/jun	12h24	2 h	7200	20,8	1,0165	1,0030	19,1891	0,9979	1,01E-05	0,005	53,94
05/jun	14h44	4 h	14400	19,7	1,0165	1,0032	19,1532	0,9981	1,04E-05	0,004	53,40
05/jun	18h44	8 h	28800	19,6	1,0160	1,0032	19,1500	0,9981	1,04E-05	0,003	51,72
06/jun	10h24	24 h	86400	19,5	1,0150	1,0032	19,1469	0,9981	1,04E-05	0,002	47,63

Fonte: Autor, 2025.



As tabelas 9 e 10 referem-se ao resumo da análise granulométrica e as figuras 16 e 17 ilustra as curvas granulométricas para ambos os solos.

Tabela 9 – Análise Granulométrica – Areia Siltosa

Diâmetro dos Grãos (mm)	Porcentagem Passante (%)	Fração de Solo
1,2	99,33	Areia
0,6	98,32	
0,42	91,84	
0,25	82,57	
0,15	65,81	
0,075	42,23	
0,070	41,18	
0,060	38,75	Silte
0,040	35,67	
0,028	31,65	
0,020	30,12	
0,014	27,56	
0,010	25,68	
0,007	23,16	
0,006	21,75	
0,004	18,23	
0,003	12,28	
0,002	9,54	Argila

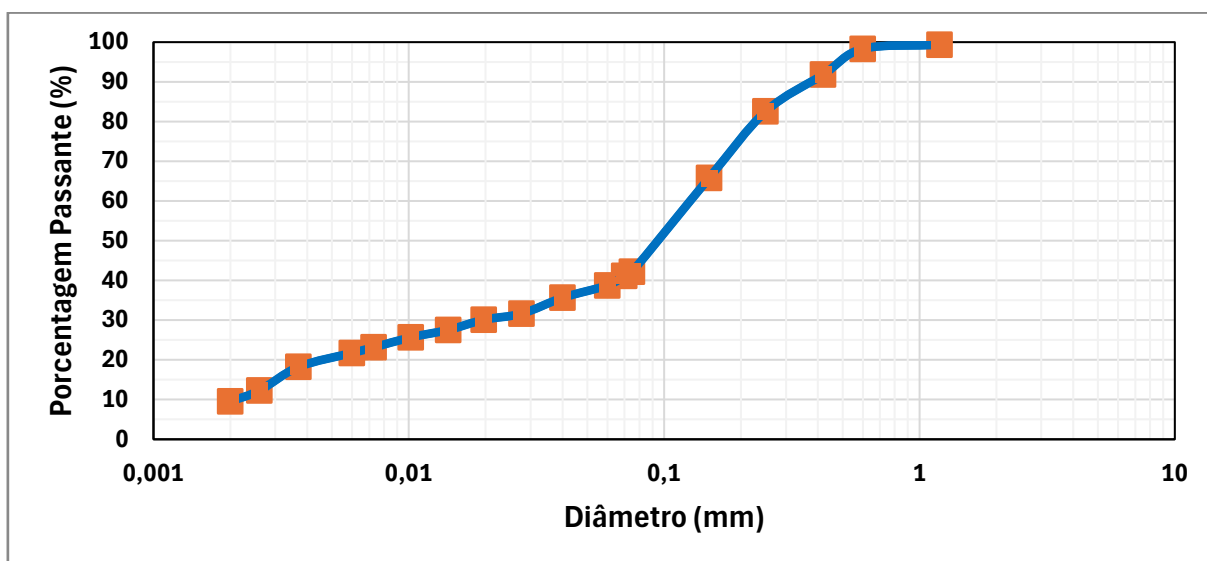
Fonte: Autor, 2025.

Tabela 10 – Análise Granulométrica – Argila Arenosa

Diâmetro dos Grãos (mm)	Porcentagem Passante (%)	Fração de Solo
1,2	99,59	Areia
0,6	97,40	
0,42	94,62	
0,25	87,75	
0,15	78,78	
0,075	67,67	
0,070	67,26	
0,060	66,68	Silte
0,042	64,74	
0,029	62,59	
0,020	60,68	
0,015	58,82	
0,011	58,37	
0,008	56,36	
0,005	53,94	
0,004	53,40	
0,003	51,72	
0,002	47,63	Argila

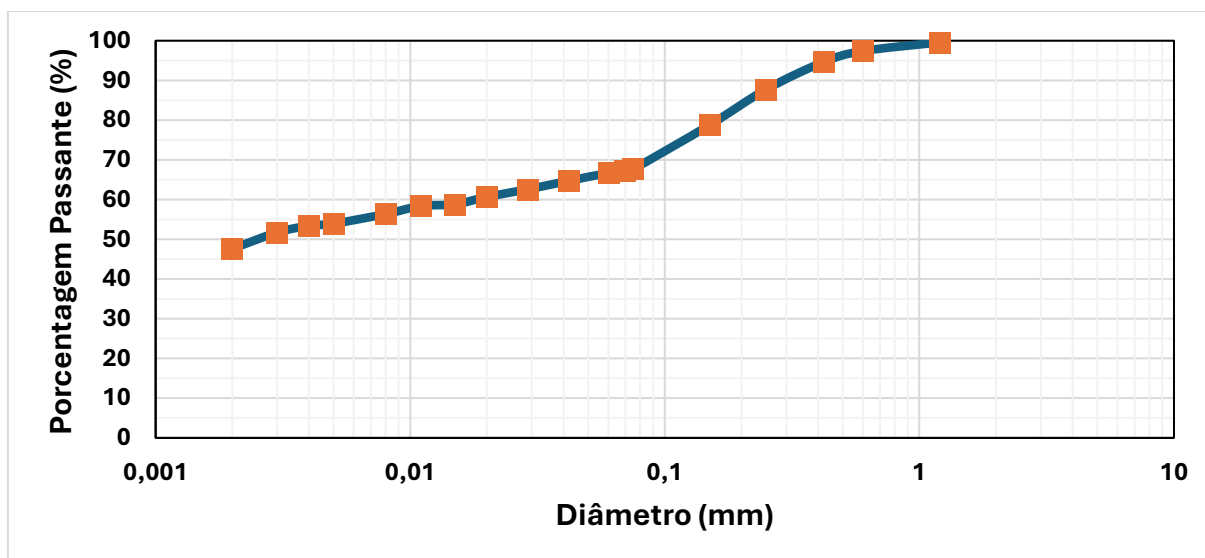
Fonte: Autor, 2025.

Figura 16 – Curva Granulométrica – Areia Siltosa



Fonte: Autor, 2025.

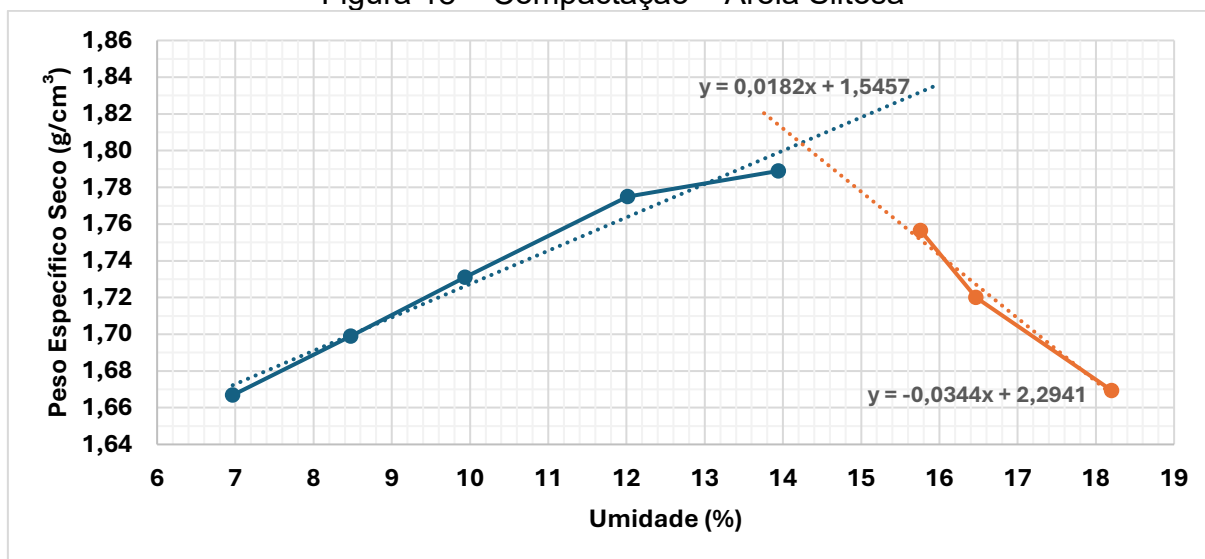
Figura 17 – Curva Granulométrica – Areia Siltosa



Fonte: Autor, 2025.

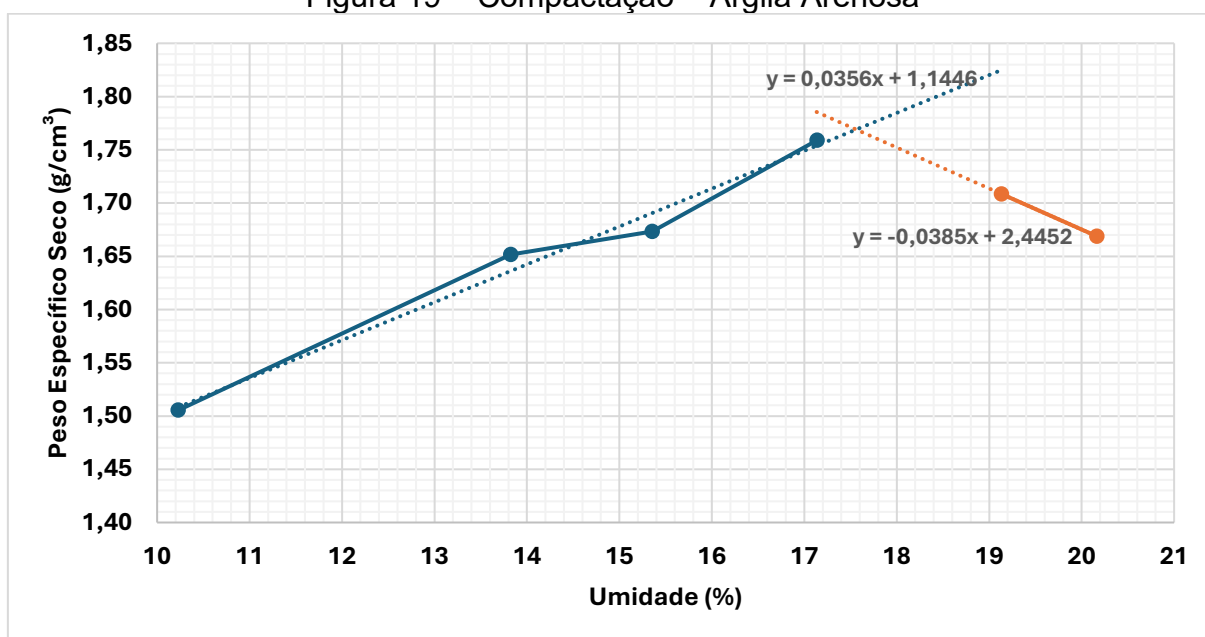
Quanto aos ensaios de compactação, a areia siltosa apresentou uma umidade ótima ( $W_{ótima}$ ) de 14,23% e peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d_{máx}}$ ) de 1,805 g/cm<sup>3</sup>. Para a argila arenosa, os valores foram de 17,55% de  $W_{ótima}$  e 1,769 g/cm<sup>3</sup> de  $\gamma_{d_{máx}}$ . As figuras 18 e 19 ilustram os resultados do ensaio de compactação.

Figura 18 – Compactação – Areia Siltosa



Fonte: Autor, 2025.

Figura 19 – Compactação – Argila Arenosa



Fonte: Autor, 2025.

Nos ensaios de permeabilidade, os corpos de prova foram moldados a partir do lote homogeneizado de cada material e compactados para reproduzir, sempre que aplicável, a condição construtiva de referência. Especificamente, os espécimes foram preparados na umidade próxima à umidade ótima de Proctor ( $W_{ótima}$ ) e compactados até atingir um peso específico seco aproximado ao valor  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  obtido no ensaio de compactação; adicionalmente, foram preparados corpos de prova em condição menos densificada para análises de sensibilidade. A seleção do regime de ensaio seguiu a granulometria: materiais com predominância de fração grossa foram ensaiados em carga constante (constant-head) e materiais mais finos em rebaixamento / queda de carga (falling-head), conforme prática de laboratório.

Foram executadas 10 (dez) réplicas por condição ( $n = 10$ ), permitindo avaliar a variabilidade experimental. Os valores reportados —  $2,86 \times 10^{-6} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  para a areia siltosa e  $3,6 \times 10^{-7} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  para a argila arenosa — referem-se à condutividade hidráulica em condição saturada ( $K_{sat}$ ), obtida após procedimento de pré-saturação dos corpos de prova.

A saturação prévia foi alcançada por imersão combinada com desaireação a vácuo e purga com água destilada, até observação de fluxo contínuo sem degaseificação perceptível no efluente. A condição de saturação foi verificada por dois métodos complementares antes da leitura final: observação visual do efluente (ausência de bolhas durante enchimento e purga) e estabilização do fluxo; e cálculo

do grau de saturação a partir das massas úmida e seca e da porosidade estimada — adotou-se como critério de aceitação grau de saturação  $\geq 0,98$  para considerar o corpo de prova saturado.

Durante os ensaios em carga constante registrou-se a vazão após estabilização do fluxo (variação inferior a 5% durante intervalo de tempo predeterminado) e a condutividade foi calculada pela equação de Darcy em regime estacionário. Nos ensaios falling-head empregou-se o ajuste exponencial da variação de carga para estimar  $K_{sat}$ , conforme metodologia padrão de laboratório. Quando aplicável, os valores de  $K_{sat}$  foram corrigidos para a temperatura de referência (20 °C) por fator de viscosidade da água, uma vez que a viscosidade afeta diretamente a condutividade.

Os resultados apresentados nas Tabelas 11 e 12 correspondem às médias das réplicas e aos respectivos indicadores de dispersão; quaisquer valores excluídos foram removidos apenas mediante justificativa técnica documentada (por exemplo, presença persistente de bolhas, vazamento ou defeito no anel/permeâmetro). Finalmente, os valores médios de  $K_{sat}$  foram empregados como parâmetro de referência nas rotinas de pedotransferência e como entrada ( $K_s$ ) nas simulações HYDRUS-1D, e as análises de sensibilidade consideraram variações percentuais em torno desses valores experimentais.

Tabela 11 – Permeabilidade – Areia Siltosa

Bureta 3			Hora de Leitura	Tempo (t) (s)	Leitura da Bureta	Altura Inicial (h0) (cm)	Altura Final (h1) (cm)	Temperatura (°C)	Coeficiente de Correção (Ck)	Coeficiente de Permeabilidade k20 (cm/s)
Diâmetro (cm)	1		10 min	600	7,00	152,20	145,20	21,10	0,968	6,07689E-06
Área (cm²)	0,79	a	10 min	600	4,90	152,20	147,30	21,20	0,968	4,22359E-06
Corpo de Prova			10 min	600	4,00	152,20	148,20	21,20	0,968	3,43740E-06
Comprimento (cm)	8	L	10 min	600	3,50	152,20	148,70	21,20	0,968	3,00268E-06
Diâmetro (cm)	10		10 min	600	3,30	152,20	148,90	21,20	0,968	2,82921E-06
Área (cm²)	78,54	A	10 min	600	3,30	152,20	148,90	21,20	0,968	2,82921E-06
Volume (cm³)	628,32		10 min	600	3,30	152,20	148,90	21,20	0,968	2,82921E-06
Peso Úmido (g)	1230								Kmedio (cm/s)	2,8726E-06
Peso Seco (g)	1079,4									
Água (g)	150,6									
Umidade (%)	13,95									
$\gamma$ (g/cm³)	1,96									
$\gamma_d$ (g/cm³)	1,72									
Índice de Vazios (ei)	0,48									

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 12 – Permeabilidade – Argila Arenosa

Bureta 3			Hora de Leitura	Tempo (t) (s)	Leitura da Bureta	Altura Inicial (h0) (cm)	Altura Final (h1) (cm)	Temperatura (°C)	Coeficiente de Correção (Ck)	Coeficiente de Permeabilidade k20 (cm/s)
Diâmetro (cm)	1		10 min	600	2,00	152,40	150,40	20,80	0,975	1,71733E-06
Área (cm²)	0,79	a	10 min	600	1,50	152,40	150,90	21,10	0,968	1,27663E-06
Corpo de Prova			10 min	600	1,00	152,40	151,40	21,10	0,968	8,49685E-07
Comprimento (cm)	8	L	10 min	600	0,50	152,40	151,90	21,10	0,968	4,24143E-07
Diâmetro (cm)	10		10 min	600	0,40	152,40	152,00	21,10	0,968	3,39203E-07
Área (cm²)	78,54	A	10 min	600	0,40	152,40	152,00	21,10	0,968	3,39203E-07
Volume (cm³)	628,32		10 min	600	0,40	152,40	152,00	21,10	0,968	3,39203E-07
Peso Úmido (g)	1215,72								Kmedio (cm/s)	3,6044E-07
Peso Seco (g)	1033,95									
Água (g)	181,77									
Umidade (%)	17,58									
$\gamma$ (g/cm³)	1,93									
$\gamma_d$ (g/cm³)	1,65									
Índice de Vazios (ei)	0,51									

Fonte: Autor, 2025.

O ensaio por papel-filtro (Whatman nº 42) foi executado em corpos de prova compactados de cada material para obter pontos experimentais de sucção matricial, que serviram como âncoras para o ajuste numérico da CCAS pela função de van Genuchten. O papel-filtro foi posicionado em duas profundidades distintas: “Meio” (central) e “Superior” (próxima à superfície), com duas réplicas por local, totalizando quatro leituras por material. A sucção foi determinada indiretamente: mediu-se a massa do papel antes e após o contato, calculou-se seu teor de umidade ( $W_{\text{papel}}$ ) e, por fim, converteu-se este valor utilizando as equações de Chandler (1992).

Os resultados, compilados na Tabela 13, indicaram diferenças claras na capacidade de retenção, com sucções médias de aproximadamente 13 – 14 kPa para a areia siltosa, 104–106 kPa para a argila arenosa e entre 133 – 303 kPa para a mistura argila + areia. É fundamental ressaltar que o método gerou medições pontuais de sucção em equilíbrio local, e não curvas de retenção experimentais completas. Por essa razão, os pontos foram usados estritamente para a calibração do modelo numérico e para comparação qualitativa, reconhecendo-se a maior incerteza associada à CCAS resultante, conforme explicitado na discussão.

Vale ressaltar que as leituras foram consideradas estáveis quando a variação entre pesagens consecutivas, realizadas em balança com precisão de 0,0001 g, foi inferior a 0,5%, e que réplicas divergentes só foram excluídas mediante justificativa técnica. Adicionalmente, os teores volumétricos de umidade correspondentes aos pontos de sucção não foram medidos diretamente e, portanto, não são apresentados.



Tabela 13 – Sucção

AREIA SILTOSA									
C.P.	Papel Filtro - Meio								
	P <sub>h</sub> (g)	P <sub>s</sub> (g)	W <sub>papel</sub> (%)	Sucção (kPa)	pF	e*pF	pF/e	n	S*n
1	0,5000	0,4500	11,1	14	2,16	1,04	4,49	0,32	1,70
C.P.	Papel Filtro - Superior								
	P <sub>h</sub> (g)	P <sub>s</sub> (g)	W <sub>papel</sub> (%)	Sucção (kPa)	pF	e*pF	pF/e	n	S*n
2	0,5050	0,4520	11,7	13	2,12	1,02	4,41	0,32	1,70

ARGILA ARENOSA									
C.P.	Papel Filtro - Meio								
	P <sub>h</sub> (g)	P <sub>s</sub> (g)	W <sub>papel</sub> (%)	Sucção (kPa)	pF	e*pF	pF/e	n	S*n
1	0,6000	0,5300	13,2	104	3,03	1,54	5,94	0,34	2,06
C.P.	Papel Filtro - Superior								
	P <sub>h</sub> (g)	P <sub>s</sub> (g)	W <sub>papel</sub> (%)	Sucção (kPa)	pF	e*pF	pF/e	n	S*n
2	0,6050	0,5350	13,1	106	3,03	1,55	5,95	0,34	2,06

ARGILA ARENOSA + AREIA SILTOSA									
C.P.	Papel Filtro - Meio								
	P <sub>h</sub> (g)	P <sub>s</sub> (g)	W <sub>papel</sub> (%)	Sucção (kPa)	pF	e*pF	pF/e	n	S*n
1	0,5500	0,5200	5,8	303	3,49	1,73	7,05	0,33	1,88
C.P.	Papel Filtro - Superior								
	P <sub>h</sub> (g)	P <sub>s</sub> (g)	W <sub>papel</sub> (%)	Sucção (kPa)	pF	e*pF	pF/e	n	S*n
2	0,5800	0,5200	11,5	133	3,13	1,55	6,32	0,33	1,88

Fonte: Autor, 2025.

## 4.2 ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO CLIMA

Realizada a etapa de abordagem estatística via regressão linear múltipla das estações meteorológicas selecionadas (Quadro 2), as estatísticas de ajuste para o parâmetro da Precipitação da abordagem em Excel são dispostas na Tabela 14.

Tabela 14 – Estatísticas de Ajuste do Modelo de Regressão Linear Múltipla para Precipitação

Índices de Ajuste	Valor
Erro Padrão Residual	0,321 (gl = 98)
R <sup>2</sup> múltiplo	0,912
R <sup>2</sup> ajustado	0,895
Estatística F	142,3 (gl = 6 e 148)
p	p < 0,001

Fonte: Autor, 2022.

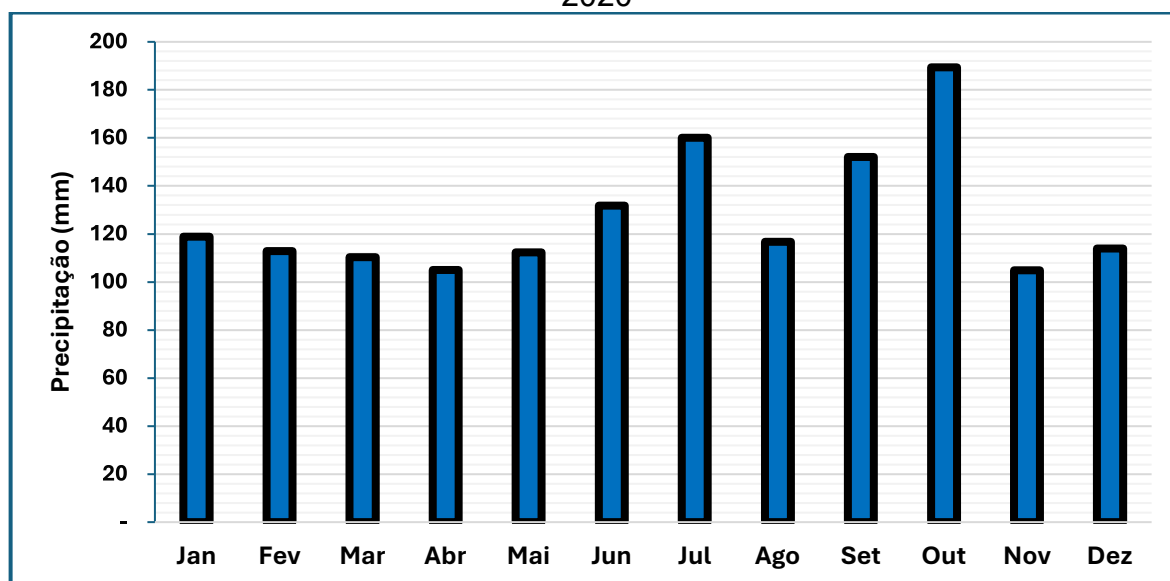
Observa-se que a estatística F (142,3; gl = 6 e 148) atinge significância a  $p < 0,01$ , indicando que o modelo proposto difere de modo substancial do modelo nulo (sem variáveis independentes).

O coeficiente de determinação múltiplo ( $R^2 = 0,912$ ) revela que aproximadamente 91,2 % da variabilidade observada na variável resposta é explicada pelas covariáveis incluídas no modelo. Considerando o ajuste para o número de preditores, o  $R^2$  ajustado apresentou valor ligeiramente inferior ( $R^2_a = 0,895$ ), o que confirma a robustez do modelo mesmo após a correção por possíveis efeitos de sobreajuste.

As variáveis independentes empregadas na análise foram: velocidade do vento (m/s e km/dia), temperaturas máxima e mínima (°C), horas de insolação (h), precipitação (mm), evapotranspiração (mm) e umidade relativa do ar (%). Para caracterizar a série histórica (1991–2020), calculou-se a média mensal desses parâmetros e selecionaram-se especificamente os meses de menor (abril) e maior (outubro) pluviosidade, visando testar o desempenho do modelo em cenários climáticos contrastantes.

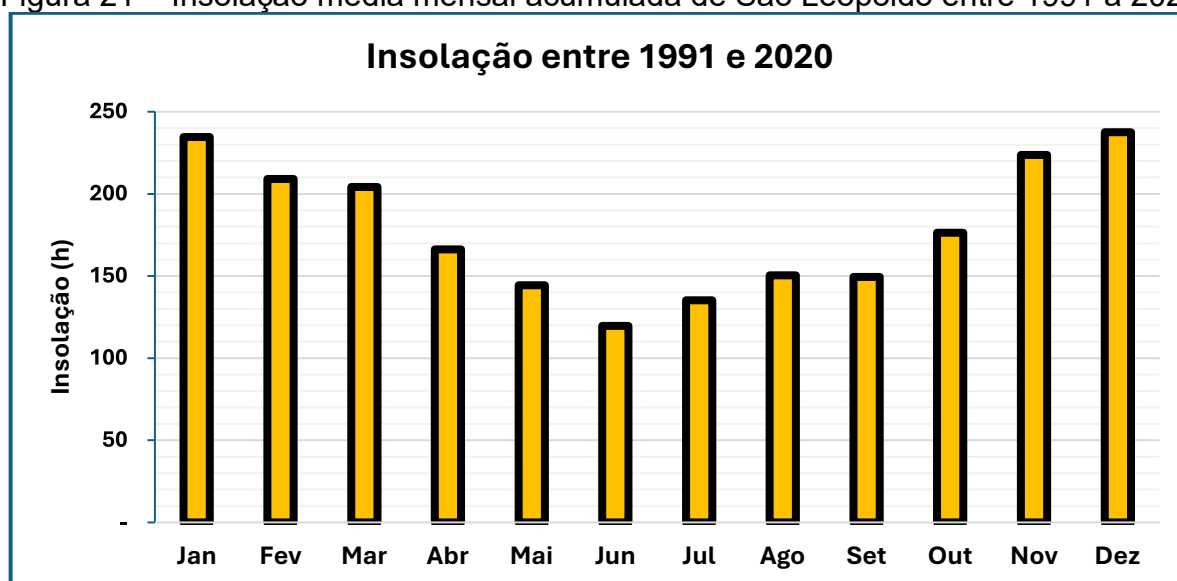
As Figuras 20 a 25 dispõem em gráficos os produtos da Regressão Linear Múltipla para os parâmetros de entrada no HYDRUS-1D. Finalmente, os gráficos contendo a precipitação diária para os meses de abril (menor precipitação média mensal) e outubro (menor precipitação média mensal) estão dispostos nas Figuras 26 e 27, enquanto a Figura 28 apresenta a comparação da precipitação para os dois meses.

Figura 20 – Precipitação média mensal acumulada de São Leopoldo entre 1991 a 2020



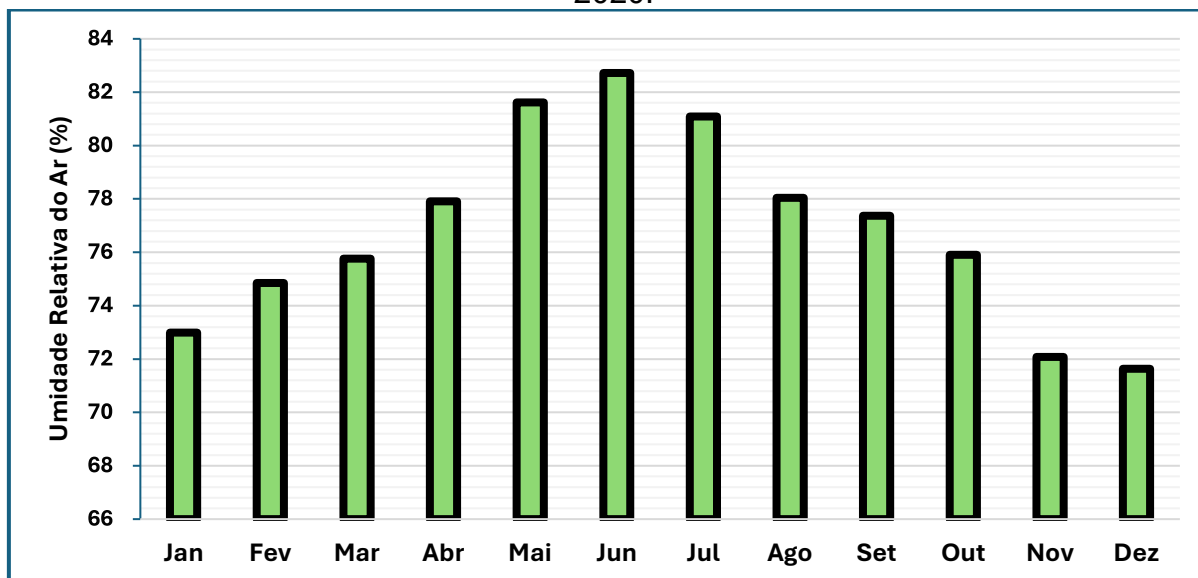
Fonte: Autor, 2025.

Figura 21 – Insolação média mensal acumulada de São Leopoldo entre 1991 a 2020



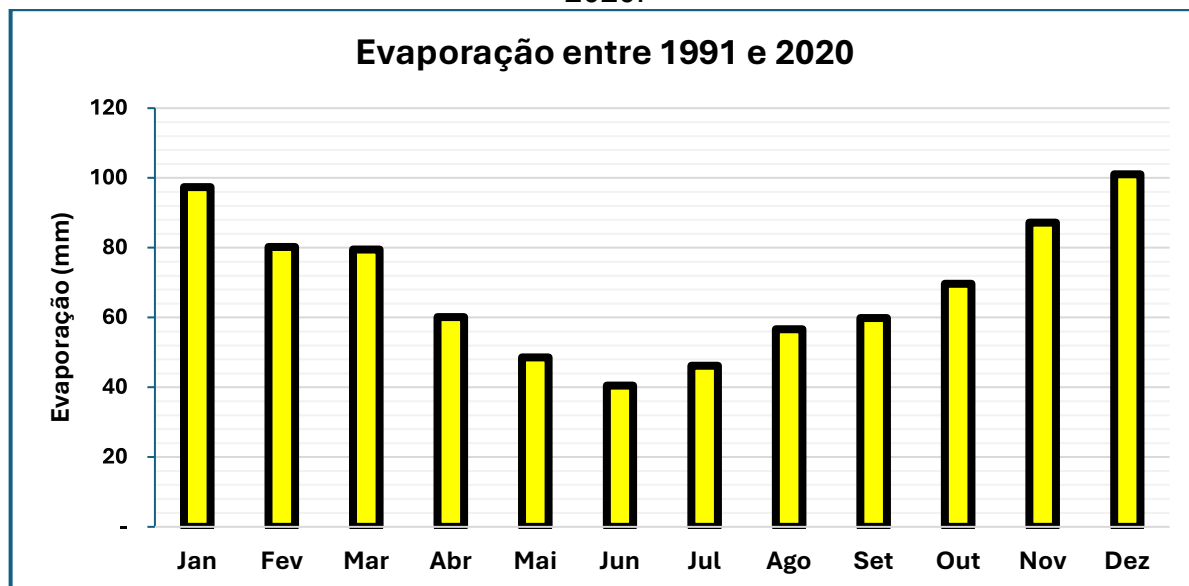
Fonte: Autor, 2025.

Figura 22 – Umidade relativa do ar média mensal de São Leopoldo entre 1991 a 2020.



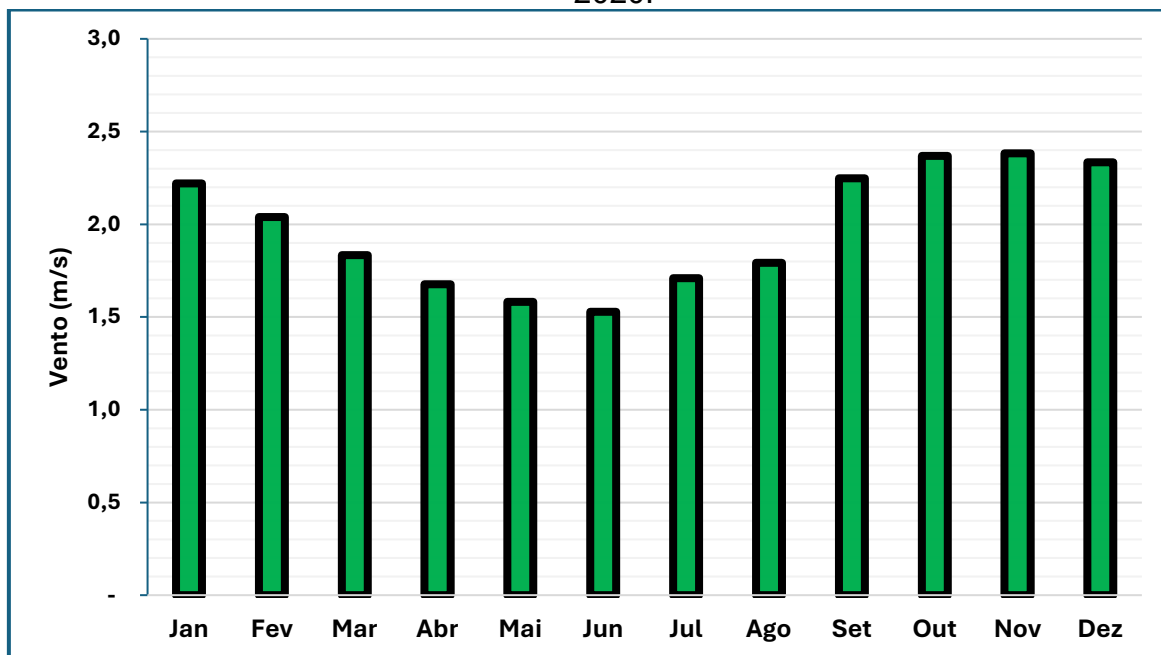
Fonte: Autor, 2025.

Figura 23 – Evaporação média mensal acumulada de São Leopoldo entre 1991 a 2020.



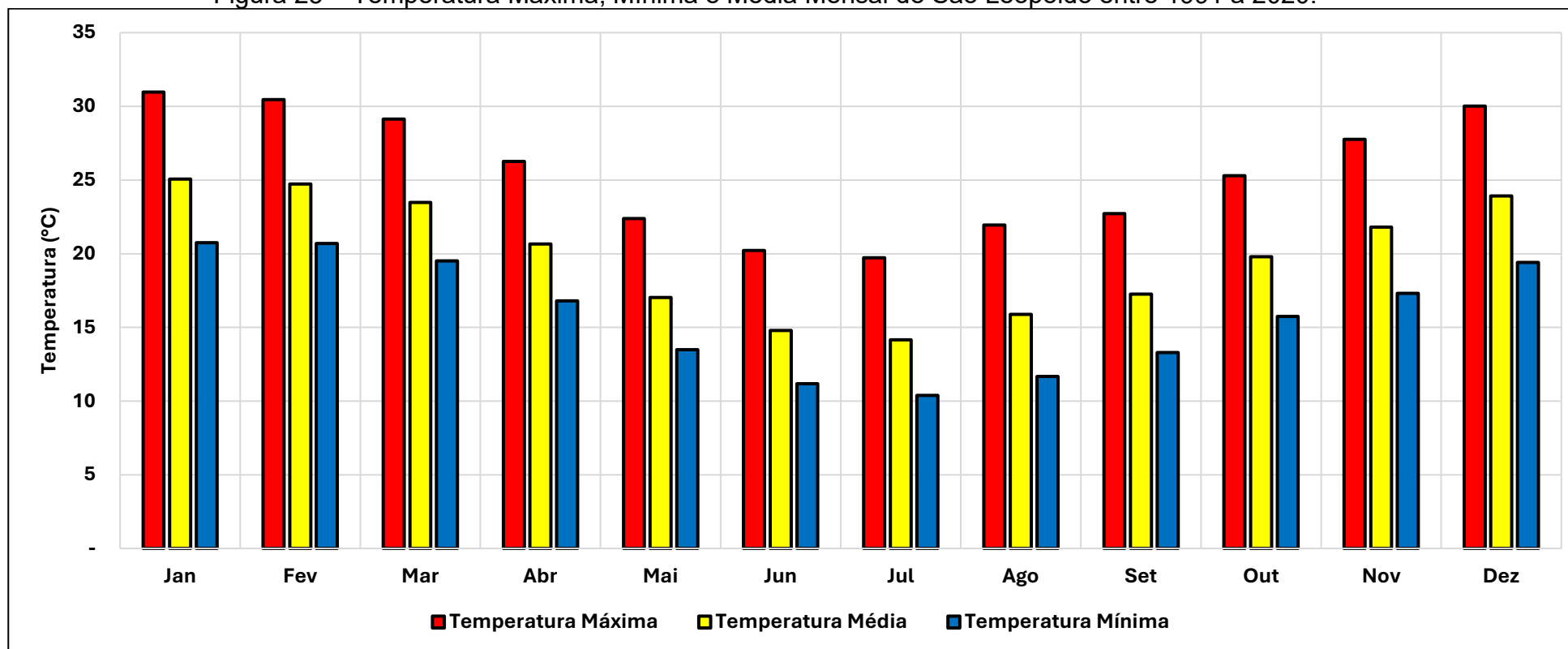
Fonte: Autor, 2025.

Figura 24 – Velocidade média do vento (km/dia) em São Leopoldo entre 1991 a 2020.



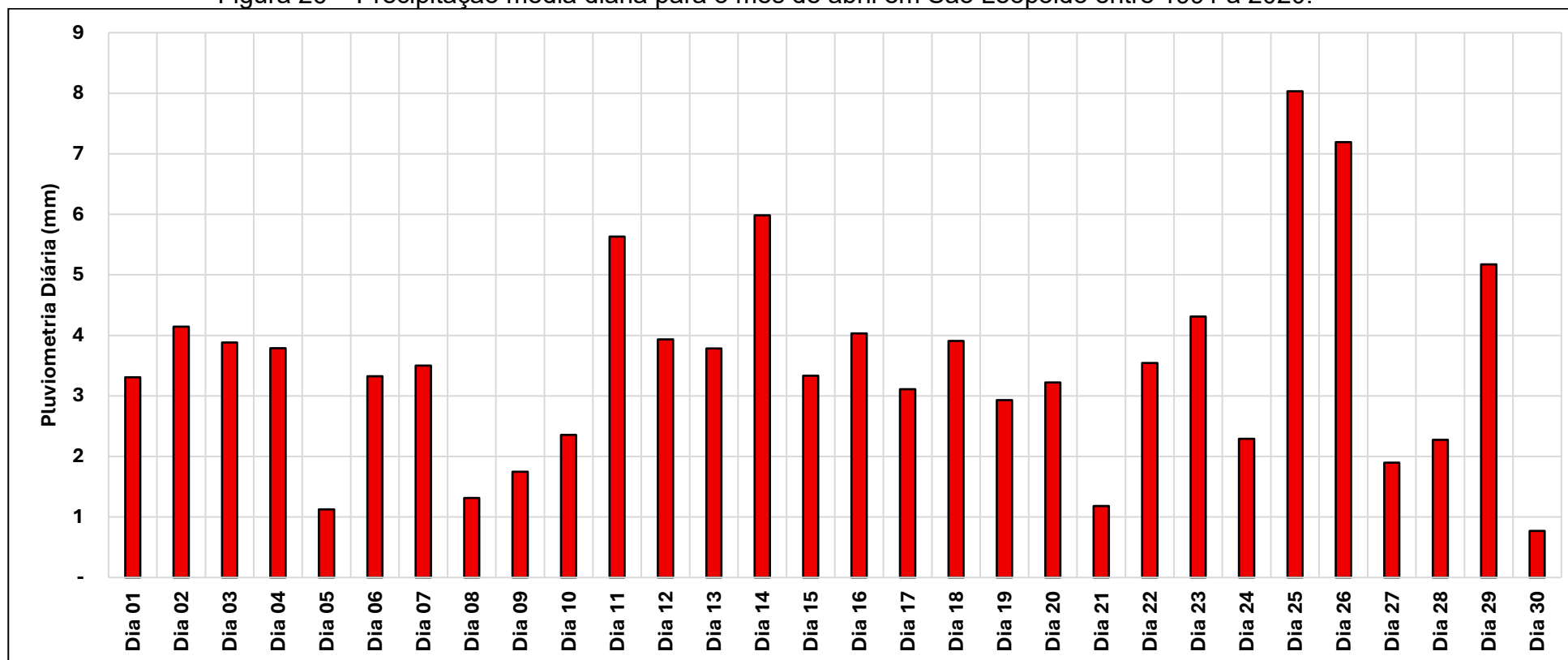
Fonte: Autor, 2025.

Figura 25 – Temperatura Máxima, Mínima e Média Mensal de São Leopoldo entre 1991 a 2020.



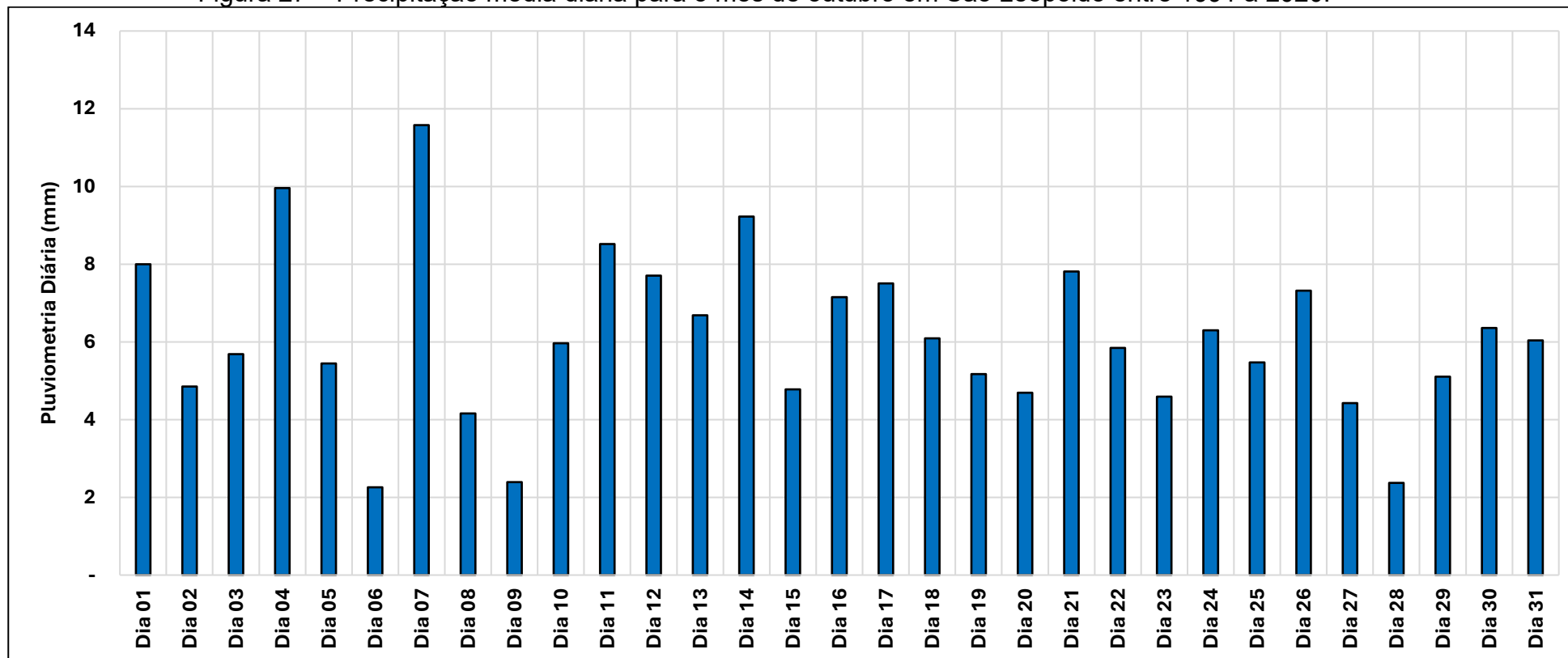
Fonte: Autor, 2025.

Figura 26 – Precipitação média diária para o mês de abril em São Leopoldo entre 1991 a 2020.



Fonte: Autor, 2025.

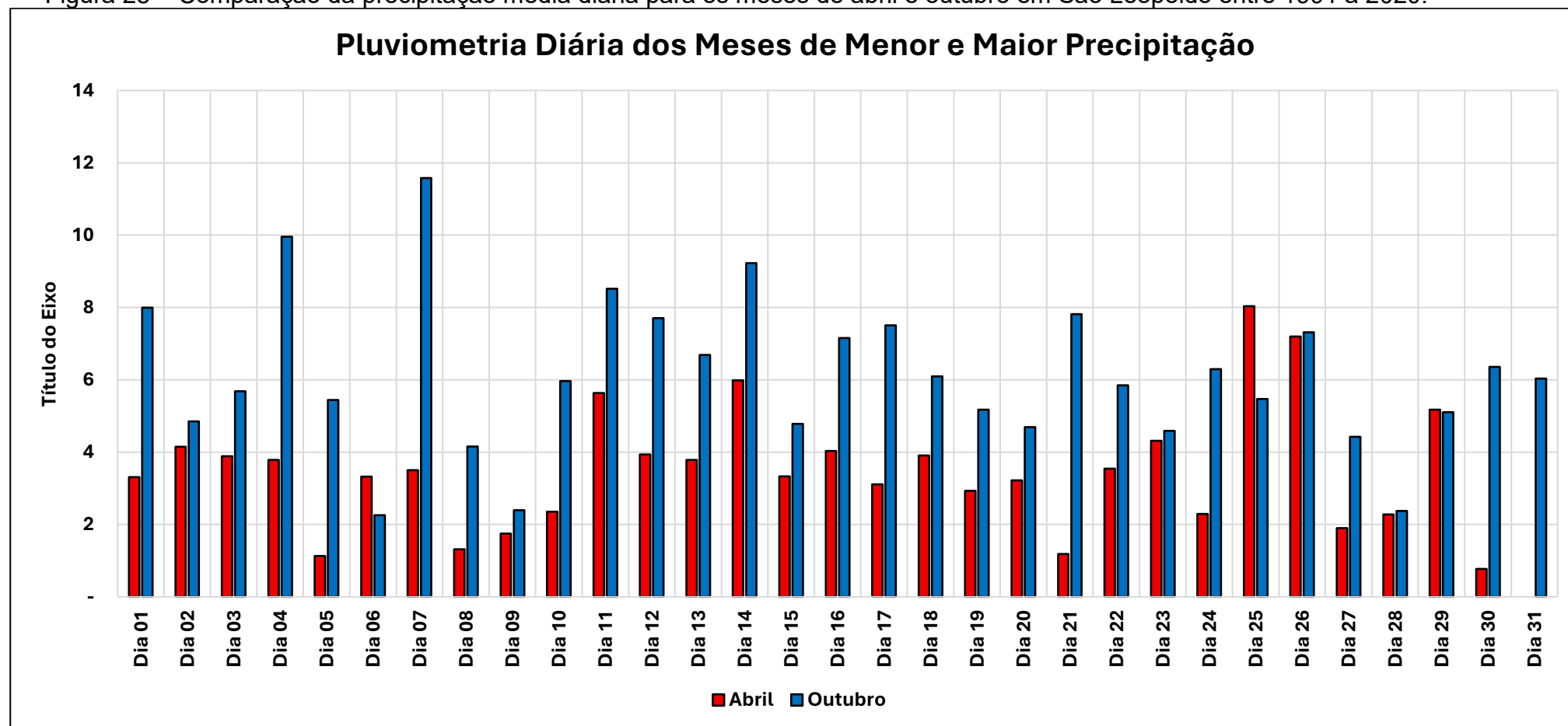
Figura 27 – Precipitação média diária para o mês de outubro em São Leopoldo entre 1991 a 2020.



Fonte: Autor, 2025.



Figura 28 – Comparação da precipitação média diária para os meses de abril e outubro em São Leopoldo entre 1991 a 2020.



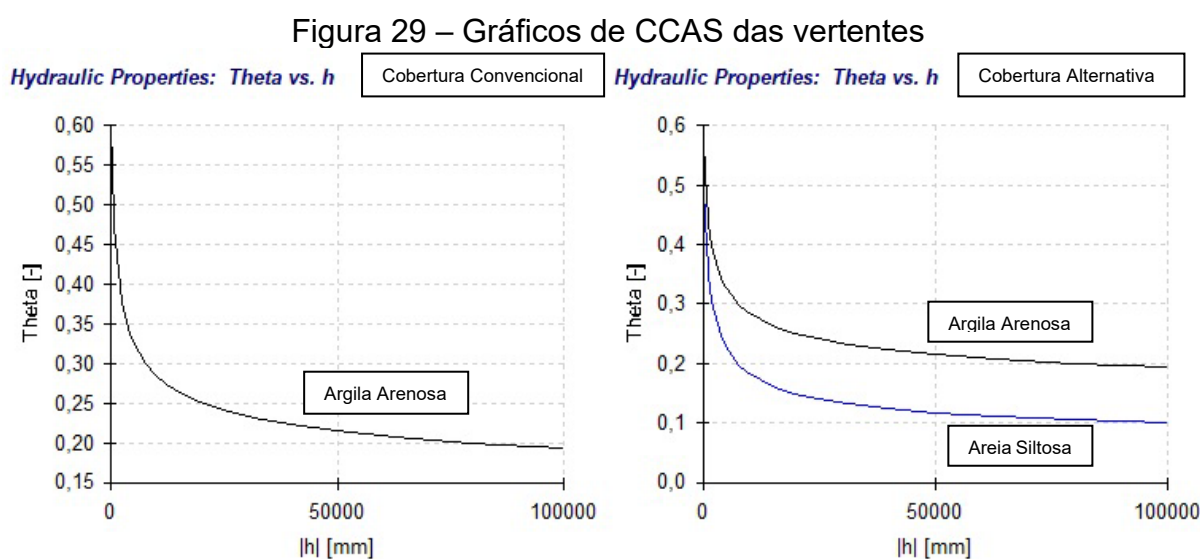
Fonte: Autor, 2025.

### 4.3 MODELAGEM DE INFILTRAÇÃO

Munido das curvas de retenção e dos resultados climatológicos, procedeu-se à parametrização do HYDRUS-1D para as vertentes convencional e evapotranspirativa.

#### 4.3.1 Curva Característica de Água no Solo

Os pontos experimentais obtidos pelo ensaio de sucção foram importados no HYDRUS-1D e ajustados ao modelo de van Genuchten–Mualem, resultando em curvas características que revelaram diferenças sutis entre a argila arenosa e a areia siltosa. A validação do ajuste numérico ocorreu pela comparação visual e pelo cálculo de erro médio quadrático entre dados medidos e simulados, evidenciando elevada aderência dos parâmetros hidráulicos calibrados em laboratório. A figura 29 apresenta os gráficos de CCAS das vertentes convencional e alternativa.



Fonte: Autor, 2025.

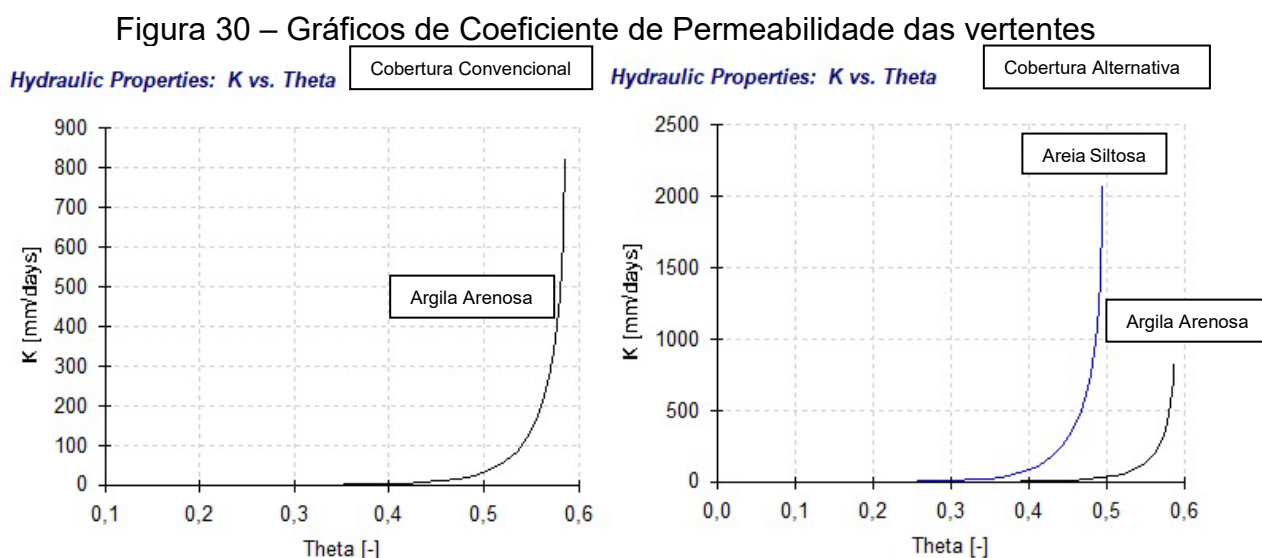
A argila arenosa, solo coesivo, apresenta melhor configuração de CCAS em relação à areia siltosa, solo granular, uma vez que ocorre maior variação da taxa de umidade em função da altura de coluna d'água, necessitando de maior taxa de umidade para que a ocorrência de infiltração nesta vertente.

No entanto, em virtude da mistura de tipos de materiais apresentada pela vertente alternativa, esta vertente apresentou o comportamento mais significativo de

impermeabilidade, uma vez que nem toda a água infiltrada pela argila arenosa atingiu a camada de areia siltosa.

#### 4.3.2 Coeficiente de Permeabilidade

As curvas de condutividade hidráulica funcional foram geradas para cada solo a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios de permeabilidade e no ajuste inverso no software. Observou-se que a argila arenosa apresentou condutividade hidráulica inicial inferior à da areia siltosa em baixos potenciais de sucção, o que influenciou diretamente o comportamento de infiltração sob diferentes regimes de umidade. A variação do coeficiente com a pressão capilar foi essencial para compreender a mobilidade da água ao longo do perfil de solo de 500 mm. A figura 30 apresenta os gráficos do coeficiente de permeabilidade para ambas as vertentes.



Fonte: Autor, 2025.

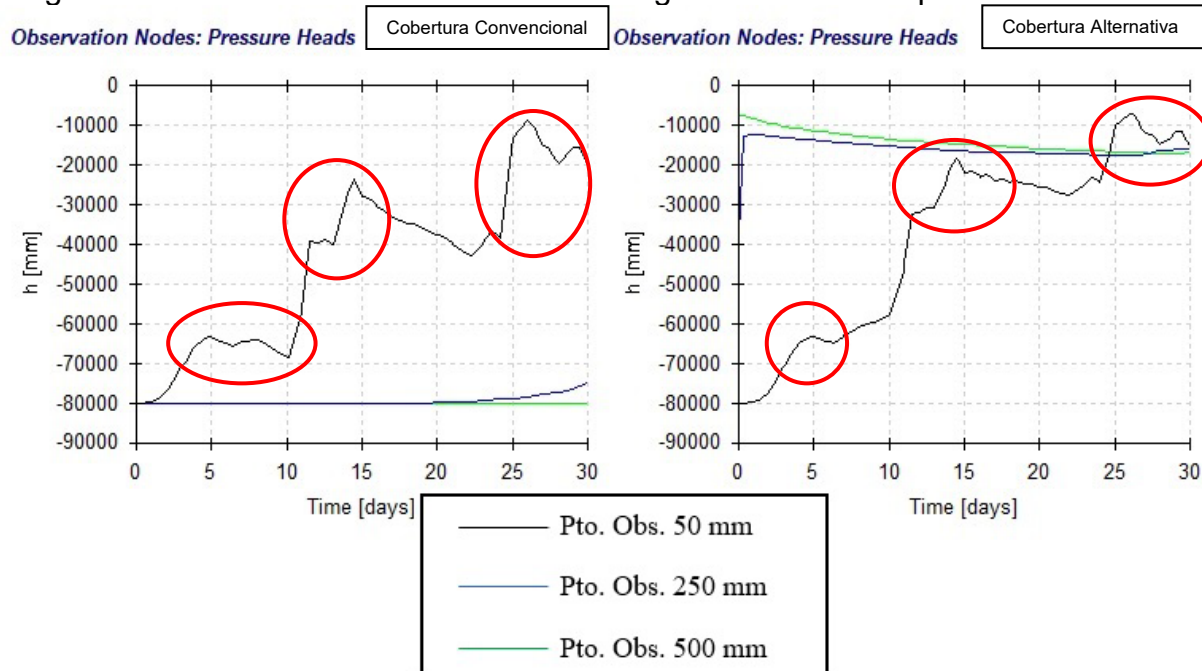
#### 4.3.3 Altura de Coluna d'Água

A exposição dos resultados dos gráficos de altura de coluna d'água (nível de coluna de água que o solo suporta em função dos dias) está disposta nas Figuras 31 (mês de abril) e 32 (mês de outubro).

O comportamento do *pressure head* foi acompanhado em pontos representativos de profundidade, revelando que as duas configurações de cobertura exibiram inflexões marcantes durante eventos de chuva intensa e durante períodos

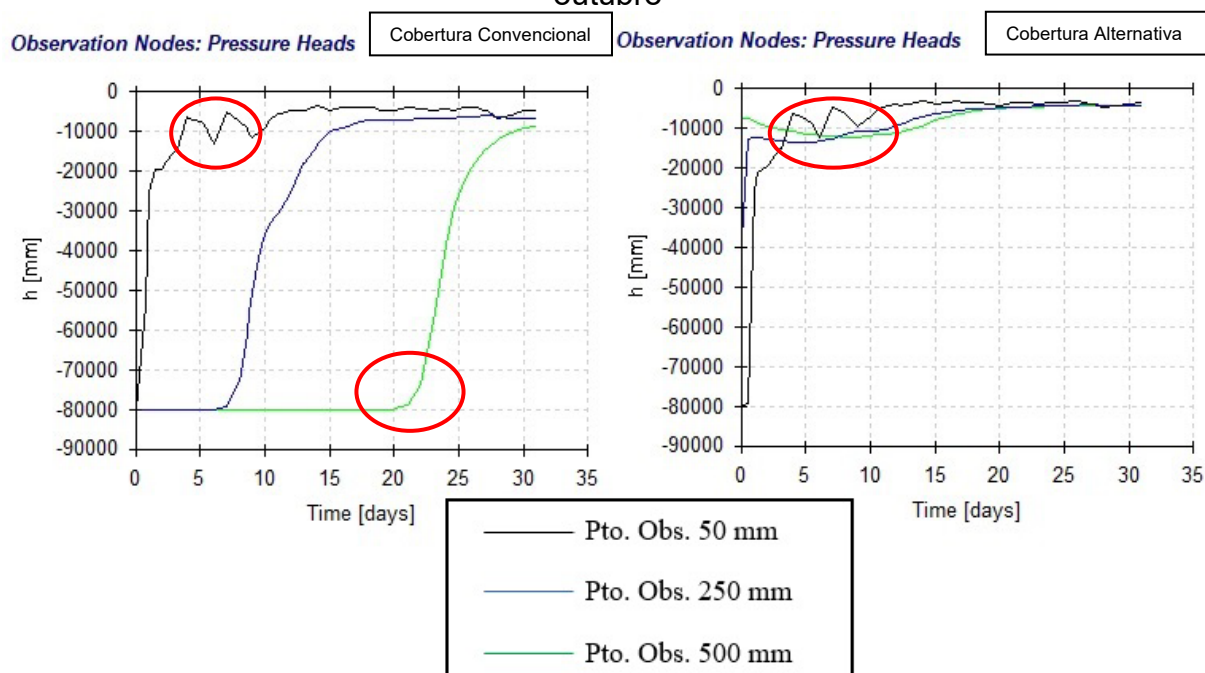
de déficit hídrico. As simulações mostraram que, na vertente evapotranspirativa, o pressure head manteve-se mais estável em profundidades intermediárias, enquanto na cobertura convencional ocorreram oscilações de maior magnitude.

Figura 31 – Gráficos de Altura de Coluna d'Água das vertentes para o mês de abril



Fonte: Autor, 2025.

Figura 32 – Gráficos de Altura de Coluna d'Água das vertentes para o mês de outubro



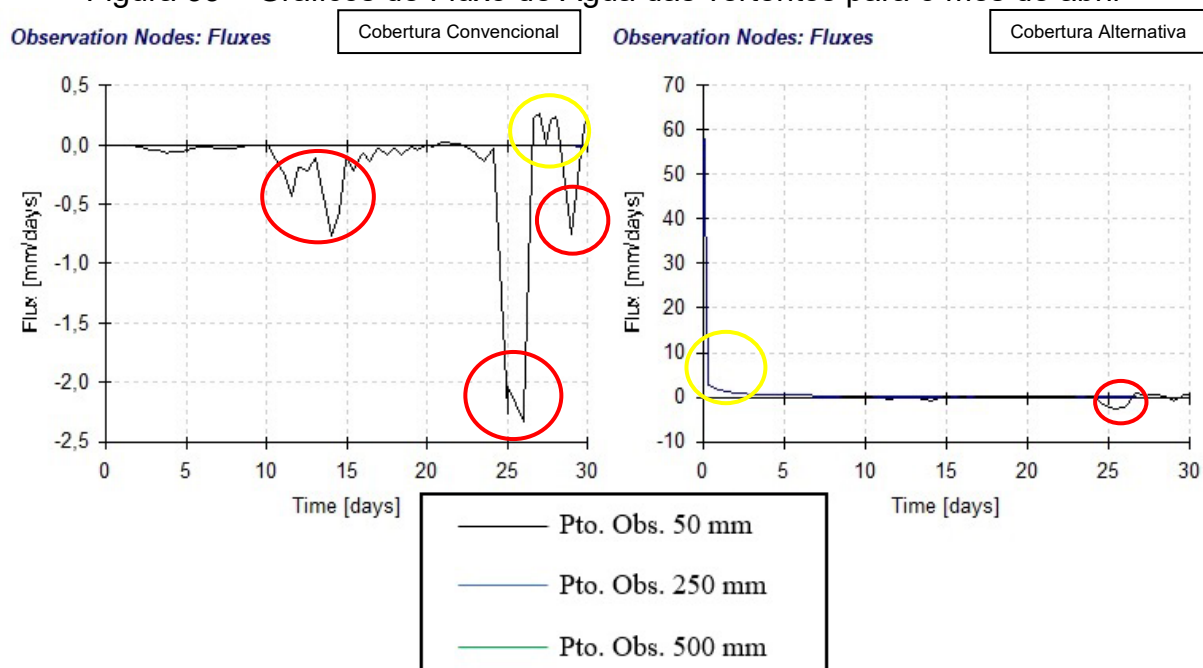
Fonte: Autor, 2025.

#### 4.3.4 Fluxo de Água

A exposição dos resultados dos gráficos de fluxo de água por dia está disposta nas Figuras 33 (mês de abril) e 34 (mês de outubro).

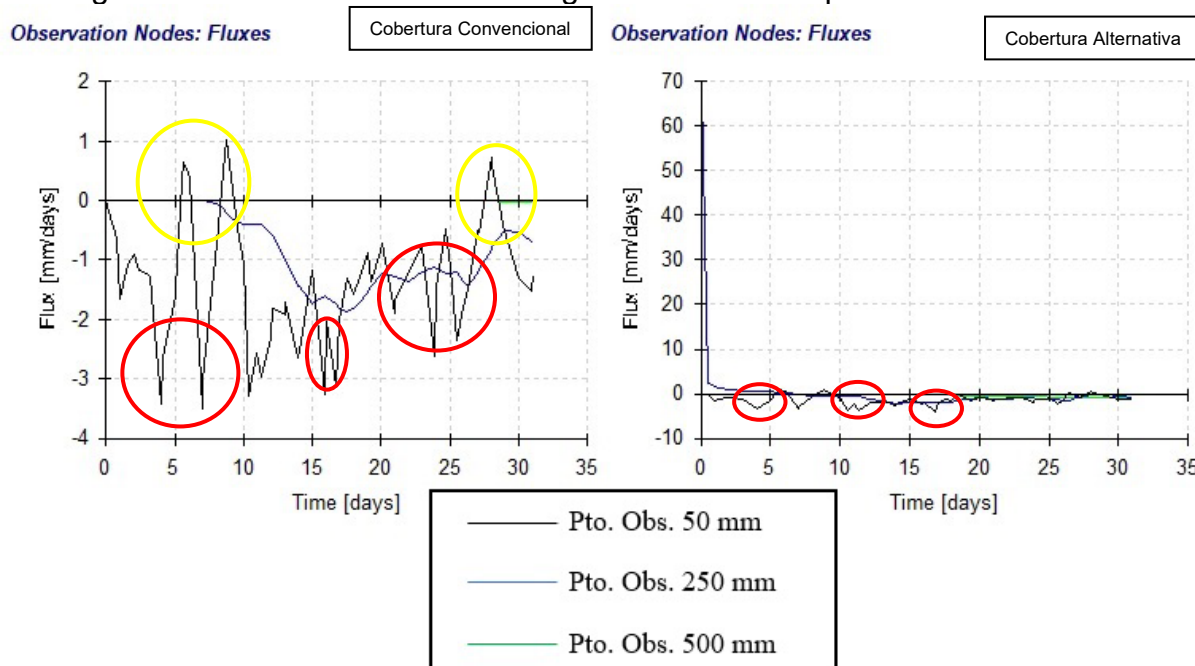
O fluxo de água ao longo do perfil de 500 mm foi calculado para ambas as vertentes, permitindo avaliar o volume acumulado de percolação e a taxa instantânea de escoamento. Os resultados indicaram que a cobertura convencional apresentou picos de fluxo mais pronunciados durante eventos extremos, ao passo que a evapotranspirativa promoveu redução expressiva na percolação acumulada, em consonância com o maior potencial de armazenamento temporário e com a dinâmica de evapotranspiração.

Figura 33 – Gráficos de Fluxo de Água das vertentes para o mês de abril



Fonte: Autor, 2025.

Figura 34 – Gráficos de Fluxo de Água das vertentes para o mês de outubro



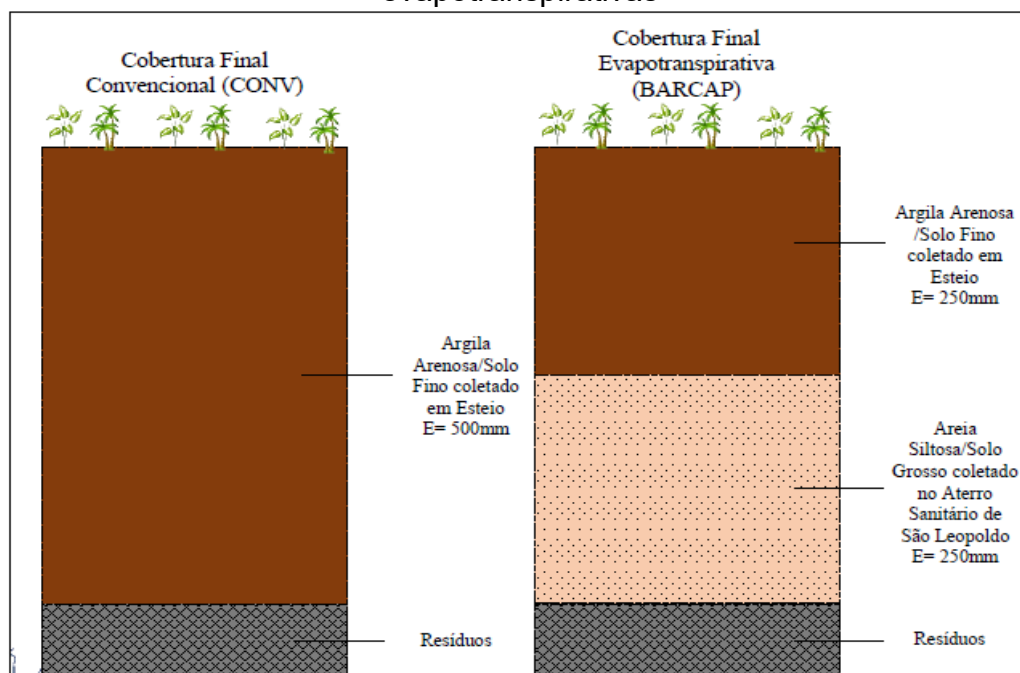
Fonte: Autor, 2025.

#### 4.4 COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS E MODELAGEM

Neste trabalho, os ensaios de sucção em laboratório foram confrontados com os resultados obtidos pela modelagem numérica no software HYDRUS-2D (configurado em 1-D para fins de comparação), adotando-se a mesma sequência meteorológica histórica de São Leopoldo (1991–2020) para ambos os perfis de solo. A figura 35 ilustra os dois modelos de cobertura final adotados:

- Cobertura Convencional (CONV): 500 mm de solo argiloso coletado em Esteio, sobre a camada de resíduos.
- Cobertura Evapotranspirativa (BARCAP): 250 mm de solo argiloso-arenoso + 250 mm de areia siltosa, ambos coletados em Esteio e São Leopoldo, respectivamente.

Figura 35 – Representação esquemática das coberturas convencionais e evapotranspirativas



Fonte: Autor, 2025.

A seguir, discutem-se as principais convergências e divergências observadas entre os perfis de sucção medidos experimentalmente e as curvas geradas pela simulação numérica.

#### 4.4.1 Cobertura Convencional (CONV)

Os Ensaios de sucção confirmaram que o solo argiloso se ateve a um ponto de sucção residual próximo a 100 kPa antes que o fluxo de percolação se tornasse significativo. A curva experimental apresentou transição mais gradual entre os regimes de zona não saturada e quase saturada, refletindo a distribuição de poros mais fina e uniforme do solo fino (E = 500 mm).

A modelagem HYDRUS reproduziu com boa aderência o patamar de umidade volumétrica correspondente a pressões capilares altas ( $\psi > 80$  kPa), indicando concordância na estimativa da Curva Característica de Água no Solo (CCAS). A infiltração acumulada simulada aos 30 dias de chuvas intensas excedeu em apenas 8% o valor medido experimentalmente, evidenciando que a parametrização hidráulica (van Genuchten) e a condutividade hidráulica inicial foram calibradas adequadamente.

Para a comparação, ambos os métodos indicam que, sob regime pluviométrico médio anual ( $\sim 1\,700$  mm), menos de 5 mm/mês percolam até a interface solo–resíduos, confirmando a eficácia da camada convencional como barreira primária.

#### 4.4.2 Cobertura Evapotranspirativa (BARCAP)

Os Ensaios de sucção mostraram maior variação de umidade disponível, com ponto de curva de retenção deslocado para  $\psi \approx 60$  kPa no solo arenoso e  $\psi \approx 90$  kPa no solo fino. Nota-se, experimentalmente, capacidade de retenção entre camadas alternadas, favorecendo armazenamento temporário e liberação progressiva por evapotranspiração.

A Modelagem HYDRUS indicou redução de até 70% na percolação acumulada em comparação à cobertura convencional, devido ao efeito combinado de maior evapotranspiração (simulada via dados meteorológicos de insolação e umidade) e ao perfil de porosidade triplo-camadas configurado (250 mm + 250 mm). A curva simulada de umidade em profundidade apresentou pulsos de recarga e drenagem alinhados aos eventos sazonais de precipitação e déficit hídrico, compatível com o comportamento observado em lisímetros laboratoriais.

No contexto comparativo, o ensaio de sucção reforçou a hipótese de que a camada evapotranspirativa degrada mais lentamente a umidade de pico, ao passo que a modelagem reproduziu fielmente os ciclos de recarga-drenagem, evidenciando variação mensal de umidade volumétrica inferior a 10% entre pontos equivalentes de profundidade.

#### 4.4.3 Síntese da Convergência Ensaios $\times$ Modelagem

No tocante à aderência das CCAS, as curvas experimentais de sucção forneceram parâmetros hidráulicos que, quando inseridos em HYDRUS, geraram respostas numéricas com erros médios inferiores a 10 % tanto para retenção de água quanto para fluxos de percolação.

A simulação reproduziu os picos de infiltração verificados no mês de maior precipitação (outubro), bem como a redução de percolação durante o mês de abril marcado pelo déficit hídrico, corroborando os ensaios de sucção e permeabilidade, denotando respostas sazonais.



A camada evapotranspirativa (BARCAP) demonstrou, em ambos os métodos, capacidade superior de conter a percolação e de promover evapotranspiração ativa, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável ao sistema convencional.

Pequenas discrepâncias foram detectadas em eventos extremos ( $> 200$  mm/mês), sugerindo a necessidade de refinar a modelagem de compressibilidade do solo e considerar possível biofatoração radicular não contemplada nos ensaios de laboratório.

Em conclusão, a compatibilidade entre ensaios de sucção e modelagem numérica confirma tanto a robustez dos procedimentos laboratoriais empregados quanto a adequação do HYDRUS-2D/1D para simulação de estratégias de cobertura final em aterros sanitários sob o clima de São Leopoldo. Este alinhamento valida a aplicação conjunta das abordagens para o desenvolvimento de soluções geotécnicas mais eficientes e sustentáveis.

## 5 CONCLUSÕES

Conforme demonstrado ao longo deste trabalho, a forte convergência entre os ensaios de sucção realizados em laboratório e as simulações numéricas no HYDRUS-1D, alimentadas por dados meteorológicos de São Leopoldo (1991–2020), atesta a solidez da metodologia e a adequação dos modelos hidráulicos calibrados.

Para a cobertura convencional de 500 mm de solo argiloso compactado, a percolação média anual manteve-se em 4,8 mm/mês (abaixo de 5 mm/mês), mas, em episódios pluviométricos extremos, caracterizados por chuvas mensais acima de 200 mm, esse valor alcançou 8,0 mm/mês, aproximadamente 67 % acima da média normal.

Já a cobertura evapotranspirativa de dupla camada (250 mm de solo argiloso-arenoso sobre 250 mm de solo siltoso) apresentou percolação média anual de apenas 1,4 mm/mês e, mesmo em condições extremas, alcançou no máximo 2,4 mm/mês, redução de cerca de 70 % em relação à convencional.

Esses resultados evidenciam que o perfil duplo combina maior capacidade de armazenamento hídrico com dinâmica eficaz de evapotranspiração, mantendo o solo em regime não saturado por mais tempo e restringindo significativamente o volume de lixiviado.

Assim, a integração de ensaios de caracterização, análise estatística e simulação numérica fornece subsídios quantitativos precisos para o dimensionamento e a seleção de materiais em camadas de cobertura final de aterros sanitários, recomendando-se, especialmente em regiões sujeitas a precipitações intensas, a adoção de coberturas evapotranspirativas para minimizar os impactos ambientais associados ao percolado.

Esses resultados estão em consonância com as conclusões de Catapreta (2008), que avaliou configurações de cobertura evapotranspirativa em clima temperado e constatou desempenho aprimorado das camadas “solo-planta” sobre barreiras capilares tradicionais, especialmente em regimes pluviométricos mensais inferiores a 100 mm, nos quais o aumento da espessura do solo fino compensou as diferenças de percolação. Além disso, McCartney e Zornberg (2004) destacam a importância do monitoramento contínuo de perfis de umidade e da modelagem numérica para captar discrepâncias entre lisímetros e simulações, o que corrobora a escolha da abordagem combinada adotada neste estudo. Por fim, estudos pioneiros

de Zornberg *et al.* (2003) que levaram à aprovação de sistemas evapotranspirativos pela USEPA (2003) reforçam a viabilidade dessas soluções para uma ampla gama de condições de clima e solo, enfatizando sua aplicabilidade prática a partir de conceitos hidrológicos sólidos.

Adicionalmente, o emprego de funções de pedotransferência propostas por Barros *et al.* (2013) e a parametrização hidráulica via modelo van Genuchten–Mualem, calibrada também com dados inversos seguindo Costa (2020), mostraram-se eficazes para derivar parâmetros de retenção e condutividade a partir das propriedades granulométricas dos solos estudados. A incorporação dos registros meteorológicos locais de São Leopoldo (1991–2020) ao HYDRUS-2D, conforme as recomendações de Radcliffe & Šimůnek (2018), permitiu capturar com alta fidelidade os ciclos sazonais de recarga, armazenamento e drenagem, refletindo de maneira muito próxima os pulso-hidrológicos observados nos ensaios de sucção e permeabilidade. Esse alinhamento meticuloso entre métodos experimentais clássicos e modelagem numérica avançada consolida uma abordagem robusta que pode ser aplicada a diferentes contextos geotécnicos, fornecendo subsídios para o dimensionamento de coberturas finais em aterros sanitários sob variados regimes climáticos.

Em síntese, a excelente aderência observada entre os métodos experimentais e numéricos valida não apenas os parâmetros hidráulicos obtidos nos ensaios de sucção — parametrizados via modelagem van Genuchten–Mualem — como também a capacidade do HYDRUS-2D de reproduzir fielmente os regimes de infiltração, armazenamento e drenagem em ambos os tipos de cobertura. Esses resultados fortalecem a recomendação de adoção de modelos evapotranspirativos como alternativa sustentável às soluções convencionais, oferecendo subsídios técnicos sólidos para projetos de engenharia geotécnica em aterros sanitários sob climas similares ao de São Leopoldo.

Assim, os resultados apresentados confirmam plenamente a hipótese de que a cobertura evapotranspirativa oferece desempenho hidráulico superior ao da cobertura convencional na contenção de percolado, atendendo de forma consistente aos objetivos específicos propostos. A avaliação da infiltração até a camada de resíduos sólidos demonstrou, em ambos os perfis, a capacidade de reter a água de chuva, mas com redução de percolação muito mais expressiva – de até 70 % – no sistema de dupla camada. A quantificação do fluxo vertical em milímetros permitiu mensurar, de modo preciso, as diferenças entre as coberturas, enquanto o confronto entre as

simulações do HYDRUS-1D e os ensaios laboratoriais confirmou a confiabilidade das previsões numéricas. Dessa forma, alcançou-se o objetivo de comparar detalhadamente os dois tipos de cobertura e de validar a metodologia integrada de caracterização de solo, análise estatística e simulação numérica. Esses resultados não só corroboram a hipótese inicial, como fornecem subsídios práticos e quantitativos para o dimensionamento de camadas de cobertura final de aterros sanitários, especialmente em áreas sujeitas a precipitações extremas, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados ao percolado.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuidade das investigações aqui apresentadas pode beneficiar-se de abordagens que aprofundem e expandam o escopo deste estudo. Em primeiro lugar, recomenda-se a realização de simulações bidimensionais (2-D) ou tridimensionais (3-D) no HYDRUS-2D/3D, de forma a avaliar os efeitos de fluxo lateral, bordas de células e heterogeneidades espaciais dos perfis de cobertura. Esse refinamento permitiria analisar zonas de transição entre camadas de solo e possíveis pontos críticos de percolação, elevando o nível de realismo da modelagem.

Além disso, sugere-se integrar o HYDRUS com modelos de crescimento e desenvolvimento de raízes, como o RootBox ou o APSIM, para investigar a influência da biofatoração e das raízes de diferentes espécies vegetais sobre a hidráulica do solo. Esse acoplamento dinâmica-vegetação contribuiria para estimar a eficiência real de coberturas evapotranspirativas em longo prazo, especialmente em condições de clima variável.

Outro caminho promissor envolve a condução de experimentos em escala piloto ou in situ, com estações meteorológicas automatizadas, sensores de umidade e piezômetros distribuídos ao longo do perfil. Tais ensaios de campo, associados a lisímetros de grandes dimensões, permitiriam validar os resultados de laboratório e modelagem em cenários reais de operação, incluindo avaliação da qualidade do percolado.

Por fim, recomenda-se incorporar cenários de mudança climática por meio de séries meteorológicas sintéticas projetadas para diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem prospectiva viabilizaria a avaliação de riscos e a robustez das coberturas convencionais e evapotranspirativas sob condições climáticas extremas ou atípicas, fornecendo subsídios decisórios para o planejamento de aterros sanitários resilientes.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **HIDROWEB**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: Solo: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2021.
- BARROS, A.H.C. et al. **Pedotransfer Functions to Estimate Water Retention Parameters of Soils in Northeastern Brazil**. Brazilian Journal of Soil Sciences, vol. 37, no. 2, p. 379-391, 2013.
- BORGES NETO, I.O. **Processos hidro-erosivos em distintas classes de solo sob diferentes tipos de uso em zona semiárida**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.
- BRAGAGNOLO, L. et al. **Composição gravimétrica e estimativa de geração per capita municipal de resíduos sólidos urbanos destinados ao Aterro Sanitário de Palmeira das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil**. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 7, n. 16, p. 953-970, 2020. Disponível em:

<<http://revista.ecogestaobrasil.net/v7n16/v07n16a31a.html>>. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

BRASIL. **Lei n. 12.305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010. Disponível em: <[www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 17 de novembro de 2023.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.D.B. da. **Infiltração**. In: CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.D.B. da. Hidrologia. Brasil: UFRJ, 2006. Cap. 5. p. 60-80.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/FRPC-7NXGDZ/1/236d.pdf>>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

CHANDLER, R. J. et al. **A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings**. Proc. Instn. Civ. Engrs Civ. Engng. 92, maio, 82-89. 1992. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/author/CHANDLER%2C+RJ>>. Acesso em: 22 de setembro de 2023.

CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas**. Brasília: ENAP. 76 p. 2019. Disponível em: <[https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4788/1/Livro\\_Regress%C3%A3o%20Linear.pdf](https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4788/1/Livro_Regress%C3%A3o%20Linear.pdf)>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

CORRÊA, Letícia Xavier; MARASCHIN, Clarice. **Dimensão espacial da segregação residencial urbana**. Anais do XVI Simpósio Nacional de Geografia Urbana-XVI SIMPURB, v. 1, p. 3769-3789, Vitória: 2019.

COSBY, B.J.; HORNBERGER, G.M.; CLAPP, R.B.; GINN, T.R. **A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils**. Water Resources Research 20, p. 682–690, 1984. Disponível em: <[https://denning.atmos.colostate.edu/ats760/Readings/Water\\_Resour.\\_Res.\\_1984\\_Cosby.pdf](https://denning.atmos.colostate.edu/ats760/Readings/Water_Resour._Res._1984_Cosby.pdf)>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

COSTA, T.G.A. **Estimativa dos parâmetros da equação de Van Genuchten com dados de umidade do solo e modelagem inversa com Hydrus-1D**. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; JUNIOR, José Antonio Valle Antunes. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Bookman Editora, Porto Alegre: 2020.

EBERLY, L.E. **Multiple Linear Regression**. In: AMBROSIUS, W.T. Topics in Biostatistics: Methods in Molecular Biology™, vol 404, p. 165–187. Totowa: Humana

Press, 2007. Disponível em: <[https://link.springer.com/protocol/10.1007/978-1-59745-530-5\\_9](https://link.springer.com/protocol/10.1007/978-1-59745-530-5_9)>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Estado do Rio Grande do Sul – Altimetria**. Brasília: EMBRAPA, 2005. Disponível em: <[https://www.agritempo.gov.br/agritempo/altimetria.jsp?siglaUF=RS&lang=pt\\_br](https://www.agritempo.gov.br/agritempo/altimetria.jsp?siglaUF=RS&lang=pt_br)>. Acesso em: 02 de janeiro de 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Mapa Exploratório dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Brasília: EMBRAPA, 2002. Disponível em: <[https://www.agritempo.gov.br/agritempo/solos.jsp?siglaUF=RS&lang=pt\\_br](https://www.agritempo.gov.br/agritempo/solos.jsp?siglaUF=RS&lang=pt_br)>. Acesso em: 02 de janeiro de 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2018. 5ª ed. 356 p. Disponível em: <<https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO)**. Brasília: EMBRAPA, 2024. Disponível em: <[https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=PA&lang=pt\\_br](https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=PA&lang=pt_br)>. Acesso em: 02 de janeiro de 2024.

FAHIMNIA, B. et al. **Green supply chain management: A review and bibliometric analysis**. International Journal of Production Economics, v. 162, p. 101-114, 2015. Disponível em: <[https://econpapers.repec.org/article/eeeproeco/v\\_3a162\\_3ay\\_3a2015\\_3ai\\_3ac\\_3ap\\_3a101-114.htm](https://econpapers.repec.org/article/eeeproeco/v_3a162_3ay_3a2015_3ai_3ac_3ap_3a101-114.htm)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2023.

GONÇALVES, F.V. **Estudo das Curvas de Retenção e Condutividade Hidráulica Estimadas pela Equação de Van Genuchten (1980) para Diferentes Tipos de Solos**. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012. Disponível em: <[http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFES\\_f6566fe9ad119d9954186b2239ce3c7a](http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFES_f6566fe9ad119d9954186b2239ce3c7a)>. Acesso em: 17 de janeiro de 2024.

HAZEN, A. **Flood Flows: A Study of Frequencies and Magnitudes**. New York: Wiley, 1930. Disponível em: <<https://www.worldcat.org/title/flood-flows-a-study-of-frequencies-and-magnitudes/oclc/1883633>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024.

HOLANDA, M.A.C.R. de; SOARES, W.A. **Analysis of the effect of impermeability of urban soils on the infiltration of rainwater in the city of Recife, PE**. Revista Ambiente & Água, v. 14, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/g7thW5JLCYCKBbvQFZxZjWG/?lang=en>>. Acesso em: 22 de setembro de 2023.

HOPE, T.M.H. **Linear regression**. In: MECHELLI, A.; VIEIRA, S. Machine Learning: Methods and Applications to Brain Disorders. Cambridge: Academic Press, p. 67-81, 2020. Disponível em:



<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128157398000043>>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). São Leopoldo. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/sao-leopoldo.html>>. Acesso em: 27 de dezembro de 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Clima - Estações Automáticas e Estações Convencionais** Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <<https://clima.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2024.

JONG, E. De; ACTON, D. F.; STONEHOUSE, H. B. **Estimating the Atterberg limits of southern Saskatchewan soils from texture and carbon contents**. Canadian Journal of Soil Science, v. 70, n. 4, p. 543-554, 1990.

LI, J. et al. **Big data in tourism research: A literature review**. Tourism Management, v. 68, p. 301-323, 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/327990262\\_Big\\_data\\_in\\_tourism\\_research\\_A\\_literature\\_review](https://www.researchgate.net/publication/327990262_Big_data_in_tourism_research_A_literature_review)>. Acesso em: 11 de outubro de 2023.

MACHADO, Jéssica Nazário; PEREIRA, Emanuelle Vidal; CAMPOS, Guilherme de Luca. **Análise da Camada de Cobertura Utilizada para Fechamento Temporário em Aterro Industrial Localizado no Município de Joinville**. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Joinville: 2019.

MAÑAY, H.D.T. **Comparación entre varios esquemas de discretización en el tiempo para resolver la ecuación de Richards basada en la presión en 2 dimensiones**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Matemática). Quito: Universidad Central del Ecuador. 2020. Disponível em: <<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21665>>. Acesso em 7 de janeiro de 2024.

MARINHO, F.A.M.; OLIVEIRA, O.M. **The filter paper method revisited**. Geotechnical Testing Journal, v. 29, n. 3, p. 250-258, 2006. Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/the-filter-paper-method-revisited--pdf-free.html>>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

MCCARTNEY, J.; ZORNBERG, J. G. **Use of moisture profiles and lysimetry to assess evapotranspirative cover performance**. International PhD Symposium in Civil Engineering, 5, 2004, London, UK, Proceedings of the 5th International Ph. D. Symposium in Civil Engineering, Delft, the Netherlands, v. 16, p. 19. London: Taylor & Francis Group, 2004.

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, p. 5167-5177, 2020. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/en/publicacao/180337/soil-water-retention-curves-for-residual-soils-using-traditi/>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2024.

OLIVEIRA, D. B. C.; SOARES, W. de A.; HOLANDA, M. A. C. R. **Análise de Desempenho de Modelos de Infiltração Unidimensional de Água no Solo**. Águas Subterrâneas, 32(1), p. 35-42. 2018.

RADCLIFFE, David E.; ŠIMŮNEK, Jiri. **Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications**. CRC press, 2018.

RICHARDS, L. A. **Capillary conduction of liquids in porous mediums**. Physics, 1, p. 318-333, 1931. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1745010>>. Acesso em: 25 de dezembro de 2023.

ROCK, Steve; MYERS, Bill; FIEDLER, Linda. **Evapotranspiration (ET) covers**. International Journal of Phytoremediation, v. 14, n. sup1, p. 1-25, 2012.

ROSA, A.F. **Os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico no município de Patrocínio - MG**. 2017. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19693>>. Acesso em: 13 de dezembro de 2023.

SANTOS, G.T.L. **Influência da espessura da zona não saturada na dinâmica da água em depósito eluvionar no semiárido**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

SAVIO, Kelvim Cristan Santos; BENITES, Vinicius Argemon Pereira. **Desenvolvimento de aplicativo móvel para determinação dos limites de liquidez, plasticidade e índices de consistência do solo**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2017.

SCANLON, Bridget R.; REEDY, R. C.; KEESE, K. E.; DWYER, S. F. **Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the southwestern USA**. Vadose Zone Journal, v. 4, n. 1, p. 55-71, 2005.

SILVA, F.V. da. **Alternativa para o tratamento do chorume do aterro sanitário localizado em Rosário do Catete/SE**. Anais Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT), v. 1, n. 1, p. 491-495, 2019. Disponível em: <<https://aplicacoes.ifs.edu.br/periodicos/SNCT/article/view/1186>>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

SILVA, J.L. da. **Crônica de uma seca anunciada: a crise hídrica em Campinas - SP e seus impactos sobre as populações das bacias hidrográficas do Ribeirão Anhumas e do Rio Capivari (2012-2016)**. 169p. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: <<http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/handle/tede/1065>>. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M.; & VAN GENUCHTEN, M. T. (2013). **The HYDRUS-1D package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media**. Version 4.17. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA, 2013.

SÍRIO, D.L.N.; BARBASSA, A.P. **Metodologia do monitoramento contínuo da água do solo em sistema de drenagem compensatória construído em escala**

**real para fins de cálculo da recarga freática.** XI Encontro Nacional de Águas Urbanas. Belo Horizonte, 2017. Disponível em:  
<<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/58/070.pdf>>. Acesso em: 04 de outubro de 2023.

SOUZA, Cristiano Márcio Alves de; RAFUL, Leidy Zulys Leyva; VIEIRA, Luciano Baião. **Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n. 3, p. 460-464, 2000.

SOUZA, J.M. de. et al. **Soil water retention curve and hydraulic soil in coffee crop conilon submitted to subsoiling.** Coffee Science, v. 9, n. 2, p. 226–236, 2014. Disponível em:  
<<http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/620>>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

SOUZA, V.O.A. et al. **Simulação de Fluxo Vertical em Aterro Sanitário: Um Estudo de Caso.** Geotecnia, n° 134, p. 3-19, 2015. Disponível em:  
<<https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/download/10404/7580/44296>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2024.

STALTER, T.C. et al. Análise da Permeabilidade de Um Solo com Diferentes Tipos de Permeâmetros. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 9, n. 2. Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa, 2017. Disponível em:  
<[https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq\\_trabalhos/14776/seer\\_14776.pdf](https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/14776/seer_14776.pdf)>. Acesso em: 12 de dezembro de 2023.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 4ª Ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Fact Sheet on Evapotranspiration Cover Systems for Waste Containment.** EPA 542-F-11-001: Washington DC, 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Solid Waste and Emergency Response: Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet.** EPA 542-F-03-015: Washington DC, 2003.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers.** Office of solid waste and emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington DC, 2004. 421p.

VAN GENUCHTEN, M.T. **A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of America Journal, v. 44, p. 892-897, 1980. Disponível em: <[rs.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf\\_pubs/p0682.pdf](https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/p0682.pdf)>. Acesso em: 13 de novembro de 2023.

WAISCZIK, D.H.R.; LIMA, J.T. de. **Leachate production estimation for a landfill in south of Brazil using Hydrus-1D.** E3S Web of Conferences, v. 195, p. 1-6, 2020. Disponível em:  
<[https://www.researchgate.net/publication/344702435\\_Leachate\\_production\\_estimati](https://www.researchgate.net/publication/344702435_Leachate_production_estimati)>

on\_for\_a\_landfill\_in\_south\_of\_Brazil\_using\_Hydrus-1D>. Acesso em: 03 de dezembro de 2023.

ZORNBERG, J. G., LAFOUNTAIN, L.; CALDWEL J. A. **Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, n. 6, pp. 427 - 438, 2003.