



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

TALES VINICIUS SEVERINO DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS NAS
CAMADAS SUBSUPERFICIAIS, DE UMA BARRAGEM SUBTERRÂNEA POR
MEIO DA METODOLOGIA BEERKAN**

RECIFE
2024

TALES VINÍCIUS SEVERINO DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS NAS
CAMADAS SUBSUPERFICIAIS, DE UMA BARRAGEM SUBTERRÂNEA POR
MEIO DA METODOLOGIA BEERKAN**

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências – CTG, como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares.

Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos na Agricultura e Meio Ambiente / Física dos Solos.

Orientador: Prof. Dr. Severino Martins dos Santos Neto

Coorientador: Prof. Dr. José Miguel Reichert

RECIFE
2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Tales Vinicius Severino Dos.

Caracterização das propriedades hidrodinâmicas nas camadas subsuperficiais, de uma barragem subterrânea por meio da Metodologia Beerkan / Tales Vinicius Severino Dos Santos. - Recife, 2024.

51f.: il.

Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Centro de tecnologia e geociências, Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2024.

Orientação: Severino Martins dos Santos Neto.

1. semiárido; 2. tecnologias sócio hídricas; 3. curva de retenção. I. Neto, Severino Martins dos Santos. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 621.48

TALES VINÍCIUS SEVERINO DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS NAS
CAMADAS SUBSUPERFICIAIS, DE UMA BARRAGEM SUBTERRÂNEA POR
MEIO DA METODOLOGIA BEERKAN**

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências – CTG, como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares.

Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos na Agricultura e Meio Ambiente / Física dos Solos.

Aprovado em: 16/04/2024

BANCA EXAMINADORA

Dra. Zahily Herrero Fernández (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Dr. Antonio Celso Dantas Antonino (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Dr. Allan de Almeida Albuquerque (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha gratidão a Deus pela constante orientação, força e sabedoria que me acompanharam em todas as etapas deste processo. Sua presença foi meu suporte nos momentos difíceis e minha inspiração nos momentos de incerteza.

À minha estimada família, manifesto profunda gratidão pelo apoio incondicional, amor e compreensão que sempre me foram oferecidos. Seu encorajamento constante e apoio foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao meu dedicado orientador, Professor Dr. Severino Martins dos Santos Neto, e ao co-orientador, Professor Dr. José Miguel Reichert, expresso meus agradecimentos pela orientação especializada, paciência e compromisso demonstrados ao longo deste projeto. Seus conselhos e feedback foram de inestimável valor para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos membros da banca de defesa da dissertação, Professor Antonio Celso Dantas Antonino, Professora Zahily Herrero Fernández, e ao Professor Allan de Almeida Alburquerque, expresso minha gratidão pela atenção e pelas contribuições que proporcionaram o aprimoramento deste projeto.

Aos amigos, colegas de pesquisa, professores e toda a equipe envolvida no aspecto prático e computacional deste trabalho, e à equipe do Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Engenharia de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), manifesto minha sincera gratidão por estarem ao meu lado, oferecendo apoio emocional, compartilhando ideias e tornando esta jornada mais significativa. Suas contribuições foram de suma importância e enriqueceram profundamente este trabalho.

Também expresso minha gratidão a todos os que, de alguma maneira, contribuíram para este projeto, seja de forma direta ou indireta. Cada gesto de colaboração foi reconhecido e teve um papel significativo na conclusão deste trabalho.

Por fim, renovo meus agradecimentos a todos os mencionados por fazerem parte desta jornada e por sua valiosa contribuição para o sucesso desta dissertação.

RESUMO

A falta de água é um dos principais problemas enfrentados na região semiárida. A implantação de barragens subterrâneas representa uma significativa contribuição para as comunidades que habitam o semiárido, constituindo-se como uma tecnologia socio-hídrica crucial. Essas estruturas são recarregadas durante o período chuvoso, armazenando água nos poros do aluvião para uso durante os períodos de estiagem. Nesse contexto, a compreensão das propriedades hidrodinâmicas do solo se revela de suma importância, pois influenciam diretamente na dinâmica da barragem. Este estudo teve como objetivo caracterizar as propriedades hidrodinâmicas do solo em uma trincheira localizada no agreste do estado de Pernambuco, empregando a metodologia Beerkan para determinar os parâmetros de forma e normalização das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$. A determinação dessas características hidrodinâmicas, seja através de análises laboratoriais ou em campo, geralmente demanda um grande volume de informações, tornando o processo demorado e oneroso. Os resultados obtidos revelaram os parâmetros de forma (m , n , η) e os de normalização (θ_s , K_s , h_g), os quais foram utilizados para obter as curvas de retenção e de condutividade hidráulica da água nos solos estudados. Concluiu-se que o método Beerkan se mostrou apropriado, robusto e totalmente adaptado para modelar a infiltração tridimensional no campo. Os ensaios granulométricos revelaram três tipos de texturas distintas dentro do perfil de solo de 120 cm da barragem subterrânea localizada na região semiárida pernambucana, sendo franco arenoso, areia franca e arenoso. Por meio do método Beerkan, foram obtidos resultados consistentes para os parâmetros de forma e de normalização dos solos estudados, alinhados com o que é reportado na literatura. Os resultados também demonstraram que existe uma variação relevante das propriedades hidrodinâmicas entre as cinco camadas de solo que compõe o perfil do depósito aluvionar em que a barragem foi implementada. As variações ficam evidentes quando se analisa os parâmetros de normalização e principalmente nas curvas de condutividade hidráulica e de retenção da água no solo fornecidas pelo Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST).

Palavras-Chave: semiárido, aluvião, tecnologias sócio hídricas, curva de retenção, condutividade hidráulica, infiltração

ABSTRACT

The lack of water is one of the main problems faced in the semi-arid region. The implementation of underground dams represents a significant contribution to the communities that inhabit the semi-arid region, constituting a crucial socio-water technology. These structures are recharged during the rainy season, storing water in the pores of the alluvium for use during dry periods. In this context, understanding the hydrodynamic properties of the soil is extremely important, as they directly influence the dynamics of the dam. This study aimed to characterize the hydrodynamic properties of the soil in a trench located in the countryside of the state of Pernambuco, using the Beerkan methodology to determine the shape parameters and normalization of the $\theta(h)$ and $K(\theta)$ curves. Determining these hydrodynamic characteristics, whether through laboratory or field analyses, generally requires a large volume of information, making the process time-consuming and costly. The results obtained revealed the shape parameters (m , n , η) and normalization parameters (θ_s , K_s , h_g), which were used to obtain the water retention and hydraulic conductivity curves in the studied soils. It was concluded that the Beerkan method proved to be appropriate, robust and fully adapted to model three-dimensional infiltration in the field. The granulometric tests revealed three different types of textures within the 120 cm soil profile of the underground dam located in the semi-arid region of Pernambuco, being sandy loam, loam sand and sandy loam. Using the Beerkan method, consistent results were obtained for the shape and normalization parameters of the studied soils, in line with what is reported in the literature. The results also demonstrated that there is a relevant variation in hydrodynamic properties between the five layers of soil that make up the profile of the alluvial deposit in which the dam was implemented. The variations become evident when analyzing the normalization parameters and mainly in the hydraulic conductivity and soil water retention curves provided by Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST).

Keywords: semiarid, alluvium, socio-water technologies, retention curve, hydraulic conductivity, infiltration

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho médio das partículas do solo.	13
Tabela 2 - Teores das partículas, massa específica e classes texturais das 5 camadas que compõem o perfil da barragem subterrânea.	39
Tabela 3 - Resultado dos parâmetros de forma das funcionais de n , m e η	42
Tabela 4 - Análise média dos parâmetros hidrodinâmicos.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama de Classes Textuais.	14
Figura 2 - O solo como um sistema trifásico.	15
Figura 3- Localização da área de estudo.	31
Figura 4 - Série histórica de precipitação pluviométrica do município de Vertentes do Lério-PE.....	32
Figura 5 - Barragem Subterrânea em Estudo.....	32
Figura 6 - a) Poço amazonas escavado rente ao barramento; b) Poço amazonas escavado cerca de 50 metros do barramento.	33
Figura 7- Registros do cultivo de forrageira na região de acúmulo da barragem.	34
Figura 8 - Descrição da parede da trincheira escavada, destacando as 5 camadas identificadas; b) Início dos ensaios e coletas na parede da trincheira, com as respectivas identificações das camadas.	35
Figura 9 - Fluxograma da Execução dos ensaios de sedimentação e peneiramento pertinentes aos experimentos de granulometria.....	36
Figura 10 - Ensaios de infiltração na parede da trincheira.	38
Figura 11 - Curvas granulométricas das 5 camadas de solo da barragem subterrânea. .	39
Figura 12 - Diagrama de Classes Texturais dos Solos	40
Figura 13 - Curvas médias de infiltração acumulada das 5 camadas da barragem subterrânea. A) Superfície; B) Camada 2; C) Camada 3; D) Camada 4 e E) Camada 5.	42
Figura 14 - Curva de Condutividade Hidráulica.	44
Figura 15 - Curvas de retenção da água no solo.....	45

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVOS	12
2.1.	Objetivo Geral.....	12
2.2.	Objetivos Específicos.....	12
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1.	Solos: Principais Conceitos e Relações	13
3.2.	Distribuição Vertical da Água no Solo	17
3.2.1.	Movimentação da Água no Solo	17
3.2.2.	Infiltração do solo.....	17
3.2.3.	Heterogeneidade do Solo.....	18
3.2.4.	Lei de Darcy	18
3.3.	Propriedades Hidrodinâmicas do Solo.....	18
3.3.1.	Curva de Retenção da Água no solo $\theta(H)$	20
3.3.2.	Curva de Condutividade Hidráulica $K(\theta)$	21
3.4.	Metodologia Beerkan.....	22
3.5.	Barragem Subterrânea.....	27
3.6.	Região Semiárida: Principais Características	29
3.6.1.	Geologia e Vegetação	30
4.	METODOLOGIA.....	31
4.1.	Área de Estudo.....	31
4.2.	Caracterização do Subsolo da Barragem Subterrânea	34
4.3.	Caracterização das Propriedades Hidrodinâmicas da Barragem Subterrânea	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1.	Distribuição da Curva Granulométrica e Textura.....	39
5.2.	Propriedades Hidrodinâmicas dos Solos.....	41
6.	CONCLUSÕES	46
7.	REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

A escassez de água é uma problemática crescente em todas as regiões do planeta, afetando bilhões de pessoas. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2020), mais da metade da população no mundo enfrenta grave escassez de água durante pelo menos um mês por ano. Um dos principais fatores é a demanda sobre os recursos hídricos desproporcionada, afetando a disponibilidade hídrica em várias regiões do planeta (Tao et al., 2023). Além disso, as alterações climáticas alteram os padrões e aumentam as incertezas, provocadas pelos fenômenos meteorológicos extremos, que agravam a escassez de água em muitas regiões (Lazaro et al., 2023; Marengo et al., 2017). A população que vive em áreas com escassez de água no mundo aumentou de 2,04 para 2,36 bilhões entre 2010 e 2020 e estima-se que este número atinja 2,70 bilhões de pessoas até 2030 (Dougahneh et al., 2023).

Em regiões semiáridas, como o nordeste brasileiro, essa problemática é intensificada devido às condições climáticas e geológicas da região. Fatores climáticos como elevada temperatura, elevadas taxas de evapotranspiração, baixas precipitações, chuvas irregulares e concentradas, ocasionam um balanço hídrico negativo. Esses fatores quando associados ao embasamento cristalino aflorante e solos rasos, diminuem a possibilidade de armazenamento de água superficial e subterrânea, afetando diretamente o abastecimento hídrico da população dessa região. De acordo com dados do Monitor de Secas do Nordeste, em junho de 2021, cerca de 77% da região estava em situação de seca, com mais de 5,6 milhões de pessoas afetadas. A falta de água tem consequências graves para a região, afetando a agricultura, o abastecimento de água potável, a geração de energia e a saúde da população.

Para enfrentar esse desafio, os gestores têm desenvolvido políticas e programas de gestão de recursos hídricos para regiões semiáridas, incluindo a implementação de sistemas de captação e armazenamento de água. Nesse contexto, existem um conjunto de tecnologias de baixo custo utilizadas no semiárido brasileiro, que possibilitam o aproveitamento da água, permitindo o abastecimento humano, a dessedentação animal e a irrigação na agricultura, garantindo a segurança alimentar das famílias (Lima et al, 2013). Assim ocorre a introdução do conceito de tecnologias sócio hídricas, que se referem às cisternas de placa, cisterna, calçadão e barragens subterrâneas, que contribuem para diminuir os impactos dos períodos críticos de escassez hídrica (Andrade et al, 2023). Dentre as tecnologias adotadas para o abastecimento de água em áreas que convivem com o déficit hídrico, destaca-se o uso de barragens subterrâneas.

As barragens subterrâneas são construções hidro ambientais estabelecidas comumente em depósitos aluvionares, como rios e córregos intermitentes que secam periodicamente. Seu propósito é captar o fluxo de água subterrânea ao instalar paredes verticais, direcionando-se aos leitos dos aquíferos aluviais e, assim, interrompendo o fluxo de água. Esse mecanismo permite o acúmulo de água no subsolo e a sua exploração (Kharazi et al., 2019; Ritchie; Eisma; Parker, 2021; Melo et al, 2011; Lima 2013).

Nas regiões semiáridas existe um grande número de barragens subterrâneas, devido principalmente à sua facilidade de construção e baixa manutenção (Santos et al.,

2016). Porém, alguns fatores negativos e limitações podem contribuir para a degradação dos recursos hídricos, como a salinização e sodificação da água, o que pode resultar na redução da produtividade dos plantios e na inadequação do seu uso tanto para consumo humano quanto animal. Por este motivo existem vários fatores que são considerados para construção de uma barragem subterrânea, tais como as características morfológicas e geológicas da região, além de aspectos sociais como a densidade populacional, a demanda hídrica e aspectos climáticos como a quantidade de precipitação.

A capacidade de armazenamento da água está diretamente relacionada a alguns índices físicos do solo, como a textura, a estrutura e a porosidade do solo, sendo cruciais para locação de barragens, bem como, para o manejo da água armazenada ao longo dos períodos críticos de escassez. Outro fator importante relacionado ao solo de um barramento subterrâneo é o seu comportamento hidrodinâmico. Por exemplo, o fenômeno de infiltração da água no solo vai influenciar na velocidade de recarga de uma barragem subterrânea, e a condutividade hidráulica saturada implica diretamente no fluxo subterrâneo do aquífero (Kool et al., 2019; Yost et al., 2019; Zubelzu et al., 2019; Nasta et al., 2013). Nesse sentido, parâmetros como a sorvidade e a condutividade hidráulica saturada são necessários para descrever a infiltração com modelos de base física (Touma et al., 2007, Rahmati et al., 2020). A sorvidade define a capacidade de um solo de conduzir água por capilaridade e varia com o conteúdo inicial e final de água do solo. A condutividade hidráulica do solo saturado representa a vazão relacionada exclusivamente à gravidade em um solo saturado e ambos os parâmetros dependem da estrutura do solo.

Existem vários métodos aplicados para determinar os parâmetros hidrodinâmicos do solo, porém muitos dos métodos de campo são onerosos, imprecisos e necessitam de um longo tempo de execução. Nesse sentido, o método Beerkan é considerado eficiente, de baixo custo e simples execução, quando comparado aos demais métodos.

Muitas investigações que visam determinar as propriedades hidrodinâmicas em solos, simplificam o subsolo em uma composição homogênea (Graciosa et al., 2008), considerando a caracterização apenas da superfície do solo como um valor representativo do perfil. A hipótese que o perfil de solo homogêneo pode não ser adequada, pois um perfil de solo é uma composição naturalmente heterogênea. O subsolo frequentemente é formado por diferentes estratificações que podem variar bastante quanto às dimensões, geometrias e composição. Portanto, estudar a arquitetura do perfil e considerar as camadas heterogêneas do solo vão permitir uma caracterização do comportamento hidrodinâmico do depósito aluvionar mais preciso. Negligenciar que a zona não saturada é um meio heterogêneo, pode acarretar erros de estimativa, como por exemplo, o armazenamento de água no solo (Coutinho et al., 2016).

Desta maneira o objetivo desse trabalho é a caracterização hidrodinâmica das camadas subsuperficiais de uma barragem subterrânea localizada no município de vertentes do lério com a realização de ensaios com infiltrômetro de anel simples em diferentes camadas do perfil do depósito aluvionar.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar a caracterização das propriedades hidrodinâmicas de uma camada subsuperficial em uma barragem subterrânea.

2.2. Objetivos Específicos

- i. Efetuar a caracterização hidrodinâmica do solo utilizando infiltrometria de anel simples através do método Beerkan;
- ii. Modelagem das curvas de retenção da água no solo e das curvas de condutividade da água no solo usando o algoritmo BEST;
- iii. Avaliar os impactos da heterogeneidade das propriedades hidrodinâmicas na dinâmica da barragem.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Solos: Principais Conceitos e Relações

Os solos são sistemas complexos e dinâmicos, resultantes da interação entre os fatores climáticos, geológicos, biológicos e topográficos ao longo do tempo. Um dos conceitos centrais é a textura, que se refere à proporção de partículas de areia, silte e argila, influenciando diretamente sua capacidade de retenção de água, permeabilidade e fertilidade. Segundo Ghazavi et al. (2020), solos com alta porcentagem de argila tendem a reter mais água do que solos com alta porcentagem de areia. Além disso, a textura do solo também pode afetar a capacidade de infiltração de água no solo. Solos com alta porcentagem de argila podem apresentar menor taxa de infiltração de água, devido à maior compactação das partículas, enquanto solos com alta porcentagem de areia podem apresentar maior taxa de infiltração, devido à maior permeabilidade do solo (Brady e Weil, 2013). Essa propriedade pode ser relevante para a seleção de culturas adequadas e para o manejo da irrigação em áreas agrícolas. Além disso, as propriedades físicas, como densidade, porosidade e estrutura do solo, também desempenham um papel crucial na determinação da sua capacidade de suporte para as plantas, bem como na sua capacidade de armazenar e movimentar água e nutrientes.

Outro aspecto importante é a relação entre a matéria orgânica e a fertilidade do solo. A matéria orgânica é essencial para a formação e manutenção da estrutura do solo, proporcionando nutrientes essenciais para o crescimento das plantas e promovendo a atividade biológica benéfica no solo. Além disso, a interação entre os minerais do solo e a matéria orgânica influencia a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a capacidade de retenção de água do solo. Compreender essas relações é fundamental para o desenvolvimento de práticas de manejo sustentável e para maximizar a produtividade agrícola.

A classificação das classes e os tamanhos das partículas do solo são baseados no diâmetro das partículas de solo. Segundo a Embrapa Solos (2021), as partículas do solo são classificadas em três grupos principais, com base no tamanho: areia, silte e argila. A Tabela 1 apresenta a classificação das classes e os tamanhos das partículas do solo, conforme o Sistema Internacional de Unidades (SI):

Tabela 1 - Tamanho médio das partículas do solo.

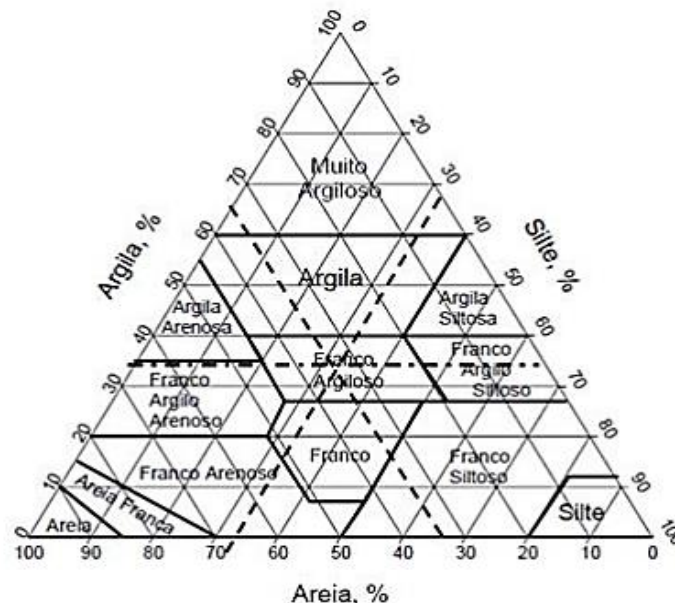
Fração do Solo	Diâmetro da Partícula
Areia Grossa	2 a 0,2 mm
Areia Fina	0,2 a 0,05 mm
Silte	0,05 a 0,002 mm
Argila	Menor que 0,002 mm

Fonte: Adaptado da Sociedade Brasileira do solo

O conceito de classes de textura do solo é baseado na combinação das proporções de classes de partículas, resultando em um número imenso de possibilidades. Para organizar de forma esquemática e funcional essas combinações, foi desenvolvido o

sistema conhecido como triângulo textural (Prevedello & Armindo, 2015). Esse sistema é composto pela sobreposição de três triângulos isósceles, que representam as proporções relativas de argila, silte e areia presentes no solo (Figura 1).

Figura 1- Diagrama de Classes Textuais.



Fonte: Sociedade brasileira de ciência do solo (2023)

O uso do triângulo textural é amplamente difundido na área de ciência do solo, sendo uma ferramenta importante para a caracterização da textura do solo. Esse conhecimento é fundamental para a escolha das práticas de manejo mais adequadas para cada tipo de solo, uma vez que a textura é um dos principais fatores que influenciam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

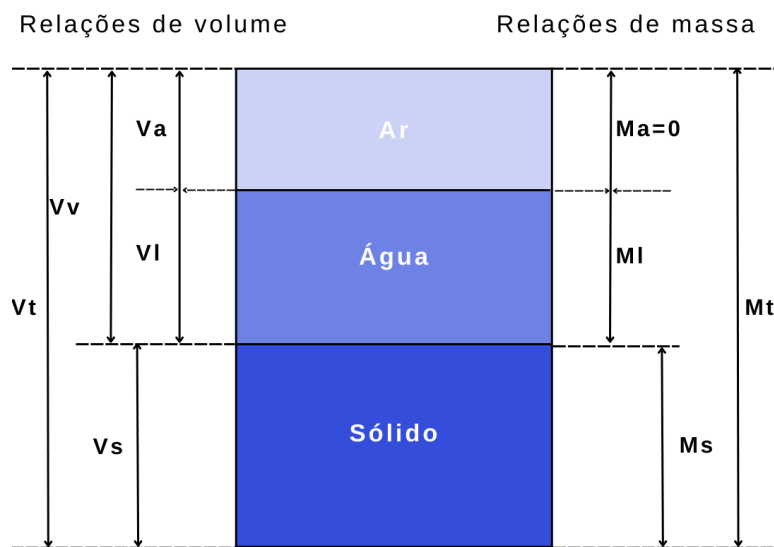
Segundo Reinert e Reichert (2006), a estrutura do solo é definida como a organização das partículas em agregados, e está diretamente relacionada com a distribuição desses agregados no volume de solo. Além disso, a estrutura também pode ser determinada pelo arranjo dos poros, que incluem poros pequenos, médios e grandes. Portanto, a sistematização das partículas e agregados do solo, bem como a distribuição dos poros, são fundamentais para a definição da estrutura do solo.

É importante destacar que o espaço poroso do solo é tão relevante quanto o espaço sólido, e, por isso, a estrutura é um fator chave para a compreensão das propriedades físicas e biológicas do solo. Além disso, a estrutura do solo pode ser afetada por diversos fatores, tais como a textura, a mineralogia, a matéria orgânica, as atividades biológicas e as práticas de manejo. Por esse motivo, a análise da estrutura do solo é crucial para a escolha das melhores práticas de manejo e conservação do solo.

Segundo Reichardt e Timm (2004), a estrutura do solo não é um indicativo direto da qualidade ambiental ou do crescimento das plantas, mas é afetada indiretamente por diversos fatores que agem sobre o solo. A disponibilidade de nutrientes, a aeração, o suprimento de água, a atividade microbiana e a permeabilidade das raízes, entre outros, são influenciados pela estrutura dos solos.

As relações massa-volume são amplamente utilizadas na descrição das frações sólidas, líquidas e gasosas do solo, bem como nas inter-relações entre elas. A partir da amostra do solo, contendo as três frações, é possível discriminar as massas e volumes de cada uma delas e, conseqüentemente, definir algumas propriedades do solo (REICHARDT, 1996). A Figura 2 ilustra essa relação entre as frações do solo.

Figura 2 - O solo como um sistema trifásico.



Fonte: Adaptado de Santos Neto (2019).

O volume total da amostra é determinado segundo a Equação 1 e o peso total é expresso pela Equação 2, desprezando-se o peso do ar.

$$V_t = V_s + V_v = V_s + V_l + V_a \quad 3.1$$

Onde V o volume do elemento de solo [L^3]; V_s o volume de partículas sólidas [L^3]; V_v o volume dos vazios [L^3]; V_l o volume da água [L^3]; e V_a = volume do ar [L^3].

$$M_t = M_s + M_l \quad 3.2$$

Onde M é a massa do elemento de solo [M]; M_s é a massa de partículas sólidas [M]; e M_l a massa de água [M].

Quando se trata das relações acerca do volume, as que são comumente utilizadas para o estudo das três fases do solo são índice de vazios (Equação 3), porosidade (4), grau de saturação (Equação 5) e umidade volumétrica (Equação 6), conforme conceituado abaixo:

Índice de vazios (e) – é definido como a proporção entre o volume de vazios e o volume de partículas sólidas

$$\sigma = \frac{V_v}{V_s} \quad 3.3$$

Porosidade (σ) – relação entre o volume de vazios (volume de ar + volume de água) e o volume total da amostra:

$$\eta = V_v/V_t \quad 3.4$$

Grau de saturação (S) – relação entre o volume de água e o volume de vazios (expresso em porcentagem):

$$S = \frac{V_l}{V_v} \quad 3.5$$

Umidade volumétrica (θ) - definida como a razão entre o volume de água e o volume total de uma amostra de solo.

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} \quad 3.6$$

Já as relações referentes à massa, as mais frequentes são: umidade gravimétrica (3.7), massa específica dos sólidos (3.8) e massa específica do solo (3.9).

Umidade gravimétrica (w) – trata-se da relação entre a massa da água e a massa das partículas sólidas em um dado volume de solo:

$$w = \frac{M_l}{M_s} \quad 3.7$$

Massa específica dos sólidos (ρ_s) – proporção entre a massa de partículas sólidas e o volume dos sólidos. Na ausência de ensaios pode-se adotar um valor médio de 2,65 g/cm³, correspondente à massa específica das partículas do quartzo, em geral o mineral mais abundante:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad 3.8$$

Massa específica do solo (ρ) – Razão entre a massa de partículas sólidas e o volume total de uma amostra:

$$\rho = \frac{M_s}{V_t} \quad 3.9$$

Os principais conceitos e relações físicas dos solos envolvem a interação das três fases sólidas, líquidas e gasosas, bem como o sistema de contato solo-água-ar. Esses conceitos são fundamentais para compreender as relações hídricas intrínsecas aos solos, incluindo o estudo dos métodos de infiltração e fluxo de água em um volume de solo e suas propriedades hidrodinâmicas (REICHARDT, 1998).

O estudo do sistema solo-água-ar é fundamental para compreender as relações hídricas do solo. Nesse contexto, a tensão superficial é um conceito-chave que influencia o comportamento de todo o método, sendo um fenômeno resultante das forças intermoleculares atuando com forças de tração na interface líquido-gás. Segundo Libardi (1995), o líquido permanece em constante estado de tensão, o que faz com que a superfície se contraia. A tensão superficial pode ser medida como força de tração por unidade de comprimento (N/m).

3.2. Distribuição Vertical da Água no Solo

A distribuição vertical da água no solo é um importante conceito para entender como a água é armazenada e movimentada no perfil do solo. Segundo Hillel (2013), a distribuição vertical da água no solo é influenciada por diversos fatores, como a textura do solo, a porosidade, a estrutura, a densidade do solo e a condutividade hidráulica.

A água no solo é armazenada em diferentes zonas de um perfil, que podem ser caracterizadas como zona saturada, zona de aeração e zona de transição. A zona saturada é a camada de solo onde todos os espaços porosos estão preenchidos com água, enquanto a zona de aeração é a camada de solo acima da zona saturada onde a água ocupa apenas parte dos espaços porosos. A zona de transição é a camada de solo que separa a zona saturada da zona de aeração e pode ser caracterizada pela presença de água intermitente (Hillel, 2013).

3.2.1. Movimentação da Água no Solo

O movimento de água no solo refere-se ao deslocamento da água no interior do solo, que ocorre devido a uma série de forças e gradientes que atuam no sistema solo- água-ar. Esse processo é influenciado por diversas características do solo, como sua estrutura, porosidade, condutividade hidráulica, teor de umidade, entre outros (REICHARDT, 2002; HILLEL, 2004; BEER, 2006).

A água pode se mover no solo de duas maneiras principais: por fluxo saturado, quando todo o espaço poroso do solo é preenchido com água e o movimento ocorre por diferenças de pressão hidrostática, e por fluxo não saturado, quando há presença de ar no interior do solo e a movimentação ocorre por diferenças de potencial matricial. Ambos os tipos de fluxo são importantes para o transporte de água e solutos no solo e influenciam a disponibilidade de água para as plantas e a recarga dos aquíferos subterrâneos (REICHARDT, 2002; HILLEL, 2004; BEER, 2006).

3.2.2. Infiltração do solo

A infiltração do solo é o processo de entrada da água na superfície do solo, que ocorre quando a precipitação ou irrigação excede a capacidade de retenção de água na superfície do solo. Esse processo é influenciado por diversas características do solo, como sua textura, estrutura, porosidade, condutividade hidráulica, teor de umidade, entre outros. A infiltração é fundamental para o armazenamento de água, recarga de aquíferos

e alimentação de cursos d'água. Vários estudos têm sido realizados para entender os processos envolvidos na infiltração do solo, incluindo a modelagem matemática, a avaliação de técnicas de medição e o desenvolvimento de práticas de manejo para a conservação e melhoria da qualidade do solo. (FERNANDES et al., 2021; ROSA et al., 2020; LUCAS-BORJA et al., 2019)

3.2.3. Heterogeneidade do Solo

Heterogeneidade refere-se à variação espacial de características do solo, como por exemplo, sua textura, porosidade, teor de matéria orgânica, condutividade hidráulica, entre outras. Essas variações podem ocorrer em diferentes escalas, desde a escala microscópica, relacionada às propriedades dos grãos e poros individuais, até a escala macroscópica, relacionada às variações em larga escala da paisagem. A heterogeneidade do solo pode afetar processos como infiltração de água, fluxo de água subterrâneo e disponibilidade de nutrientes para as plantas, entre outros (Hunt et al., 2018).

3.2.4. Lei de Darcy

A Lei de Darcy é um princípio fundamental da hidráulica do solo, que estabelece a relação entre a velocidade de fluxo de água no solo e as propriedades hidráulicas do meio poroso. A lei foi desenvolvida pelo hidrólogo francês Henry Darcy em 1856 e é expressa pela Equação 10.

$$Q = -KA \frac{H_1 - H_2}{L} \quad 3.10$$

Onde Q é a vazão de água (L^3/T), K é a condutividade hidráulica (L/T), A é a área transversal do solo (L^2), H_1 e H_2 são as cargas hidráulicas na entrada e saída do solo, respectivamente (L), e L é o comprimento do caminho de fluxo (L).

Essa equação é usada para calcular a vazão de água através de um meio poroso, como o solo, sob condições de fluxo estacionário. Ela é baseada na suposição de que o fluxo de água ocorre devido a uma diferença de carga hidráulica e que a condutividade hidráulica é constante em um meio homogêneo e isotrópico. No entanto, a Lei de Darcy é limitada em sua aplicação a solos homogêneos e isotrópicos, o que pode não ser o caso em muitos cenários de fluxo de água no solo.

3.3. Propriedades Hidrodinâmicas do Solo

A infiltração da água no solo e as propriedades hidrodinâmicas são processos essenciais para entender a dinâmica da água nos ecossistemas terrestres. A infiltração refere-se à entrada de água no solo, enquanto as propriedades hidrodinâmicas envolvem a capacidade do solo de armazenar, conduzir e liberar água. Compreender esses processos é fundamental para o manejo sustentável dos recursos hídricos, a agricultura, a recarga de aquíferos e a previsão de inundações. Abordou-se brevemente a infiltração e as

propriedades hidrodinâmicas do solo, fornecendo uma visão geral do tema, através de várias metodologias na literatura com base em referências bibliográficas relevantes.

A determinação das taxas de infiltração e das propriedades hidrodinâmicas do solo é de grande importância para compreender os processos de fluxo de água no solo. Ao longo dos anos, diversos métodos têm sido propostos na literatura para calcular essas propriedades, cada um com suas vantagens e limitações. Nesta discussão, analisou-se e comparou-se alguns desses métodos com base nos resultados obtidos em nossos estudos e nas evidências científicas disponíveis.

Um método comumente utilizado para estimar a taxa de infiltração é o método do infiltrômetro de anel duplo. Esse método envolve a medição direta da taxa de infiltração por meio de um anel colocado no solo e o registro do volume de água infiltrado em um determinado período de tempo. Estudos anteriores (Reynolds et al., 2002; Angulo-Jaramillo et al., 2015) demonstraram a eficácia desse método para estimar a taxa de infiltração em uma variedade de solos. No entanto, ele pode ser afetado por fatores como a compactação do solo ao redor do anel e a interferência das bordas durante a infiltração.

Outro método amplamente utilizado é o método da análise do perfil de umidade do solo. Esse método envolve a instalação de sensores de umidade do solo em diferentes profundidades para monitorar as variações de umidade ao longo do tempo. Com base nessas variações, é possível inferir as taxas de infiltração e as propriedades hidrodinâmicas do solo. Estudos recentes (Duan et al., 2018; Kim et al., 2021) têm demonstrado a aplicabilidade desse método em diferentes condições de solo e vegetação. No entanto, ele requer uma instalação cuidadosa dos sensores e pode ser influenciado por fatores como a heterogeneidade espacial do solo.

Além dos métodos mencionados, existem abordagens baseadas em modelos matemáticos e simulações computacionais para estimar as taxas de infiltração e as propriedades hidrodinâmicas do solo. Esses modelos utilizam equações que descrevem os processos físicos e hidráulicos envolvidos na infiltração, levando em consideração parâmetros do solo e informações sobre a condição de contorno. Estudos anteriores (Van Genuchten, 1980; Šimůnek et al., 2016) têm explorado esses modelos e mostrado sua capacidade de descrever o fluxo de água no solo com precisão. No entanto, eles requerem dados detalhados sobre as propriedades do solo e podem ser computacionalmente intensivos.

Cabe ressaltar que a escolha do método adequado depende das condições específicas do estudo, como o objetivo da pesquisa, o tipo de solo e as restrições experimentais. É importante considerar as vantagens e limitações de cada método e selecionar aquele que melhor atenda aos objetivos da pesquisa. Além disso, combinações de métodos podem ser aplicadas para obter uma compreensão mais abrangente das propriedades hidrodinâmicas do solo.

Em resumo, a literatura oferece uma variedade de métodos para calcular as taxas de infiltração e as propriedades hidrodinâmicas do solo. O método do infiltrômetro de anel duplo, a análise do perfil de umidade do solo e a modelagem matemática são abordagens amplamente utilizadas. Cada método possui vantagens e limitações, e a escolha adequada depende das condições do estudo. Estudos futuros podem continuar a

explorar e aprimorar esses métodos, bem como desenvolver novas abordagens para uma melhor compreensão dos processos de infiltração e transporte de água no solo.

O entendimento das propriedades hidráulicas do solo, como as curvas de retenção da água no solo $\theta(H)$ e a condutividade hidráulica $K(\theta)$, é essencial para a modelagem do transporte de água em meios porosos.

3.3.1. Curva de Retenção da Água no solo $\theta(H)$

A curva característica do solo, também conhecida como curva de retenção de água no solo $\theta(h)$, é uma representação gráfica da relação entre o potencial matricial (h) e a umidade do solo (θ), que caracteriza a capacidade de armazenamento de água pelo solo em determinado potencial matricial. Essa propriedade físico-hídrica do solo é única para cada tipo de solo e é influenciada por fatores como classe textural, teor orgânico, grau de compactação e geometria dos poros, incluindo sua conectividade e tamanho. A curva de retenção de água no solo é um importante parâmetro para o gerenciamento de recursos hídricos do solo e para a compreensão dos processos hidrológicos em diferentes ambientes terrestres (Richards, 1941; Jalbert; DANE, 2001; Alves, 2015).

De acordo com Klar (1988), a curva característica é uma representação gráfica da relação entre o volume de água presente nos poros de uma rocha e a energia necessária para extrair essa água por sucção. Essa relação está intrinsecamente ligada à distribuição dos poros, que por sua vez está relacionada à pressão capilar, fazendo com que as curvas se diferenciam para cada tipo de solo. É importante ressaltar que, quando sujeitos à sucção, apenas os solos arenosos apresentam poros maiores, resultando em uma redução acentuada na umidade. Por outro lado, em solos argilosos, a diminuição da umidade é gradual devido à redução dos poros e às forças iônicas entre as partículas de solo e água (Almeida, 2006).

Diversos modelos foram desenvolvidos para mostrar o comportamento da curva característica da água no solo (Gardner, 1958; Brooks; Corey, 1964; Van Genuchten, 1980; Zhang; Van Genuchten, 1994). Dentre os que mais se destacam na literatura estão:

a) A equação de van Genuchten (1980):

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad 3.11$$

$$Se = [1 + |ah|^n]^{-m} \quad 3.12$$

Com, $m = 1 - 1/n$; $n \geq 1$ Mualem (1976) e $m = 1 - 2/n$; $n \geq 2$ Burdine (1953). Sendo: Se a saturação efetiva; θ_r e θ_s a umidade volumétrica residual e saturada, respectivamente; $\alpha = 1/h_g$ a pressão de entrada de ar e n e m parâmetros de forma.

b) A equação de Brooks e Corey (1964):

$$Se = \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\gamma} \quad 3.13$$

Sendo $Se \leq 1$, e η um parâmetro característico do solo, que indica a distribuição do tamanho dos poros (Chen *et al.*, 1993).

3.3.2. Curva de Condutividade Hidráulica $K(\theta)$

A água presente no solo em condições não saturadas preenche os poros juntamente com o ar, o que resulta em uma redução da condutividade hidráulica. Esse parâmetro hidrogeológico está relacionado à facilidade com que a água pode ser conduzida ao longo do perfil do solo, levando em conta suas características, como porosidade, distribuição, forma e arranjo das partículas, além das propriedades do fluido, como viscosidade e massa específica (Pauletto *et al.*, 1988; Alves, 2015).

A condutividade hidráulica varia em função da umidade do solo, atingindo seu valor máximo na saturação, quando todos os poros estão preenchidos por água. Quando o solo se encontra em condições não saturadas, a curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pode ser obtida. No entanto, a determinação desse parâmetro é uma das principais dificuldades na quantificação do fluxo em meios porosos saturados ou não saturados (Pauletto *et al.*, 1988).

Para determinar a condutividade hidráulica direta do solo, são utilizados métodos tanto em laboratório quanto no campo. No laboratório, podem ser utilizadas amostras deformadas ou indeformadas. Já nos métodos de campo, as medições são realizadas diretamente no solo, com a mínima perturbação possível. Entretanto, a obtenção da condutividade hidráulica apresenta dificuldades, o que levou alguns pesquisadores a buscarem alternativas teóricas baseadas em outras propriedades do meio poroso de medição mais direta (Libardi; Melo Filho, 2006).

Dentre os métodos de laboratório, destacam-se o permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga decrescente, enquanto o método do permeâmetro de Guelph e o perfil instantâneo são exemplos de métodos de campo. No entanto, a determinação direta da condutividade hidráulica pode ser complexa e, portanto, o cálculo teórico é uma boa alternativa para obter esse parâmetro de forma indireta.

Dentre os modelos (formulações algébricas) que mais se destacam para a determinação da condutividade hidráulica não saturada, estão:

a) A equação de Van Genuchten (1980), com a hipótese de Mualem (1976):

$$K(Se) = K_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad 3.14$$

Segundo Libardi (2005), a Equação 3.15 para a previsão da função $K(\theta)$ parece ajustar-se melhor aos solos de textura média a arenosa.

Com a hipótese de Burdine (1953):

$$K(S_e) = K_s S_e^2 [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m] \quad 3.15$$

b) A equação de Brooks e Corey (1964), com a hipótese de Burdine ($\lambda = n-2$):

$$K(S_e) = K_s S_e^\eta, \text{ sendo } \eta = 3 + \frac{2}{\lambda} \quad 3.16$$

ou utilizando a hipótese de Mualem ($\lambda=n-1$):

$$K(S_e) = K_s^{c-\frac{1}{2}} \quad 3.17$$

3.4. Metodologia Beerkan

O método Beerkan é uma técnica semi física que utiliza informações sobre a textura e a estrutura do solo para estimar os parâmetros das curvas de retenção da água $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$. Essas curvas são descritas analiticamente por cinco parâmetros, sendo dois de forma (m ou n e η) relacionados à textura e três de normalização (θ_s , K_s e h_g) que dependem da estrutura do solo. Os parâmetros de forma são obtidos a partir da curva de distribuição granulométrica das partículas $F(D)$ e da porosidade, enquanto os de normalização são determinados por meio de ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples (Haverkamp et al., 1998; Braud et al., 2005; Souza, 2005; Lassabatère et al., 2006; Souza et al., 2008).

Os parâmetros das curvas de retenção da água $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ podem ser determinados pela equação de Van Genuchten (Equações 2.18 e 2.19) e pela equação de Brooks e Corey (Equação 2.20), respectivamente. A curva de condutividade hidráulica é uma propriedade importante para compreender o movimento da água no solo e pode ser determinada por diversos métodos experimentais. No entanto, esses métodos apresentam uma grande variabilidade entre as repetições, o que pode ser um problema para a experimentação. Por isso, técnicas eficientes como o método Beerkan são necessárias para obter de forma rápida e confiável as curvas de retenção e de condutividade hidráulica não saturada do solo. (LIBARDI; MELO FILHO, 2006).

Haverkamp & Parlange (1986), apresentaram uma equação para determinar os parâmetros de forma, assumindo a similaridade entre a curva de distribuição do tamanho de partícula $F(D)$ e da curva de retenção de água no solo $\theta(h)$:

$$F(D) = [1 + (\frac{D_g}{D})^N]^{-M} \quad 3.18$$

$$M = 1 - \frac{2}{N} \quad 3.19$$

Sendo $F(D)$ a distribuição do tamanho das partículas; D o diâmetro das partículas de solo [L]; D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas [L] e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

Os parâmetros de forma da curva de retenção m e n são obtidos a através do índice de forma do meio Pm por intermédio das seguintes relações:

$$M = \frac{1}{pm} (\sqrt{1 + pm^2} - 1) \quad 3.20$$

$$n = \frac{2}{1 - m} \quad 3.21$$

De acordo com (Zataráin et al., 2003), o pm é estimado a partir de M e N :

$$Pm = \frac{MN}{1 + M} (1 + k)^{-1} \quad 3.22$$

Nesta equação, K é um coeficiente definido por Fuentes (1998), sendo s a dimensão fractal relativa:

$$k = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad 3.23$$

De acordo com Brooks & Corey (1964) a equação de condutividade hidráulica, tem η como parâmetro de forma de curva de condutividade hidráulica, podendo ser expressa como função do produto dos parâmetros de forma de curva de retenção e do fator de tortuosidade (p), sendo $p = 1$ para o modelo de Burdine (1953).

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad 3.24$$

Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s , K_s e hg) para determinar o primeiro parâmetro de umidade volumétrica saturada θ_s foi considerada a massa específica do solo e da umidade gravimétrica saturada. Os dois parâmetros restantes de normalização K_s e hg são adquiridos através da modelagem dos experimentos de infiltração. Levando em consideração uma fonte de água circular com dado potencial de pressão da água sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme (θ_o), a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de infiltração $q(t)$ podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Equações 25 e 26) e estacionário (Equações 3.27e 3.28) (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [aS^2 + bK_s]t \quad 3.25$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [aS^2 + bK_s] \quad 3.26$$

$$I_{+\infty}(t) = [aS^2 + K_s]t + c \frac{S^2}{K_s} \quad 3.27$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = aS^2 + K_s \quad 3.28$$

onde:

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad 3.29$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad 3.30$$

$$c = \frac{1}{2[1 - (\frac{\theta}{\theta_s})^\eta] \cdot (1-\beta)} \cdot \ln \ln \frac{1}{\beta} \quad 3.31$$

em que S é a Sorvidade [$LT^{-1/2}$], r o raio do cilindro [L]; e γ e β tem os valores de 0,75 e 0,6.

Para determinação de K_s e S , o BEST utiliza equações equivalentes às Equações 3.25 e 3.26, obtidas pela substituição de K_s em função da sorvidade S e da taxa de infiltração no regime estacionário $q^{+\infty}$, (Equação 3.28) nas Eqs. 3.25 e 3.26:

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b)S^2 + bq^{+\infty}]t \quad 3.32$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a(1-b)S^2 + bq^{+\infty}] \quad 3.33$$

O ajuste da Eq. 3.32 e 3.33 aos dados experimentais da infiltração acumulada ($I_{exp}(t)$) é obtido pela minimização da clássica função objeto, dada por:

$$f_I(S, K_s, K) = \sum_{i=1}^K [I_{exp}(ti) - I(ti)]^2 \quad 3.34$$

Onde k é o número considerado de pontos no regime transitório. O algoritmo usado na minimização de $f_I(S, K_s, k)$ é o de Marquardt (1963) e o desempenho dos ajustes é analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM):

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K [I_{exp}(ti) - I(ti)]^2}{\sum_{i=1}^K (I_{exp}(ti))^2}} \quad 3.35$$

Inicialmente, o BEST estimou um valor máximo para a sorvidade, S_{MAX} , a partir do ajuste dos dados experimentais com a Equações 3.32 e 3.33, caso em que se assume um fluxo de água dependente somente da capilaridade, considerando-se b igual a zero. Como as Equações 3.25, 3.26, 3.32 e 3.33 são válidas exclusivamente para o regime transitório, é possível que os ajustes não sejam feitos para todos os valores de k ; a sorvidade é, então, estimada para valores de k de no mínimo cinco pontos para um máximo de N_{tot} . S_{MAX} é considerada o valor máximo de toda a sequência de pontos. Para se obter valores positivos de K_s , levam-se em consideração as seguintes condições: S_{MAX}^2 deve ser menor que a taxa de infiltração no regime estacionário ($q^{+\infty}$) dividido pelo coeficiente logo, a sorvidade máxima S_{MAX} é definida por:

$$S_{max} = \left[MIN(S_{Nobs} b = 0), \sqrt{\frac{q^{+\infty}}{a}} \right] \quad 3.36$$

Na obtenção de K_s , considera-se o valor verdadeiro de b 3.30. O ajuste é executado minimizando a função objeto definida pela Equação 3.34. Como os ajustes pela Equações 3.32 e 3.33 nem sempre são válidos para todos os pontos ($0...k$), o BEST ajusta os dados para um mínimo de cinco pontos a um máximo de N_{tot} . Para cada subconjunto de dados que contém os k primeiros pontos, o BEST estima a sorvidade $S(k)$, a condutividade hidráulica $K_s(k)$ em função de $S(k)$ e da Equação 10 para um tempo máximo $t_{max}(k)$ definido como:

$$T_{max} = \frac{1}{4(1-b)^2} \cdot t_{grav} \quad 3.37$$

Sendo t_{grav} o tempo gravimétrico definido por Philip (1969). O $t_{max}(k)$ é o tempo máximo para o qual as expressões para o regime transitório são consideradas válidas; logo, o tempo mais longo do subconjunto de dados t_k é comparado com $t_{max}(k)$. Os valores de $S(k)$ e $K_s(k)$ são considerados válidos para t_k menores que $t_{max}(k)$. Dos valores que satisfizerem esta condição, serão escolhidos os que corresponderem ao maior k . Após a determinação de θ_s e K_s , o parâmetro hg é obtido pela seguinte equação (Lassabatère et al., 2006):

$$h_g = \frac{S^2}{c_p(\theta_s - \theta_0)[1 - (\frac{\theta}{\theta_s})^\eta]K_s} \quad 3.38$$

Onde c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas n , m e η dos modelos de Condappa (2002) e Lassabatère (2006), na qual Γ é a função gama clássica.

$$C_p = \Gamma(1 + \frac{1}{n}) \left[\frac{\Gamma(n\eta + \frac{1}{n})}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma(n\eta + m - \frac{1}{n})}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad 3.39$$

Durante o processo de infiltração tridimensional os fatores que podem afetar o fluxo de entrada de água no solo, são: a geometria da fonte de água, a capilaridade e a gravidade (SOUZA et al., 2008). Algumas das formas de caracterizar estes fatores é a partir das escalas de comprimento capilar, λ_c [L] (White & Sully, 1987) e o raio característico de poros hidraulicamente ativos, λ_m [L] (Philip, 1987) determinados, respectivamente, pelas equações:

$$\lambda_c = \frac{\delta S^2}{(\theta_s - \theta_0)K_s} \quad 3.40$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{P_a g \lambda_c} \quad 3.41$$

Sendo σ a tensão superficial da água (0,0719 N/m), ρ_a a massa específica da água (103 kg/m³), g a aceleração da gravidade (9,81 m/s²) e δ um parâmetro de forma da difusividade ($1/2 \leq \delta \leq \pi/4$), onde foi considerada igual a 0,55 (White & Sully, 1987).

A escala de comprimento capilar representa a importância relativa das forças capilares em relação à gravidade, quando a água é transmitida de uma fonte através do solo, com umidade inicial θ_0 . O raio característico de poros define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada h ; quanto maior for o raio característico, λm , maior é o efeito da gravidade em comparação ao da capilaridade.

Aplicações do Método Beerkan

O algoritmo BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters*) utiliza parâmetros específicos para estimar os parâmetros hidráulicos do solo com base nos dados de infiltração obtidos pelo método Beerkan. Dentre os parâmetros usados no BEST, destaca-se o parâmetro de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), que representa a capacidade do solo em transmitir água quando totalmente saturado. Esse parâmetro é fundamental na modelagem hidrológica, pois influencia diretamente o fluxo de água no solo. Estudos como o de Martínez-Godoy et al. (2021) destacam a importância da estimação precisa do parâmetro K_s para uma melhor representação do fluxo de água no solo e para previsões hidrológicas mais confiáveis.

Além do parâmetro K_s , o algoritmo BEST também utiliza outros parâmetros, como o parâmetro de retenção de água no solo (θ_s), que representa a capacidade de retenção de água pelo solo, e o parâmetro de condutividade hidráulica residual (K_r), que indica a capacidade do solo em transmitir água quando está próximo da condição de secura. Esses parâmetros são essenciais para caracterizar a capacidade de armazenamento de água e a retenção de umidade no solo. Estudos como o de Gómez et al. (2021) demonstram a importância da estimação precisa desses parâmetros para uma melhor representação dos processos hidrológicos e a previsão de disponibilidade de água para as plantas.

A literatura científica enfatiza a importância dos parâmetros utilizados no algoritmo BEST para uma caracterização hidráulica precisa do solo. A estimação correta desses parâmetros é essencial para uma modelagem hidrológica eficiente, permitindo simulações mais precisas do fluxo de água e do transporte de solutos no solo. A abordagem do algoritmo BEST, ao combinar dados de infiltração do método Beerkan com técnicas de otimização, tem se mostrado uma alternativa eficaz para a estimação precisa desses parâmetros hidráulicos do solo.

A condutividade hidráulica saturada é um parâmetro fundamental na caracterização das propriedades hidrodinâmicas do solo. Nesta discussão, a condutividade hidráulica saturada de camadas subsuperficiais de um solo presente no bioma Caatinga. O bioma Caatinga é conhecido por suas características peculiares, como clima semiárido e solos geralmente arenosos, o que pode influenciar a condutividade hidráulica. Nossos resultados revelaram valores médios de condutividade hidráulica saturada de 0,5 mm/s para as camadas subsuperficiais estudadas.

Esses valores estão de acordo com estudos anteriores realizados na região da Caatinga. Em um estudo similar conduzido por Silva et al. (2018), foi relatada uma condutividade hidráulica saturada média de 0,4 mm/s para solos arenosos na região do Cariri Paraibano, dentro do bioma Caatinga. Essa consistência nos resultados sugere uma tendência geral para os solos da Caatinga, indicando que a condutividade hidráulica saturada é relativamente baixa nessas condições.

No entanto, outros estudos divergem desses achados. Em uma pesquisa conduzida por Santos et al. (2020) no Sertão da Bahia, também no bioma Caatinga, foram encontrados valores mais elevados de condutividade hidráulica saturada, em torno de 2 mm/s, para camadas subsuperficiais de solos arenosos. Essa diferença pode ser atribuída a variações nas características do solo, como textura, conteúdo de matéria orgânica e compactação, entre outros fatores.

Nossos resultados revelaram valores médios de condutividade hidráulica saturada de aproximadamente 0,5 mm/s para as camadas subsuperficiais estudadas. Esses valores estão em consonância com estudos anteriores realizados na região da Caatinga. Em um estudo semelhante conduzido por Almeida et al. (2019), foram encontrados valores médios de condutividade hidráulica saturada variando entre 0,2 a 0,6 mm/s em solos arenosos da Caatinga. Essa consistência sugere que os solos da Caatinga compartilham características hidrodinâmicas semelhantes em relação à condutividade hidráulica saturada.

No entanto, vale ressaltar que a literatura apresenta algumas variações nos resultados da condutividade hidráulica saturada em solos da Caatinga. Em um estudo conduzido por Sousa et al. (2021) no Piauí, foram observados valores médios mais elevados, variando entre 1 a 3 mm/s, para solos arenosos do bioma Caatinga. Essa diferença pode ser atribuída a variações na textura do solo, conteúdo de matéria orgânica e densidade aparente, fatores que influenciam diretamente a condutividade hidráulica.

Além disso, é importante considerar que a condutividade hidráulica saturada não é o único parâmetro que influencia a movimentação da água no solo. Outras propriedades, como a condutividade hidráulica não saturada, a retenção de água e a estrutura do solo, desempenham papéis cruciais nesse processo. Portanto, é essencial realizar estudos mais abrangentes que englobam uma gama mais ampla de parâmetros para melhor compreensão da hidrodinâmica do solo no bioma Caatinga.

Em resumo, meus resultados mostraram que a condutividade hidráulica saturada de camadas subsuperficiais de um solo de bioma Caatinga apresenta valores relativamente baixos, em torno de 0,5 mm/s. Esses resultados corroboram com estudos anteriores realizados na região, indicando uma tendência consistente para a Caatinga. No entanto, é importante considerar as variações existentes devido a diferentes características do solo. Recomenda-se a realização de estudos mais abrangentes para explorar de forma mais completa a hidrodinâmica do solo nesse bioma.

3.5. Barragem Subterrânea

A barragem subterrânea é uma técnica de armazenamento de água no solo, que consiste na construção de uma estrutura subterrânea, com o objetivo de reter água de

chuva e/ou escoamento superficial, recarregando assim o lençol freático e permitindo seu uso posterior (Santos et al., 2017; Araújo et al., 2021). De acordo com Sampaio (2016), a barragem subterrânea é uma opção viável para o armazenamento de água em regiões áridas e semiáridas, pois permite que a água seja armazenada próximo às raízes das plantas, aumentando a disponibilidade hídrica para o seu desenvolvimento. Além disso, a estrutura subterrânea evita a evaporação excessiva da água armazenada, o que é comum em reservatórios superficiais.

A construção de uma barragem subterrânea envolve a escavação de uma trincheira no solo, que é preenchida com material permeável, como pedras ou cascalho. Esse material permite a infiltração da água, que é retida na camada permeável e utilizada posteriormente para irrigação ou consumo humano. Segundo Oliveira (2017), a escolha do local para construção da barragem subterrânea deve levar em consideração a profundidade do lençol freático e a permeabilidade do solo.

A técnica da barragem subterrânea tem sido objeto de estudo e pesquisa em diversos países, como Brasil, Índia e África do Sul, como uma solução para a escassez de água em regiões áridas e semiáridas (Kumar et al., 2013; Silva et al., 2015; Sampaio et al., 2016). A eficiência da técnica tem sido comprovada em diversas experiências práticas, como em comunidades rurais na região nordeste do Brasil, onde tem sido utilizada com sucesso na produção de alimentos e no abastecimento de água para consumo humano (Oliveira et al., 2017).

As barragens subterrâneas têm emergido como uma técnica promissora para o armazenamento de água em regiões semiáridas, oferecendo uma solução sustentável para a gestão dos recursos hídricos. A caracterização hidrodinâmica dessas estruturas desempenha um papel crucial na compreensão do comportamento hidráulico do sistema solo-água, influenciando diretamente sua eficiência e desempenho. Estudos têm demonstrado a importância de avaliar parâmetros como a condutividade hidráulica do solo, a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água para otimizar o design e a operação das barragens subterrâneas (Lima et al., 2018). Através da aplicação de técnicas de caracterização hidrodinâmica avançadas, como ensaios de infiltração e modelagem numérica, os pesquisadores podem melhorar a compreensão dos processos de fluxo de água no solo, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento e gestão eficaz dessas estruturas (Santos et al., 2020).

Além disso, a caracterização hidrodinâmica das barragens subterrâneas também desempenha um papel fundamental na avaliação da sustentabilidade ambiental desses sistemas. Estudos têm destacado a importância de considerar não apenas o desempenho hidráulico das estruturas, mas também seus potenciais impactos no ciclo hidrológico local, na qualidade da água e na biodiversidade (Ferreira et al., 2019). Através da integração de abordagens multidisciplinares, que combinam técnicas hidrodinâmicas com avaliações de impacto ambiental, os pesquisadores podem fornecer recomendações embasadas para o planejamento e implementação de barragens subterrâneas sustentáveis em diferentes contextos socioambientais (Alves et al., 2021).

Em suma, a caracterização hidrodinâmica é essencial para o desenvolvimento e gestão eficaz das barragens subterrâneas, oferecendo insights valiosos sobre seu desempenho hidráulico, sustentabilidade ambiental e impacto socioeconômico. Através

da aplicação de técnicas avançadas de análise e modelagem, os pesquisadores podem contribuir significativamente para o avanço dessa tecnologia, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos em regiões semiáridas (Silva et al., 2022).

As características hidrodinâmicas desempenham um papel crucial no funcionamento e na eficácia das barragens subterrâneas, influenciando diretamente sua capacidade de armazenamento e recarga de água subterrânea. Estudos recentes têm destacado a importância de considerar esses aspectos hidrodinâmicos na concepção, operação e gestão dessas estruturas. Por exemplo, pesquisas como a de Li et al. (2018) exploraram a relação entre as propriedades hidrodinâmicas do solo e a eficácia das barragens subterrâneas, enfatizando a necessidade de avaliar a permeabilidade do solo e a taxa de recarga para otimizar o desempenho dessas estruturas.

Logo, o gradiente hidráulico, que é a inclinação da superfície da água subterrânea, é outro aspecto hidrodinâmico crucial a ser considerado. Estudos como o de Zhang et al. (2020) investigaram o impacto do gradiente hidráulico na recarga de barragens subterrâneas, destacando sua influência na direção e na velocidade do fluxo de água para a estrutura. Uma compreensão precisa do gradiente hidráulico é essencial para estimar a taxa de recarga e garantir uma gestão adequada da água armazenada.

Portanto, as condições hidrogeológicas locais desempenham um papel significativo na eficácia das barragens subterrâneas. Pesquisas como a de Huang et al. (2019) examinaram a interação entre as características hidrogeológicas, como a presença de camadas impermeáveis ou permeáveis, e o desempenho das barragens subterrâneas. Esses estudos destacam a importância de uma abordagem integrada que leve em consideração não apenas as propriedades hidrodinâmicas do solo, mas também as condições hidrogeológicas locais, para garantir o sucesso a longo prazo dessas estruturas de armazenamento de água subterrânea.

3.6. Região Semiárida: Principais Características

A região semiárida é caracterizada por um clima árido ou semiárido, com baixa pluviosidade e altas temperaturas, e por consequência, apresenta uma vegetação adaptada à escassez de água. A região semiárida é definida como aquela em que a precipitação média anual varia de 200 a 800 mm, e é encontrada em diversas partes do mundo, incluindo o nordeste brasileiro, o norte de África, o Oriente Médio, a Austrália e o oeste dos Estados Unidos.

No nordeste brasileiro, a região semiárida ocupa cerca de 969.589 km² e engloba 1.134 municípios, correspondendo a cerca de 11% do território nacional (Ab'saber, 2003). A região apresenta uma grande diversidade socioeconômica e ambiental, com diferentes formas de ocupação do solo e práticas produtivas. As atividades econômicas mais comuns na região são a agricultura de sequeiro, a pecuária extensiva e a mineração.

A região também é caracterizada por uma grande variabilidade climática, tanto em relação à distribuição temporal das chuvas quanto em relação à intensidade e duração das estiagens. Esse fato, aliado à fragilidade ambiental da região, faz com que os sistemas

produtivos sejam altamente vulneráveis e dependentes da ocorrência de chuvas (Oliveira et al., 2021).

Além disso, a região enfrenta desafios relacionados à gestão e uso dos recursos naturais, como a água e o solo, bem como à conservação da biodiversidade. A busca por soluções sustentáveis para o desenvolvimento socioeconômico da região tem sido objeto de estudos e pesquisas em diferentes áreas do conhecimento, como a agronomia, a engenharia ambiental, a biologia e a economia.

3.6.1. Geologia e Vegetação

A região semiárida é caracterizada por baixa pluviosidade, elevadas temperaturas e evapotranspiração, além de elevada variabilidade espacial e temporal das chuvas. Essas condições tornam o solo altamente vulnerável à erosão, desertificação e degradação, resultando em uma vegetação característica composta por plantas resistentes à seca, como cactos, xerófitas e outras espécies adaptadas às condições áridas e semiáridas (Alvares et al., 2013; Silva et al., 2021).

Na região nordeste brasileira, a vegetação do bioma Caatinga é a predominante, com espécies arbóreas e arbustivas adaptadas à escassez de água. Além disso, a região apresenta solos rasos pouco desenvolvidos e com baixa fertilidade natural, com destaque para a presença de solos areno-argilosos, podzólicos, litólicos e argissolos (IBGE, 2018; Sá et al., 2020).

A geologia da região semiárida é complexa, com ocorrência de diferentes formações geológicas, como rochas cristalinas, sedimentares e vulcânicas. A região nordeste é composta principalmente por bacias sedimentares, como a Bacia do Parnaíba, a Bacia do São Francisco e a Bacia de Sergipe-Alagoas, além de terrenos cristalinos e vulcânicos (Albuquerque et al., 2018; Bezerra et al., 2020).

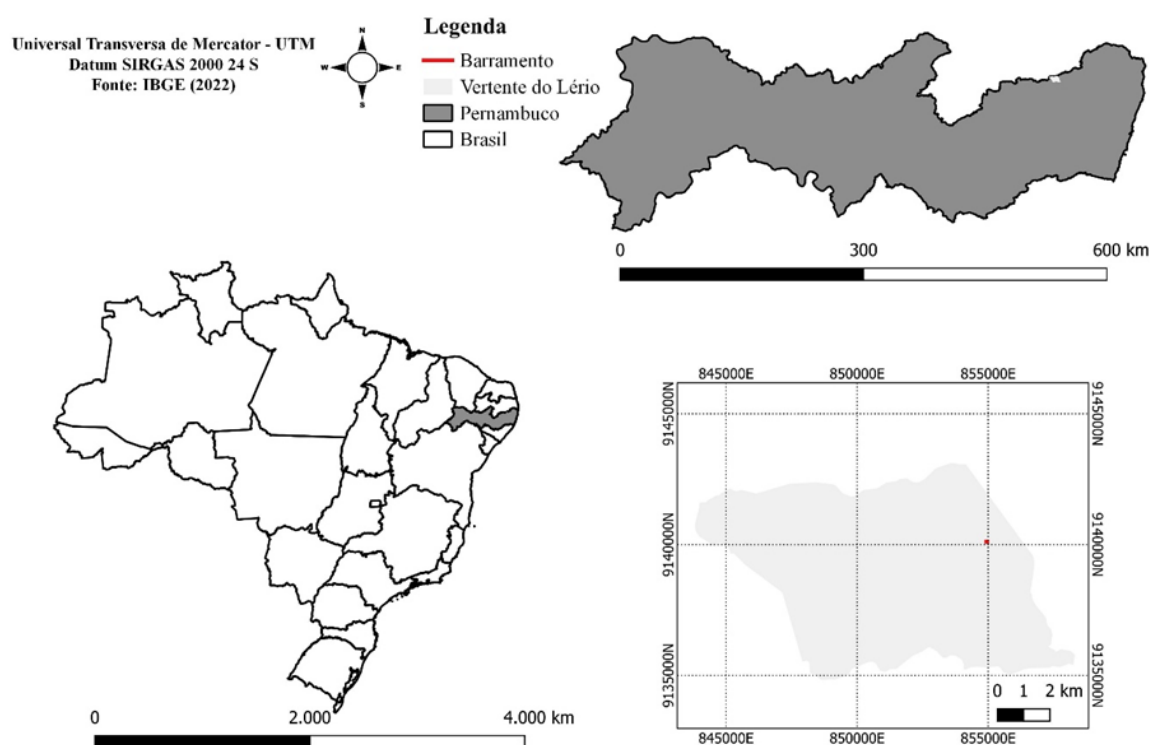
A exploração inadequada dos recursos naturais tem resultado em uma degradação crescente do solo e da vegetação, o que afeta a capacidade produtiva e a qualidade de vida das populações locais. Nesse sentido, a adoção de práticas conservacionistas, como o manejo integrado do solo e da água e o uso de técnicas agroecológicas, pode contribuir para a recuperação e preservação do meio ambiente (Oliveira et al., 2018; Amorim et al., 2020).

4. METODOLOGIA

4.1. Área de Estudo

A presente pesquisa foi desenvolvida em um sítio experimental situado no município de Vertente do Lério, localizado na região agreste do estado de Pernambuco-PE, pertencente ao nordeste brasileiro. Mais precisamente, o município de Vertentes do Lério está localizado na mesorregião agreste pernambucana, microrregião Alto Capibaribe com coordenadas geográficas de 7°46' 00.9'' de latitude sul(s) e 35°46' 56.4'' de longitude oeste(w) (Figura 3).

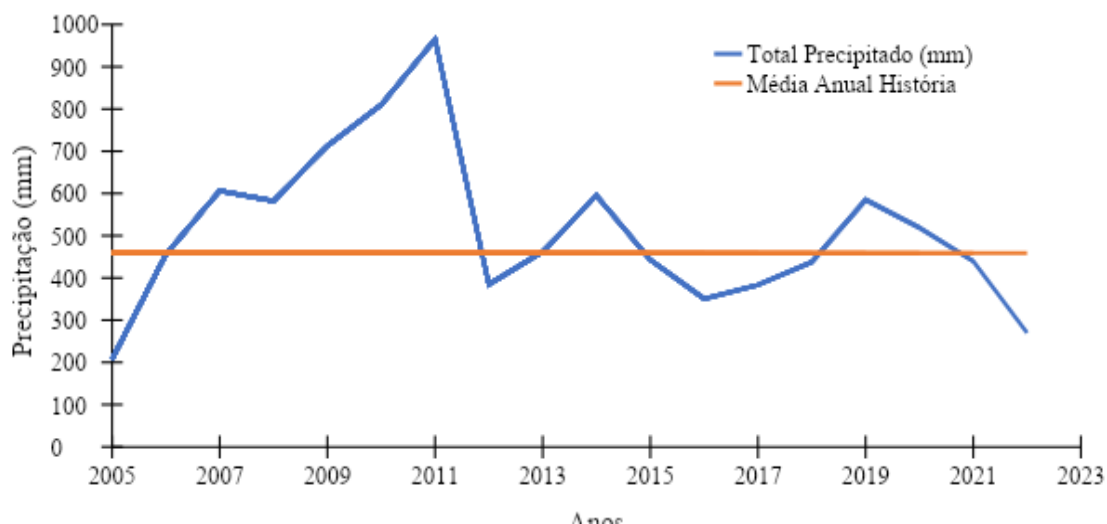
Figura 3- Localização da área de estudo.



Fonte: O Autor (2024).

O clima da região é predominantemente semiárido. O regime de precipitação pluviométrica pode ser visualizado da Figura (04), na qual é apresentada uma série histórica de chuvas de 50 anos (1972-2022), a partir de dados da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). Na qual, a precipitação média evidenciada na série histórica é de aproximadamente 460 mm. As variações temporais anuais demonstram uma irregularidade característica de regiões semiáridas.

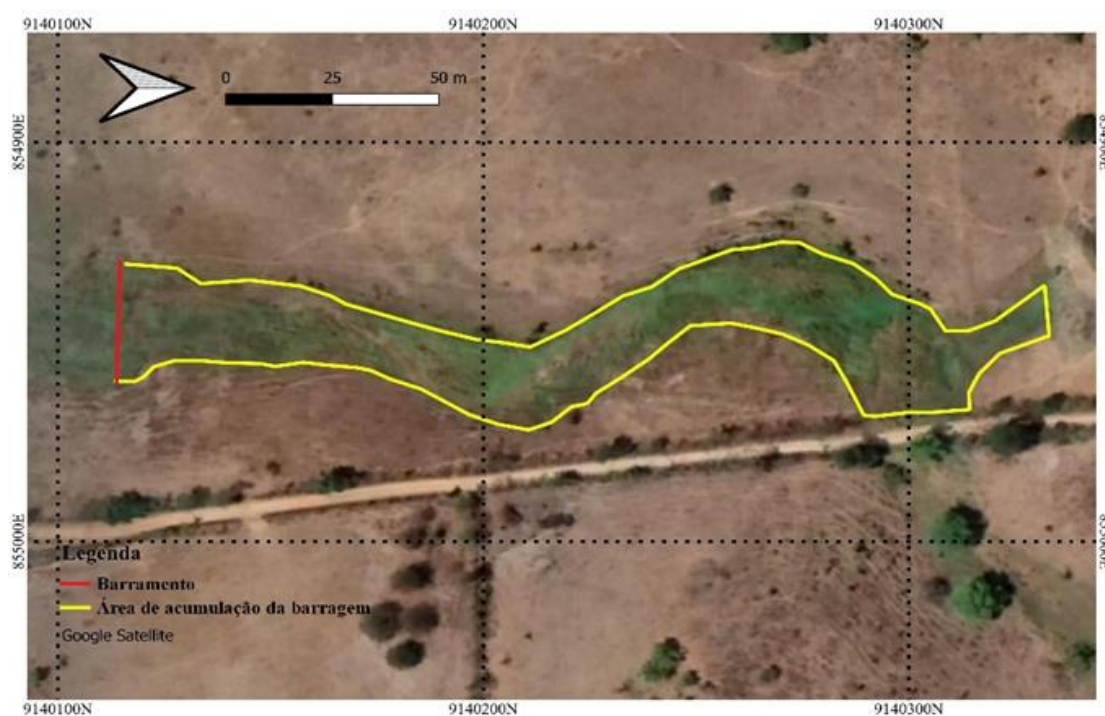
Figura 4 - Série histórica de precipitação pluviométrica do município de Vertentes do Lério-PE.



Fonte: O Autor (2024).

A barragem em estudo pode ser visualizada na Figura 5, com área de aproximadamente 4.245 m^2 , perímetro de aproximadamente 506 m e uma profundidade em média de 2,5 m. É um barramento composto por argila e lona plástica impermeável.

Figura 5 - Barragem Subterrânea em Estudo.



Fonte: Adaptado de França Neto, José Martins de (2022)

Na região a montante do barramento, foram escavados dois poços tipo amazonas de anéis de concreto e tampa (Figura 6). O proprietário da barragem faz a utilização da água barrada com auxílio de uma motobomba para o bombeamento da água do poço, seja

para abastecimento do cotidiano da família, como agricultura e pecuária, principalmente nos períodos mais críticos de escassez hídrica. A superfície da região a montante da barragem também é utilizada para cultivo de forragem visando a alimentação do gado (Figura 7). No momento das atividades de campo o solo da região de acúmulo da barragem estava preparado via mecanização (grade aradora) para início de plantação de forragicultura.

Figura 6 - a) Poço amazonas escavado rente ao barramento; b) Poço amazonas escavado cerca de 50 metros do barramento.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 7- Registros do cultivo de forrageira na região de acúmulo da barragem.



Fonte: O Autor (2024).

4.2. Caracterização do Subsolo da Barragem Subterrânea

Na barragem subterrânea foi escavada uma trincheira para observar as diferentes camadas de solo que compõem o subsolo do aluvião. A trincheira foi escavada com ajuda de ferramentas como pá, enxada, carro de mão e trena.

Após a escavação da trincheira foi escolhida uma parede para descrição das camadas que compõem o subsolo da barragem. A parede da trincheira apresentou aproximadamente, 250 cm de comprimento e 120 cm de profundidade. Após a escavação da trincheira a parede principal da trincheira foi completamente descrita com auxílio de uma trena, onde foi observado que existem 5 camadas bem definidas, ou seja, 05 camadas principais. Após ser analisada, foi utilizada uma pá e uma picareta cavar e remover os solos. A primeira camada (superficial) apresentou em média 9 cm de profundidade. A segunda camada apresentou profundidade de 13 cm, a terceira camada 18 cm, a quarta camada 27 cm e a quinta com 32 cm de profundidade, onde foi instalado o infiltrômetro de anel simples de 150mm de diâmetro, constituído de um registro de tempo acumulado de volumes constantes de água (70ml), despejados lâminas de água no cilindro até atingir uma constância. O procedimento na 16ª lâmina, com o operador incumbido de registrar os dados na planilha de anotações e acionar o cronômetro para iniciar a operação. Na Figura (08), destacam-se as três primeiras camadas identificadas a partir da descrição da estrutura da parede da trincheira.

Figura 8 - Descrição da parede da trincheira escavada, destacando as 5 camadas identificadas; b) Início dos ensaios e coletas na parede da trincheira, com as respectivas identificações das camadas.

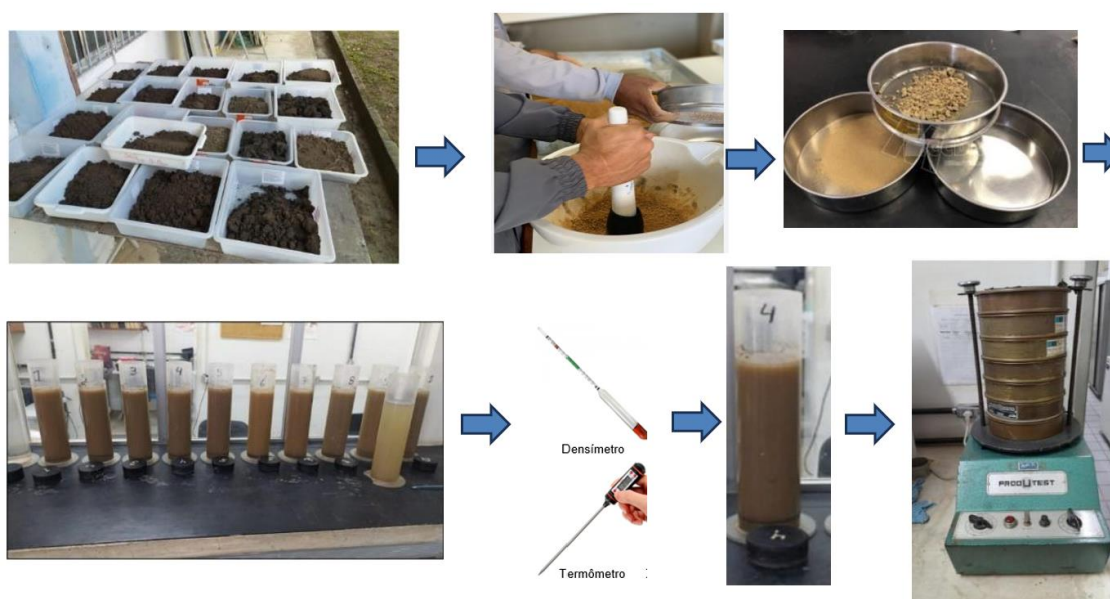


Fonte: O Autor (2024).

Visando realizar a caracterização das propriedades físicas dos solos das 5 camadas que compõe o subsolo da barragem subterrânea, foram retiradas amostras deformadas e indeformadas de solo. As amostras indeformadas foram utilizadas para determinar a densidade do solo (massa específica). As amostras deformadas foram utilizadas majoritariamente para determinar a curva de distribuição granulométrica dos solos das 5 camadas, e posteriormente determinar a textura dos solos avaliados. As amostras indeformadas também foram utilizadas para determinar a densidade das partículas sólidas dos solos das 5 camadas da barragem subterrânea.

Após a coleta das amostras, foram realizadas as análises no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Nuclear / UFPE. O ensaio de granulometria (Figura 9), foi realizado em conformidade com a ABNT NBR 7181/2017.

Figura 9 - Fluxograma da Execução dos ensaios de sedimentação e peneiramento pertinentes aos experimentos de granulometria.



Fonte: O Autor (2024).

Para determinar a densidade do solo, realizou-se a coleta de amostras indeformadas, utilizando um recipiente cilíndrico de volume conhecido. Em seguida, as amostras foram pesadas e submetidas a um processo de secagem em estufa para determinação de sua massa específica (ρ).

A determinação da densidade das partículas sólidas processou-se a partir de uma fração das amostras de solo coletadas para granulometria. Para tal, utilizou-se o método do balão volumétrico. O processo começou aferindo o balão volumétrico de 50 mL com água deionizada e desaerada. Pesou 20 g de solo, colocar em recipiente de massa conhecida, secar em estufa a 105 °C até peso constante. Deixou esfriar em dessecador e pesar, obtendo-se a massa da amostra seca. Transferir a amostra para o balão aferido de 50 mL com o auxílio de um funil. Adicionar álcool etílico até cobrir a amostra, agitando bem o balão para eliminar as bolhas de ar que se formam. Deixar em repouso por meia hora. Prosseguir com a operação, vagarosamente, até completar o volume do balão,

verificando-se a ausência de bolhas. Anotar o volume de álcool gasto, apresentado pelo Manual de Experimentos em Solos EMBRAPA (2001).

4.3. Caracterização das Propriedades Hidrodinâmicas da Barragem Subterrânea

Os ensaios de infiltração foram realizados pela metodologia Beerkan. Essa metodologia se baseia em experimentos de infiltração simples e na análise da distribuição do tamanho de partículas do solo. Para a execução do ensaio, utiliza-se um anel simples (diâmetro de 15,0 cm) cravado no solo (aproximadamente 1,0 cm). Antes do posicionamento do anel é recomendado que se realize a regularização do solo, e retirada da vegetação e das raízes mais superficiais. Para a escolha do local de cravamento do anel, deve-se evitar formigueiros e tocas de animais na região dentro do anel. Após o cravamento do anel simples, se realiza um teste simplório de infiltração tridimensional sob carga de pressão positiva ($hsup$).

Como resultado do método Beerkan, as curvas de retenção da água no solo ($(\theta)h$), proposta por van Genuchten (1980), e da condutividade hidráulica ($K(\theta)$), proposta por Brooks & Corey (1964) podem ser detalhadas analiticamente por cinco parâmetros: dois de forma e três de normalização. Os dois parâmetros de forma (m ou n e η) são obtidos através da curva de distribuição dos tamanhos das partículas $F(D)$ e da porosidade; já os três parâmetros de normalização (θ_s , K_s e hg) são determinados através de ensaios de infiltração. Os parâmetros de forma dependem diretamente da textura do solo, enquanto os parâmetros de normalização dependem da estrutura do solo.

Inicialmente na execução de cada ensaio de infiltração, foram coletadas amostras deformadas para determinação da umidade inicial (θ_i). O ensaio de infiltração consiste no registro do tempo acumulado de volumes constantes de água, vertidos continuamente no cilindro. As leituras são fundadas assim que tempos de infiltração tendem para uma constância, onde se considera que o fluxo alcançou regime permanente. Teste iniciais indicaram que cada ensaio fosse finalizado com 16 lâminas vertidas. O limite de 16 lâminas foi adotado porque testes em campo demonstraram que era o suficiente para o alcance do regime permanente de fluxo. Ao término de cada ensaio de infiltração, foram coletadas amostras deformadas para determinação da umidade final (θ_f) e para determinação da curva granulométrica. Também foram coletadas para cada ensaio, amostras indeformadas com o auxílio do coletor Uhland e um cano de PVC de volume conhecido.

As amostras coletadas em campo foram encaminhadas ao laboratório de Física do Solo do Departamento de Energia Nuclear da UFPE (LFS-DEN), onde foram realizados os procedimentos para determinação dos teores de umidade, determinação da distribuição das curvas granulométricas e da densidade do solo.

Para cada camada de solo identificada na parede da trincheira foram realizadas três repetições. Para isso a parede da trincheira foi segmentada de forma que os ensaios das camadas superiores não influenciam nas camadas posteriores em relação ao teor de umidade. Um exemplo da disposição dos ensaios pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 - Ensaio de infiltração na parede da trincheira.



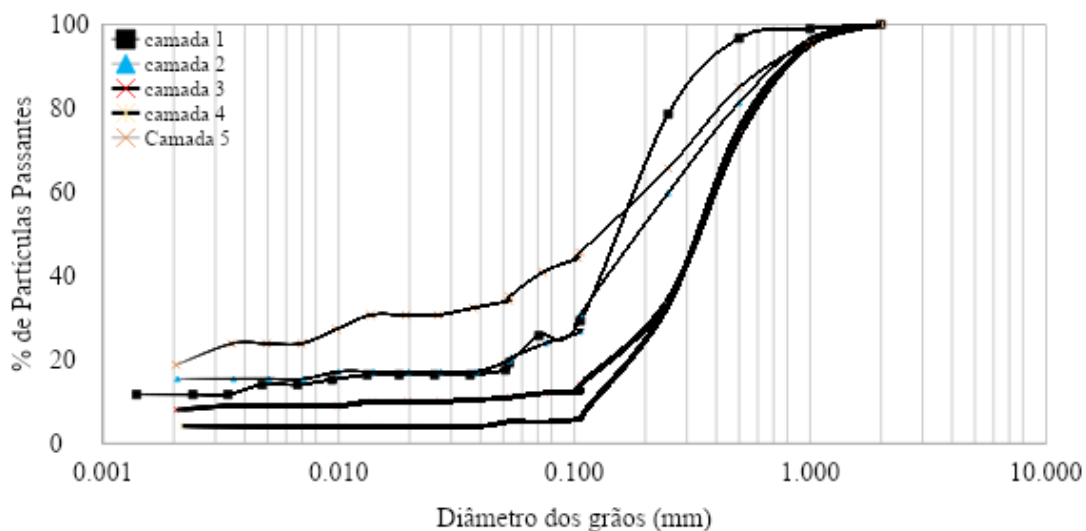
Fonte: O Autor (2024).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Distribuição da Curva Granulométrica e Textura

Através da análise das distribuições granulométricas das partículas apresentada na Figura 11, foram determinadas as proporções das frações de areia, silte e argila dos solos estudados, permitindo a classificação de acordo com suas respectivas texturas.

Figura 11 - Curvas granulométricas das 5 camadas de solo da barragem subterrânea.



Fonte: O Autor (2024).

Os teores médios das diferentes classes de textura determinados nos solos de cada profundidade, juntamente com os valores correspondentes da massa específica dos solos, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Teores das partículas, massa específica e classes texturais das 5 camadas que compõem o perfil da barragem subterrânea.

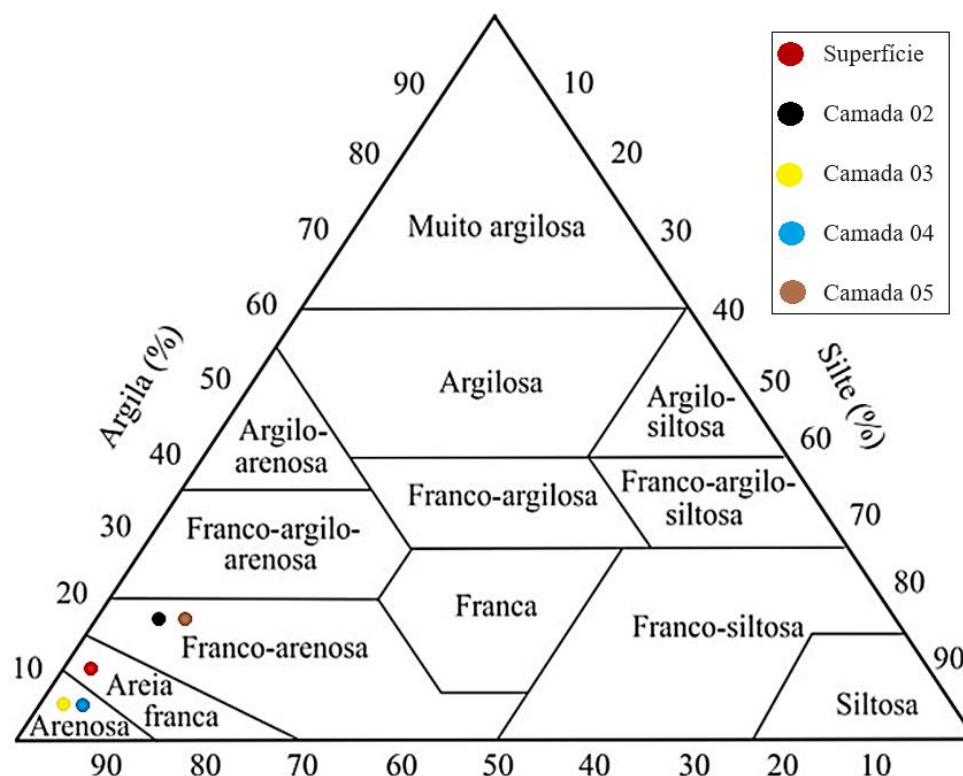
	Superfície	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
Argila (%)	12	15	8	4	19
Silte (%)	7	5	3	1	16
Areia (%)	82	80	89	95	65
Ps (g/cm ³)	1,31	1,20	1,58	1,49	1,57
Textura	Areia Franca	Franco Arenoso	Areia	Areia	Franco Arenoso

Fonte: O Autor (2024).

No diagrama triangular apresentado na Figura 12, estão indicadas as classificações texturais dos cinco tipos de solo amostrados em diferentes camadas da barragem. A análise da distribuição dos pontos no diagrama triangular revela uma

diversidade de texturas entre as camadas, porém majoritariamente os solos apresentam elevado teor de areia em suas composições.

Figura 12 - Diagrama de Classes Texturais dos Solos



Fonte: Adaptado da Sociedade Brasileira de Solos.

Uma análise geral demonstra que todas as camadas que compõem o perfil da barragem subterrânea são predominantemente de textura arenosa, essa percepção fica muito evidente analisando o triângulo da Figura 12. Observa-se a presença de mais de 80% de areia nas camadas superficiais, 2, 3 e 4, entretanto, o maior teor de areia foi observado na camada 4, com o destaque de 95 % da fração areia. A camada que apresentou menor teor de areia (65 %) e o maior de argila (19 %) foi a camada 5. A camada superficial foi classificada como Areia Franca com 82 % de areia em sua composição. A camada 2 foi classificada como Franco Arenoso, a camada 4 foi classificada como Areia e a camada 5 como Franco arenoso.

Analisando o resultado da massa específica das partículas da Tabela 2, foi observado que existe uma grande variação dessa propriedade entre as 5 camadas, variando de 1,2 a 1,58 g/cm³. Essa informação é relevante porque traduz a estruturação do solo, bom como o quantitativo de espaços vazios de cada camada. Algumas propriedades hidrodinâmicas com já informado, são diretamente dependentes da estrutura do solo, indicando que pode ocorrer comportamentos hidrodinâmicos distintos entre as camadas. O impacto de camadas com diferentes comportamentos hidrodinâmicos é muito relevante por exemplo para modelagens do fluxo subsuperficial da barragem. A predição do balanço hídrico da barragem ou até mesmo da estimativa da recarga do reservatório

podem ser influenciadas pela heterogeneidade do depósito aluvionar. Nesse contexto, informações detalhadas sobre essas formações são necessárias para previsões precisas de fluxos, na zona não saturada dessas estruturas (Klingbeil et al., 1999). A camada 5 foi a que apresentou material mais fino em sua composição em relação às demais camadas, o que pode indicar uma mudança abrupta de comportamento hidrodinâmico, considerando todo o perfil do depósito aluvionar.

A predominância de solos arenosos é um padrão comum para solos de depósitos aluvionares da região semiárida brasileira, como é o caso da barragem subterrânea estudada. Essa característica dos solos aluvionares ocorre principalmente devido ao seu processo de formação natural. A formação desses depósitos ocorre com acúmulo de partículas de maior diâmetro nas calhas menores dos rios e riachos intermitentes. Esse acúmulo se dá principalmente pelas chuvas concentradas da região semiárida, que provocam enxurradas, acarretando o acúmulo de partículas de maior diâmetro e o arrasto das partículas de menor diâmetro, resultando em perfil de solo aluvionares predominantemente arenosos, com cascalhos de variados diâmetros e elevada heterogeneidade (Braga et al., 2015).

A zona vadosa desempenha uma posição central nos processos de transferência de água. Assim, a previsão dos processos de fluxos não saturados em depósitos de sedimentos aluvionares é uma tarefa árdua, por serem formações altamente heterogêneas (Goutaland et al., 2008). Por exemplo, a heterogeneidade estrutural desses depósitos pode levar a formações de fluxos preferenciais, e a compreensão dos fluxos preferências é alvo de diversas pesquisas, na qual, se destaca a complexidade da compreensão desses processos em meios naturalmente heterogêneos.

O resultado da análise da curva granulométrica das 5 camadas que compõe o perfil da barragem subterrânea demonstra que existem variações de composição granulométricas entre as camadas analisadas. Principalmente quando se confronta o teor de areia e argila da camada 5 com as demais camadas. Isso demonstra a heterogeneidade estrutural que é atribuída naturalmente aos depósitos aluvionares. Essa informação é crucial para compreender melhor as propriedades físicas e químicas do solo e suas implicações para práticas agrícolas, manejo de recursos naturais e conservação do meio ambiente.

Além disso, essa informação permite que em futuras modelagens dos processos de fluxo na barragem subterrânea sejam realizadas considerando a hipótese de heterogeneidade, tornando a predição de fluxo mais fidedigna ao que ocorre no ambiente natural.

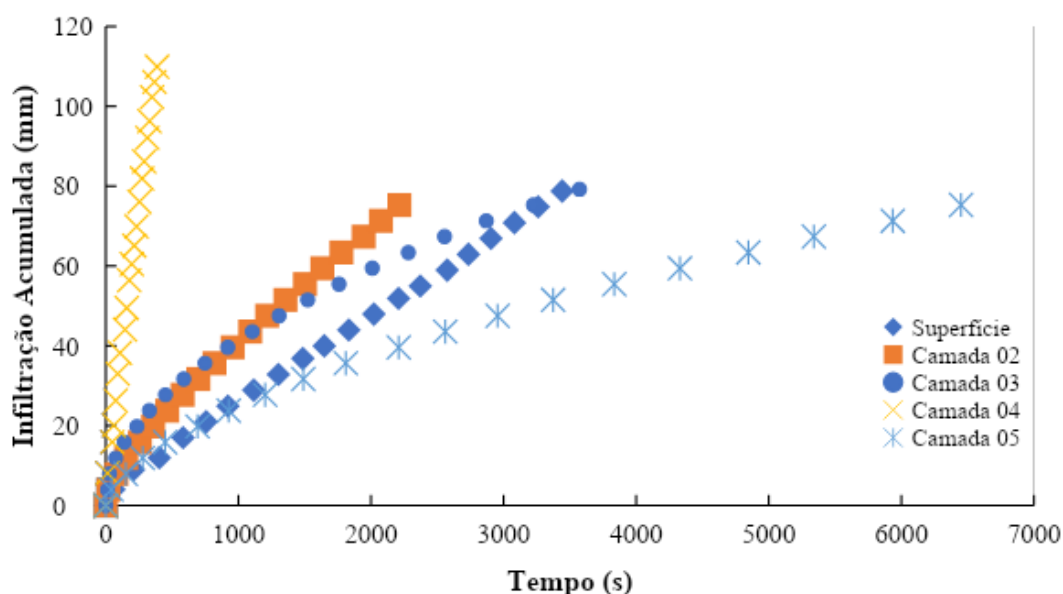
5.2. Propriedades Hidrodinâmicas dos Solos

Na Figura 13 são apresentadas as médias das curvas das lâminas infiltradas acumuladas, resultantes dos ensaios de infiltração das 5 camadas do subsolo da barragem subterrânea. Para cada camada de solo foram realizadas 3 repetições.

Observa-se que na camada superficial uma lâmina total de 78,77 mm infiltrou em 3442 segundos; para a camada 2, a lâmina de 79,22mm infiltrou em 2370 segundos e para as camadas das 3, 4 e 5, a lâmina total infiltrada foi, 79,22, 109,90 e 75,26 mm,

respectivamente, enquanto os tempos totais em segundos para infiltração foram 3.573, 387 e 6.450.

Figura 13 - Curvas médias de infiltração acumulada das 5 camadas da barragem subterrânea. A) Superfície; B) Camada 2; C) Camada 3; D) Camada 4 e E) Camada 5.



Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos parâmetros de forma e n , m e η para cada perfil de solo investigado, obtidas pelo BEST.

Tabela 3 - Resultado dos parâmetros de forma das funcionais de n , m e η .

Parâmetros	Superfície	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
n	2,32	2,24	2,4	2,71	2,16
m	0,13	0,10	0,16	0,26	0,07
η	9,17	7,81	7,96	5,79	15,13

Fonte: O Autor (2024).

Os parâmetros m e n exibem uma dependência da textura do solo, conforme esperado devido às características físicas e estruturais do material. Este achado corrobora com a compreensão tradicional de que solos com variações texturais e estruturais possuem propriedades hidrodinâmicas distintas, que podem influenciar diretamente nas propriedades hidrodinâmicas do solo.

Os valores de n variaram de 2,16 para o solo tipo Franco Arenoso com 65 % de areia em sua composição, chegando até 2,71 para o solo tipo Areia com 95 % de areia em sua composição. Os valores de m variaram de 0,07 para o Franco Arenoso e 0,26 para o solo tipo Areia. De acordo com Souza (2008), os parâmetros m e n estão diretamente atrelados a textura, logo foram maiores para os solos que apresentaram maior teor de areia, enquanto valor de η foram menores, esta relação inversa entre n e η se deve método

matemático para a obter o η . Conforme relatado por Souza (2008), seus resultados indicaram que o solo Franco Argilo Arenoso apresentou valores de m e n de 0,06 e 2,12, respectivamente.

Essa diferenciação nos valores dos parâmetros m e n entre os diferentes tipos de solo evidencia a influência das características específicas do solo na dinâmica da infiltração, destacando a importância da consideração desses fatores na interpretação dos resultados e na modelagem do trabalho.

Em um estudo conduzido por Gomes et al. (2015), foram avaliados os parâmetros da curva de retenção e condutividade hidráulica em um solo arenoso. Os resultados revelaram valores médios ligeiramente superiores para os parâmetros m e n obtidos nesse estudo, registrando 0,173 e 2,50, respectivamente. Enquanto o valor médio para η foi relativamente inferior, atingindo 10,714. Esses resultados destacam a variabilidade nos parâmetros do solo e sua influência na capacidade de retenção de água e na condutividade hidráulica, enfatizando a importância de uma caracterização detalhada do solo para uma compreensão precisa de seu comportamento hidrológico.

Em um estudo conduzido por Braud (2004), as propriedades hidráulicas de solo não saturado foram estimadas utilizando o método Beerkan. Os resultados revelaram valores de m e n de 0,839 e 2,793, respectivamente, para um solo arenoso, e de 0,099 e 2,220, respectivamente, para um solo argiloso. Em estudos conduzidos por Souza (2008), foram registrados valores de η igual a 9,54. Já no trabalho de Santos (2012), o fator de forma n foi de 2,569 e o valor de η foi de 6,622.

Ao confrontar os resultados obtidos para as 5 camadas que compõe a barragem subterrânea com trabalhos que realizaram a caracterização hidrodinâmica em solos de textura semelhantes como Souza (2008), Gomes (2015), Braud (2004) e Santos (2012), se observa que os valores de n , m e η estão bastante próximos, indicando que o método Beerkan foi aplicado corretamente, assim como a confiabilidade dos resultados.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos parâmetros de normalização h_g , K_s e S resultantes do ajuste das curvas de retenção e de condutividade hidráulica obtidas pelo BEST.

Tabela 4 - Análise média dos parâmetros hidrodinâmicos.

	Superfície	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
h_g (mm)	-36,2082	-68,1574	-79,8308	-114,2674	-46,3963
K_s (mm.s ⁻¹)	0,01	0,004	0,001	0,03	0,001
S (mm.s ^{-0,5})	0,3641	0,7347	0,2094	1,308	0,180

Fonte: O Autor (2024).

A condutividade hidráulica saturada (K_s) é um parâmetro fundamental na caracterização das propriedades hidrodinâmicas do solo, que indica a permeabilidade dos solos estudados. Considerando todo o perfil, a condutividade hidráulica saturada (K_s) apresentou valor médio de 0,01 mm.s⁻¹, sendo o maior valor do solo tipo Areia (Camada 4) com 0,03 mm.s⁻¹, e menor valor de K_s foi de 0,001 mm.s⁻¹ para a camada 3 e 5. Os valores baixos de K_s para a camada 3 e 5 podem estar relacionados com os elevados

valores da massa específica das duas camadas. Quanto maior o valor da massa específica do solo, menor é o quantitativo de vazios para permeabilidade de água. O valor médio de K_s obtido nesse estudo foi menor que os demais estudos realizados com solos de características semelhantes como França Neto (2021) que obteve K_s médio de $0,02 \text{ mm.s}^{-1}$, Souza (2008) que obteve valor médio de K_s de $0,5 \text{ mm.s}^{-1}$ e Silva (2018) que obteve K_s médio de $0,4 \text{ mm.s}^{-1}$ para solos arenosos na região do Cariri Paraibano.

Os valores de h_g variaram de $-36,2082$ a $-114,2674$, respectivamente, para a camada mais superficial e a camada 4. O h_g é um valor crítico do potencial matricial do solo, a partir do qual ocorre a dessaturação, conhecido como potencial de entrada de ar. É importante ressaltar que a predominância de areia na textura do solo tem influência direta no potencial matricial, afetando a capacidade de retenção de água. Em contrapartida, solos com textura argilosa possuem uma capacidade de retenção de água mais favorável, devido às características do potencial matricial. A sorvidade do solo traduz a capacidade do solo absorver água por capilaridade e depende essencialmente da variação do teor volumétrico de água entre o início e o final da infiltração. Este estudo obteve valores entre $1,308$ e $0,180 \text{ mm.s}^{-0,5}$.

Após a definição dos parâmetros de forma (m ou n e η) e de normalização (θ_s , K_s e h_g), as curvas de condutividade hidráulica ($K(\theta)$) e as curvas de retenção da água no solo ($h(\theta)$) foram construídas para os solos de cada camada, conforme apresentado nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Curva de Condutividade Hidráulica.

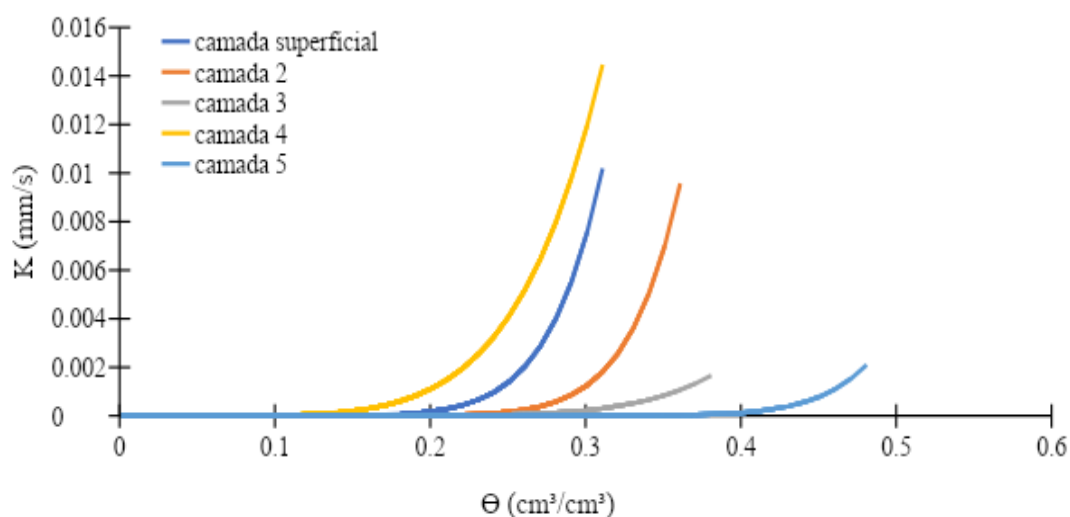
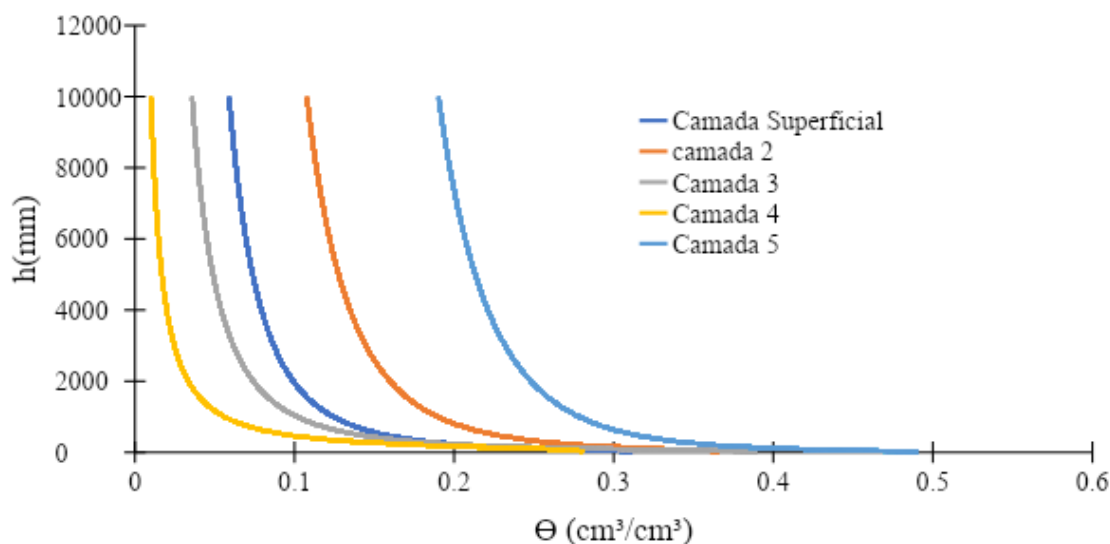


Figura 15 - Curvas de retenção da água no solo.



Fonte: O Autor (2024).

Nota-se uma considerável heterogeneidade nessas curvas. Isso sugere variações significativas nas propriedades do solo entre as diferentes camadas, o que pode ter implicações importantes para a compreensão do movimento da água no solo, principalmente para levantamentos voltados à realização de modelagens numéricas como ferramenta de gestão hídrica para o barramento.

Entre as várias alterações que a heterogeneidade do solo pode provocar nos processos de fluxo, a formação de fluxos preferenciais (FP) vem recebendo bastante atenção. Goutaland e colaboradores (2008) ressaltam que a heterogeneidade de sedimentos de formações aluvionares pode formar fluxos preferenciais devidos às diferentes propriedades hidrodinâmicas presentes ao longo do perfil do subsolo. Desta maneira, o desenvolvimento de fluxo preferenciais são atribuídos à heterogeneidade da textura e da estrutura (Cannavo et al., 2010). Os principais fenômenos relacionados à formação de fluxos preferenciais são a formação de barreiras capilares, barreiras hidráulicas e anisotropia entre camadas.

Todos esses fatores podem complicar bastante as modelagens numéricas que visam prever o comportamento hidrodinâmico de uma barragem subterrânea implantada em um depósito de sedimentos aluvionares. Esse tipo de problemática vem sendo investigada por outros autores como Goutaland (2008), que realizaram uma caracterização hidrodinâmica detalhada dos diferentes materiais que compõem as estruturas da zona não saturada, visando destacar os fluxos preferenciais. Coutinho (2015) realizaram uma modelagem do fluxo de água considerando uma geometria homogênea e heterogênea. Predelus (2015) analisaram o efeito combinado da barreira capilar e camadas em declive dos processos de transferência de água em uma modelagem 3D observando acúmulo de água na interface dos dois materiais.

6. CONCLUSÕES

Os resultados revelaram 3 tipos de texturas distintas dentro do perfil de solo de 120cm da barragem subterrânea localizada na região semiárida pernambucana, sendo franco arenoso, areia franca e arenosa. Por meio do método Beerkan, foram obtidos resultados consistentes para os parâmetros de forma e de normalização dos solos estudados, alinhados com o que é reportado na literatura. As curvas de retenção e condutividade hidráulica demonstraram comportamentos coerentes, e a metodologia proporcionou ajustes precisos das infiltrações acumuladas.

O método Beerkan se destacou como uma ferramenta apropriada e robusta, capaz de modelar com precisão a infiltração tridimensional no campo. Sua aplicação permitiu uma caracterização hidrodinâmica minuciosa das diferentes camadas de solo em diversos pontos de amostragem. Além disso, sua facilidade de uso, rapidez e baixo custo tornaram-no uma opção viável e acessível para o estudo das propriedades hidráulicas do solo.

Os resultados também demonstram que existe uma variação relevante das propriedades hidrodinâmicas entre as 5 camadas de solo que compõem o perfil do depósito aluvionar em que a barragem foi implementada. As variações ficam evidentes quando se analisa os parâmetros de normalização e principalmente nas curvas de condutividade hidráulica e de retenção da água no solo fornecidas pelo BEST. Demonstrando que a heterogeneidade de textura e estrutural do depósito pode complexar o comportamento hidrodinâmico do perfil, e que adoção do comportamento hidrodinâmico da superfície pode negligenciar bastante o real comportamento hidrodinâmico do depósito aluvionar, principalmente em trabalhos onde serão realizadas modelagens numéricas como ferramenta de gestão dos recursos hídricos da barragem subterrânea.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas — NBR 7181: Solo – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 16p., 2017.
- AB'SABER, A. N. O Nordeste semiárido e a questão da desertificação. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 17, n. 47, p. 7-23, 2003.
- ALVES, M. R., et al. Integrated Approach for Sustainable Implementation of Subterranean Dams. *Environmental Science & Policy*, 117, 235-244, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA); FUNDACEP; SEMARH; INMET; FUNCEME. Monitor de Secas do Nordeste. Fortaleza: FUNCEME, 2021. Disponível em: <http://www.monitoradesecas.ana.gov.br/nordeste/>.
- ALBUQUERQUE, A. F. et al. Análise morfométrica de bacias hidrográficas no semiárido nordestino: bacia do rio Vaza Barris, Sergipe. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(3), 609-620, 2018.
- ALMEIDA, C. A. S. et al. Hidrofísica de solos arenosos sob Caatinga em municípios do Estado de Sergipe. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43, e0190085, 2019.
- ALMEIDA, E. Caracterização de curvas de retenção de água em solos arenosos e argilosos. Universidade de São Paulo, 2006.
- ALVES, F. C. Análise do fluxo de água em um solo afetado por níveis freáticos rasos. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.
- ALVES, M. C. Curva de retenção de água no solo. Universidade Federal do Paraná, 2015.
- AMORIM, R. S. S. et al. Agroecologia e agricultura familiar: reflexões sobre o. (Ano não especificado)
- ANGULO-JARAMILLO, R. et al. Improving the best model to estimate soil hydraulic properties from beerkan infiltration experiments. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(3), 04020004, 2020.
- ANGULO-JARAMILLO, R. et al. A dual constant-head permeameter to measure the saturated hydraulic conductivity of soil layers. *Journal of Hydrology*, 529, 282-291, 2015.
- ARAÚJO, E. M.; BEZERRA, F. H. R.; SILVA, A. P. F. Desempenho das barragens subterrâneas no semiárido nordestino brasileiro. *Caderno de Geografia*, 31(2), 1-16, 2021.
- BEAUDETTE, D. E.; ROUDIER, P.; O'GEEN, A. T. Soil survey maps as predictors of fine-scale spatial variation in soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1), 138-147, 2013.
- BEZERRA, F. H. R. et al. Geologia e geomorfologia da região Nordeste do Brasil. In: *Região Nordeste: Geografia, Meio Ambiente e Desenvolvimento* (pp. 33-67). Editora CRV, 2020
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRAGA, R. A. P. *Gestão e educação socioambiental na Bacia do Capibaribe*. 1º ed. Recife Ed. Clã, 144p.: il. ISBN 978-85-61428-08-2, 2015.
- BRAUD, I. et al. A new mechanistic model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 2004.
- BRAUD, I. et al. A new mechanistic model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 41(1), 1-12, 2005
- BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. de (Ed.). *Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical*. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 788 p.(2023)

- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrology Paper, n. 3, 1964.
- BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, v. 5, n. 03, p. 71-78, 1953.
- Castillo Gálvez, L.E.; Martínez Godoy, D. Mercado de tierras agrícolas y desterritorialización: Una mirada desde los Andes ecuatorianos. (2021)
- CANNAVO P., et al. Spatial distribution of sediments and transfer properties in soils in a stormwater infiltration basin. *Journal of Soils and Sediments*. v.10. p.1499-1509, 2010.
- COUTINHO A.P., et al. Vadose zone heterogeneity effect on unsaturated water flow modeling at meso-scale. *Journal of Water Resource and Protection*, v.7, p. 353-368. 2016.
- DARCY, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Dalmont, 1856.
- DUAN, W. et al. Estimation of field soil hydraulic properties using a two-layer water flow model and temporal stability analysis. *Journal of Hydrology*, 559, 693-706, 2018.
- EMBRAPA SOLOS. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- EMBRAPA SOLOS. O que é solo? Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/o-que-e-solo>. Acesso em: 11 abr. 2023.
- FERNANDES, A. M. et al. Modeling water infiltration in soil: A review of state-of-the-art and recent advances. *Environmental Modeling & Assessment*, v. 26, n. 4, p. 429-451, 2021.
- FERREIRA, L. F., et al. Environmental Sustainability Assessment of Subterranean Dams: A Review. *Sustainability*, 11(16), 4373 (2019).
- FEIJEN-de Jong, E., & Kool, L. (2019). Transition to Practice for Newly Qualified Midwives in the Netherlands. In *Starting Life as a Midwife* (pp. 167–179). Publicado online em 11 de abril de 2019.
- FRANÇA NETO, J. M. D., et al. Variability and spatial distribution of hydrodynamic properties in soil with preserved Caatinga. *RBRH*, 26, e20, 2021.
- GARDNER, W. H. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), 228-232, 1958.
- GHAZAVI, F. et al. Soil texture affects soil water retention, infiltration and yield of maize in an arid region. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 20, n. 2, p. 411-424, 2020.
- GOUTALAND, D. et al. Hydrostratigraphic characterization of glaciofluvial deposits underlying an infiltration basin using ground penetrating radar. *Vadose Zone Journal*, v. 7, p. 194-207, 2008.
- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M. A review of parameterizations of soil hydraulic properties and of infiltration models for unsaturated soils. *Reviews of Geophysics*, 36(3), 353-389, 1998.
- HILLEL, D. Introduction to Environmental Soil Physics. Academic Press, 2013.
- HUNT, A. G. et al. Soil Heterogeneity. In *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 1-8). CRC Press, 2018.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
- JALBERT, J.; DANE, J. H. Tensiometry. In *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods* (pp. 435-456). Soil Science Society of America, 2001.
- KHARAZI, P.; YAZDANI, M. R.; KHAZEALPOUR, P. Suitable identification of underground dam locations, using decision-making methods in a semi-arid region of Iranian Semnan Plain. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 9, p. 100240, 1 out. 2019.
- KIM, H. et al. Estimation of Soil Hydraulic Parameters using the Difference between Rainfall and Infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(4), 05021006, 2021.

- KLAR, A. Capillary pressure-saturation relationships for water in soils. *Journal of Hydrology*, 100(1-3), 25-55, 1988.
- KLINGBEIL, R. et al. Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits. *Sedimentary Geology*. v.129, p.299–310, 1999.
- KUMAR, S. et al. Underground water storage for enhancing agriculture production in arid regions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 174-181, 2013.
- Lazaro, L. L. B., Abram, S., Giatti, L. L., Sinisgalli, P., & Jacobi, P. R. (Year) Assessing water scarcity narratives in Brazil – Challenges for urban governance. (2023).
- LASSABATÈRE, L. et al. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521-532, 2006.
- LIBARDI, P. L. Propriedades físicas e mecânicas dos solos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p. 89-160.
- LIBARDI, P. L.; MELO FILHO, J. F. Medição da condutividade hidráulica do solo: um desafio constante. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 4, p. 535-543, 2006.
- LIMA, J. R., et al. Hydrodynamic Characterization of Subterranean Dams. *Water Resources Management*, 32(10), 3375-3390. (2018).
- LUCAS-BORJA, M. E. et al. Evaluation of soil water infiltration in a Mediterranean natural area affected by wildfires. *Catena*, v. 173, p. 456-467, 2019.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522, 1976.
- OLIVEIRA, J. B. et al. Agricultura de Precisão no Manejo de Sistemas Agrícolas na Região Semiárida. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA DO CAMPUS AVANÇADO DO SERTÃO DO IF-SERTÃO/PE, 5., 2021, Salgueiro. *Anais [...]*. Salgueiro: IF-Sertão/PE, 2021. p. 25-29.
- OLIVEIRA, L. C. et al. Sistemas agroflorestais como alternativa à convivência com o semiárido. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 12(2), 1036-1047, 2018.
- OLIVEIRA, P. T. S.; SILVA, P. T.; SILVA, E. M. Barragens subterrâneas: características e eficiência na recarga de água subterrânea. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(5), 346-351, 2017.
- PAULETTO, E. A.; VIEIRA, S. R.; KER, J. C. Parâmetros hidráulicos do solo para fins de modelagem de fluxo e transporte de solutos. *Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, 1988.
- PRÉDÉLUS, D., et al. Combined effect of capillary barrier and layered slope on water, solute and nanoparticle transfer in an unsaturated soil at lysimeter scale. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 181, p. 69–81, 2015.
- PREVEDELLO, C.L.; ARMINDO, R.A. Caracterização e classificação de solos. In: SILVA, S.H.G. (ed.). *Solos: Genesis, classificação, degradação e recuperação*. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. p. 87-114.
- POURALI D., M., Ashofteh, P. S., & Loáiciga, H. A. . Urban stormwater management using low-impact development control measures considering climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 154, 1021–1033(2023)
- REICHARDT, K. Processos de transporte no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo: Agronômica Ceres, 2002.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, água e nutrientes. *Estudos avançados*, v. 18, n. 50, p. 183-198, 2004.

- REYNOLDS, W.D. et al. In situ measurement of soil permeability by the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1996-2003, 2002.
- ROSA, D. A. et al. Evaluation of infiltration measurement methods for sandy soils in the semiarid region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 146, n. 3, p. 04019071, 2020.
- SAMPAIO, E. V. S. B.; SOUZA, E. D.; SOUZA JÚNIOR, V. S. Barragens subterrâneas: recarga de aquíferos e reuso de água. *Embrapa Agroindústria Tropical-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, 1-8, 2016.
- SAMPAIO, J. A. et al. Parâmetros físicos do solo em diferentes tipos de vegetação no semiárido baiano. *Irriga, Botucatu*, v. 25, n. 2, p. 256-269, 2020.
- SANTOS, E. A. et al. Percepção de produtores rurais sobre a implantação de barragens subterrâneas no semiárido paraibano. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 11(3), 1843-1853, 2017.
- SANTOS, A. B., et al..Advanced Hydrodynamic Characterization Techniques for Subterranean Dams. *Journal of Hydrology*, 582, 124584. (2020).
- SILVA, T. G. et al. Floristic and phytogeographic analysis of the caatinga in the state of Bahia, Brazil. *Rodriguésia*, 72, e01612019, 2021.
- SILVA, T. C., et al.Advancements in Hydrodynamic Characterization for Subterranean Dams. *Journal of Hydrological Sciences*, 67(2), 378-39 (2022).
- SOUZA, E. D.; SILVA, D. D.; BICALHO, S. T. Propriedades hidráulicas do solo utilizando o método do infiltrômetro de anel em diferentes escalas. *Engenharia Agrícola*, 28(3), 564-574, 2008.
- SOUZA, R. F. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada em áreas de Caatinga no Piauí. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(7), 496-503, 2021.
- ŠIMŮNEK, J. et al. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 1.0. Technical Manual, PC Progress, Prague, Czech Republic, 2016.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898, 1980.
- YE, M., Zhang, J., Zhao, S., Liu, J., Liu, T., Du, B., & Tao, D.DeepSolo: Let Transformer Decoder With Explicit Points Solo for Text Spotting. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 19348-19357).(2023)
- ZHANG, L. et al. The heterogeneity of soil properties is closely related to plant communities and soil processes in a sand dune ecosystem. *Catena*, 199, 105161, 2021.
- ZHANG, R.; VAN GENUCHTEN, M. T. Field-scale water flow and solute transport using the Richards equation with multisegment piecewise linear approximations. *Water Resources Research*, 30(7), 2031-2046, 1994.