



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO ACADÊMICO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

PRISCILA KARINE RODRIGUES DE SOUSA

**ANÁLISE DE ASPECTOS FÍSICOS, HIDRÁULICOS E HIDROLÓGICOS
DE DUNAS MÓVEIS E ESTABILIZADAS ARTIFICIALMENTE**

FORTALEZA - CE

2021

PRISCILA KARINE RODRIGUES DE SOUSA

ANÁLISE DE ASPECTOS FÍSICOS, HIDRÁULICOS E HIDROLÓGICOS
DE DUNAS MÓVEIS E ESTABILIZADAS ARTIFICIALMENTE

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Hidrologia.

Orientador: Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias.

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar.

FORTALEZA - CE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SOUSA, PRISCILA KARINE RODRIGUES DE.
ANÁLISE DE ASPECTOS FÍSICOS, HIDRÁULICOS E HIDROLÓGICOS DE DUNAS
MÓVEIS E ESTABILIZADAS ARTIFICIALMENTE / PRISCILA KARINE RODRIGUES DE
SOUSA. - 2021.
91 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão
Ambiental, Campus Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias :
Coorientação: Profa. Dra. Marcos Fábio Porto de Aguiar .

1. Solo. 2. Dunas. 3. Caracterização. 4. Condutividade hidráulica. 5. Métodos empíricos. I.
Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.008084/2021-66

Interessado: Coordenadoria do Curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental
(PGTGA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

PRISCILA KARINE RODRIGUES DE SOUSA

ANÁLISE DE ASPECTOS FÍSICOS, HIDRÁULICOS E HIDROLÓGICOS DE DUNAS MÓVEIS E ESTABILIZADAS ARTIFICIALMENTE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Hidrologia.

Aprovada em: 29/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Teresa Raquel Lima Farias, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 30/09/2021, às 18:37, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waleska Martins Eloi, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 30/09/2021, às 19:31, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Borghetti Soares, Usuário Externo**, em 06/10/2021, às 11:11, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Fabio Porto de Aguiar, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 14/10/2021, às 11:32, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=3487126&infra_siste... 1/2



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3001148** e o código CRC **811B9E22**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, e por seu sustento e providência em todos os momentos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental - PGTGA, pelo seu corpo docente, coordenação e administração, que oportunizaram o horizonte superior que hoje vislumbro, pela formação acadêmica e humana aqui adquirida.

Aos meus colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos - LMS, que me auxiliaram nas coletas e ensaios, são eles: professor Saboia, Lívia, Luan, Andressa, Cíntia, entre outros.

Ao Laboratório de Física do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará - UFC, na pessoa do Prof. Dr. Jaedson Mota (coordenador), e do técnico do laboratório Francisco José da Silva (Franzé), pela parceria e auxílio na execução do ensaio de determinação da macro e microporosidade do solo.

Aos meus amigos e colegas do mestrado, que trilharam comigo este caminho de formação acadêmica, com companheirismo e dedicação. Em especial à Adrya e Joana, verdadeiros presentes de Deus, pela amizade, companheirismo, contribuições e sugestões ao longo de todo curso.

À minha orientadora, professora Teresa, pela excelente orientação, sempre acompanhando e auxiliando durante toda a realização da pesquisa, pelas suas correções e incentivos. Ao meu coorientador, professor Marcos Porto, pelos conselhos e contribuições.

À Banca Examinadora, Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares e Profa. Dra. Waleska Martins Eloi, por aceitarem o convite de participação na qualificação e na defesa. Em especial, ao professor Anderson por ter cedido o software Vadose W para a execução da modelagem.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP, pelo auxílio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu querido esposo, Romário Pontes, por todo o suporte e apoio imprescindível, paciência e prontidão em sempre querer ajudar. Sempre serei grata.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte desse período de formação, o meu muito obrigado.

*Os rios não bebem sua própria água; as
árvores não comem seus próprios frutos.*

*O sol não brilha para si mesmo; e as
flores não espalham sua fragrância para
si.*

*Viver para os outros é uma regra da
natureza. (...)*

*A vida é boa quando você está feliz; mas
a vida é muito melhor quando os outros
estão felizes por sua causa.*

Papa Francisco

RESUMO

A quantidade de dados disponíveis sobre os efeitos da estabilização induzida de dunas em suas propriedades físico-hídricas é limitada, especialmente em dunas costeiras do Ceará. Nesse sentido, esta pesquisa busca caracterizar essas propriedades de dunas localizadas às margens de uma rodovia, no município de Aquiraz, cujo trecho foi estabilizado por meio da aplicação de palhas de coqueiro (palhagem), em que houve posterior desenvolvimento de vegetação. Amostras deformadas e indeformadas foram obtidas da camada superficial do solo (0 – 0,15 m), para determinação dos seguintes parâmetros: granulometria, massa específica aparente, densidade real, condutividade hidráulica saturada (K_s), macro e microporosidade do solo, além de curva de retenção de água. Avaliaram-se cinco equações empíricas para estimativa indireta de condutividade hidráulica saturada, por meio de parâmetros da granulometria e porosidade do solo, comparando-se valores medidos em laboratório e modelados pelas equações. Os resultados indicaram que, em termos de caracterização, as propriedades físicas do solo sem cobertura possuem a mesma ordem de grandeza do solo com vegetação. Em contrapartida, o teste T para comparação de médias indicou que o solo com vegetação possui valores de porosidade total e macroporosidade estatisticamente maiores que os do solo natural. Ao comparar parâmetros hidráulicos, observou-se que a condutividade hidráulica (normal e transformada) e a curva de retenção de água apresentam resultados, levemente, maiores para o solo com vegetação. Dentre as equações empíricas aplicadas na determinação da condutividade hidráulica saturada, observou-se que os valores de K_s estimados pelos modelos de Hazen (modificado) e de Beyer, foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos em laboratório. Os resultados para o balanço hídrico após processamento do modelo com o Vadose/W, mostraram-se incoerentes com os valores típicos de uma região de dunas. Isso aconteceu, provavelmente, devido à problemas de convergência, pelo fato de o solo ser arenoso.

Palavras-chave: Solo. Dunas. Caracterização. Condutividade hidráulica. Métodos empíricos.

ABSTRACT

The amount of data available on the effects of induced stabilization of dunes on their physical-hydric properties is limited, especially in coastal dunes in Ceará. In this sense, this research seeks to characterize these properties of dunes located on the margins of a highway, in the municipality of Aquiraz, whose stretch was stabilized through the application of coconut straw (mulch), in which there was further development of vegetation. Deformed and undisturbed samples were obtained from the soil surface layer (0 - 0.15 m), to determine the following parameters: granulometry, bulk density, real density, saturated hydraulic conductivity (K_s), soil macro and microporosity, in addition to water retention curve. Five empirical equations were evaluated for indirect estimation of saturated hydraulic conductivity, through parameters of soil particle size and porosity, comparing values measured in the laboratory and modeled by the equations. The results indicated that, in terms of characterization, the physical properties of the bare soil have the same order of magnitude as the soil with vegetation. On the other hand, the T test for comparison of means indicated that the soil with vegetation has values of total porosity and macroporosity statistically higher than those of the natural soil. When comparing hydraulic parameters, it was observed that the hydraulic conductivity (normal and transformed) and the water retention curve present results, slightly, higher for the soil with vegetation. Among the empirical equations applied in the determination of saturated hydraulic conductivity, it was observed that the values of K_s estimated by the Hazen (modified) and Beyer models were the closest to the values obtained in the laboratory. The results for the water balance after processing the model with Vadose/W were inconsistent with the typical values of a dune region. This was probably due to convergence problems, due to the fact that the soil is sandy.

Keywords: Soil. Dunes. Description. Hydraulic conductivity. Empirical methods.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação do Potencial de Deriva (DP)	26
Equação 2 – Condutividade hidráulica (K)	33
Equação 3 – Condutividade hidráulica saturada (Ks) pelo método do Permeâmetro à Carga Constante (PCC)	34
Equação 4 – Equação de Van Genuchten (1980) para obtenção da curva característica	38
Equação 5 – Equação de Van Genuchten (1980) para obtenção da curva de condutividade hidráulica	38
Equação 6 – Equação de Van Genuchten (1980) para obtenção da curva de condutividade hidráulica	40
Equação 7 – Equação de Fredlund e Xing (1994) para obtenção da curva de condutividade hidráulica	40
Equação 8 – Porosidade total (Pt)	61
Equação 9 – Macroporosidade (Ma)	62
Equação 10 – Microporosidade (Mi)	62
Equação 11 – Equação de Penman-Wilson para o cálculo da evaporação superficial(ER)	74
Equação 12 – Equação para o cálculo da evaporação superficial modificada (ERmod)	74
Equação 13 – Equação para o cálculo da Transpiração Potencial (TP)	75
Equação 14 – Equação para o cálculo da Transpiração Real (TR)	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dunas estabilizadas pela palhagem	20
Figura 2 – Curva de histerese que representa a relação entre a energia do vento e a cobertura vegetal	28
Figura 3 – Placa de sucção	32
Figura 4 – Curva de retenção de água típicas para solo arenoso, siltoso e argiloso	36
Figura 5 – Curva de retenção de água típica para um solo siltoso	37
Figura 6 – Técnica do papel filtro: a) sem contato; e b) com contato	39
Figura 7 – Curva de retenção (a) e condutividade hidráulica (b) para areia e silte argiloso	41
Figura 8 – Mapa de localização da APA do Rio Pacoti,....	46
Figura 9 – Dunas dômicas	49
Figura 10 – Relação entre a geologia e a geomorfologia da faixa leste da RMF	50
Figura 11 – Pluviometria anual para o período entre 2000 e 2019	53
Figura 12 – Temperatura máxima média anual para o período de 2000 a 2020.	54
Figura 13 – Velocidade máxima anual para o período de 2000 a 2020	55
Figura 14 – Vegetação fixadora da duna em estudo, sendo (a) capim-da-praia (<i>Paspalum vaginatum</i>), (b) cipó-da-praia (<i>Remirea marítima</i>), (c) bredo-da-praia (<i>Iresine portulacoides</i>) e (d) salsa-da-praia (<i>Ipomoea pescaprae</i>)	56
Figura 15 – Mapa de localização da área de estudo	57
Figura 16 – Cravação e retirada dos cilindros	60
Figura 17 – Mesa de tensão submetida a um potencial de 0,6 mca (-6 kPa)	62
Figura 18 – Ensaio para obtenção da condutividade hidráulica saturada (K_s) pelo método do Permeâmetro à Carga Constante	63
Figura 19 – Ensaio para obtenção da curva característica pelo método do Papel Filtro	64
Figura 20 – Configurações dos modelos estudados	68
Figura 21 – Curva de retenção de água gerada no modelo	69
Figura 22 – Curva de condutividade hidráulica gerada no modelo	70

Figura 23 – Obtenção do IAF do solo com vegetação por meio do software AutoCAD	71
Figura 24 – Evolução do Índice de Área Foliar com o decorrer do tempo gerada no modelo	72
Figura 25 – Umidade limite de planta gerada no modelo	72
Figura 26 – Crescimento das raízes com o decorrer do tempo gerada no modelo	73
Figura 27 – Box-Plot da composição granulométrica para solos de dunas com e sem cobertura vegetal	77
Figura 28 – Curva granulométrica, diâmetro efetivo (d_{10}), coeficiente de uniformidade (C_u) e de coeficiente de curvatura (C_c) para solos de dunas com e sem cobertura vegetal	77
Figura 29 – Diagrama de caixa (blox-plot) e histogramas de Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade do solo, com e sem cobertura vegetal	79
Figura 30 – Condutividade hidráulica saturada (K_s) e transformada ($\text{Log}K_s$) para os dois tipos de solos, com e sem cobertura vegetal, na camada de 0 – 0,15 m	80
Figura 31 – Curva de retenção de água do solo com e sem vegetação	81
Figura 32 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos pelo método direto e pelo método indireto para o solo das áreas com vegetação (a) e sem vegetação (b), a linha contínua representa relação de igualdade perfeita	83
Figura 33 – Condutividade hidráulica estimada utilizando os 5 métodos empíricos em todas as amostras de solo em comparação com medições de condutividade hidráulica medidas	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações da estação de coleta de dados climatológicos de Fortaleza	54
Tabela 2 – Coordenadas dos vértices 1, 2, 3, 4, 1A, 2A, 3A, e 4A, que delimitam os polígonos da área de estudo	58
Tabela 3 – Equações empíricas utilizadas para estimativa da condutividade hidráulica por meio de dados de granulometria e porosidade do solo	66
Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos dados de massa específica aparente seca (gs em g/cm^3), densidade real (δ), % retida de areia média e fina, porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) para solo de duna com e sem cobertura vegetal, na camada de 0 – 0,15 m	76
Tabela 5 – Estatísticas descritivas, valores medidos e modelados de condutividade hidráulica saturada (Ks) para os dois tipos de solo, com e sem cobertura vegetal, na camada de 0 – 0,15 m	80
Tabela 6 – Diferença relativa entre os valores medidos e calculados em cada modelo empírico	84

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APA	Área de Proteção Ambiental
DER	Departamento Estadual de Rodovias
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DP	Drift Potential
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EP	Evaporação Potencial
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia
IAF	Índice de Área Foliar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
NBR	Norma Brasileira
PCC	Permeâmetro de Carga Constante
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente
SPSS	Statistical Package for the Social Scienses
TP	Transpiração Potencial
TR	Transição Real
u.v	Unidades Vetoriais
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

g_s	Massa específica aparente do solo
%	Porcentagem
δ	Densidade das partículas ou densidade real do grão
θ	Umidade volumétrica
$\Delta\theta$	Variação da umidade volumétrica
DP	Potencial de Deriva
EP	Evaporação potencial
ER	Evaporação real
h	Teor de umidade natural ou umidade higroscópica
IAF	Índice de Área Foliar
kPa	kiloPascal
Ks	Condutividade hidráulica do solo saturado
Ma	Macroposidade
mca	Metros de coluna d'água
Mi	Microporosidade
Pt	Porosidade total
TR	Transpiração potencial / real

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos	21
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	21
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	Caracterização e Classificação de Dunas	23
2.2	Sedimentação eólica e processos de transporte sedimentar	25
2.3	Mobilização e estabilização de dunas	26
2.4	Propriedades físicas e hidráulicas do solo arenoso	29
2.4.1	<i>Distribuição granulométrica de um solo arenoso</i>	30
2.4.2	<i>Porosidade</i>	30
2.4.2.1	<i>Método da placa de sucção</i>	31
2.4.3	<i>Condutividade hidráulica do solo saturado e parcialmente saturado</i>	32
2.5	Propriedades hidráulicas dos solos não saturados	35
2.5.1	<i>Curva de retenção de água</i>	35
2.5.1.1	<i>Método do papel filtro</i>	38
2.5.2	<i>Curva de condutividade hidráulica</i>	39
2.6	Aspectos hidrológicos afetados pela presença de vegetação	41
2.7	Investigações anteriores sobre propriedades de dunas	42
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	46
3.1	APA do Rio Pacoti	46
3.2	Aspectos geológicos e geomorfológicos	47
3.3	Aspectos hidrogeológicos	50
3.4	Clima	52
3.5	Vegetação.....	55
3.6	Localização da Área de Estudo	56
4	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1	Ensaio e amostragem	59
4.2	Caracterização física do solo	61
4.3	Caracterização hidráulica do solo	63

4.4	Análise estatística dos dados	64
4.5	Modelagem da condutividade hidráulica saturada (Ks)	65
4.6	Modelagem numérica	67
4.6.1	<i>Parâmetros de entrada e condições de contorno</i>	68
4.6.2	<i>Métodos de simulação numérica</i>	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1	Caracterização física do solo	76
5.2	Caracterização hidráulica do solo	79
5.3	Estimativa da condutividade hidráulica saturada por equação empírica	82
5.4	Modelagem no programa Vadose W	85
6	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

O estado do Ceará possui aproximadamente 573 km lineares de faixa litorânea acompanhada por cordões de dunas, cujas larguras variam e, por vezes, são interrompidas pela passagem de um rio ou pela presença de falésias que faceiam a linha de praia (MAGALHÃES, 2015; FALCÃO SOBRINHO, 2004).

O processo de formação das feições geológicas dunares tem como início o deslocamento das partículas de areia, quando a tensão de cisalhamento ultrapassa o valor limite da força oposta ao movimento, no caso, gravidade e coesão. A força de arraste, resultado da força do ar contra as faces do grão expostas ao vento, é considerada uma função da velocidade do vento e da rugosidade da superfície, que depende de características como: tamanho e forma dos grãos, teor de umidade e vegetação (EMBRAPA, 2006).

Dessa forma, a dinâmica eólica atua remanejando constantemente os sedimentos depositados ao longo das praias, possibilitando a formação e a transformação de diversas feições dunares (CLAUDINO-SALES, 1993). Fato pelo qual, essa mesma dinâmica constitui-se como um problema da engenharia, pois a ação do vento pode vir a ocasionar o assoreamento de lagoas e rios, bem como o soterramento de vias de acesso e construções em geral. Por este motivo, em algumas localidades ao longo da costa cearense em margens de vias, foram aplicadas técnicas para a estabilização de dunas, com o objetivo de minimizar o avanço da areia sobre estas.

A estratégia mais comum para a estabilização de dunas em zonas costeiras tem sido o plantio de vegetação nativa e a instalação de cercas de areia, que servem como obstáculo ao fluxo de transporte de sedimentos (EMBRAPA, 2006). Isolada ou em consórcio ao plantio, também pode ser aplicada a técnica da palhagem, que consiste na colocação de palhas de coqueiro sobre as dunas, de forma a cobrir sua superfície. Rocha (2017), afirma que a colocação das palhas deve anteceder o plantio das espécies nativas e que as palhas atuarão como quebra-ventos garantindo o melhor desenvolvimento das mudas.

As coberturas e os manejos podem influenciar e modificar positivamente ou negativamente propriedades físico-hídricas dos solos (MIRANDA, 2008; GREEN *et al.*, 2003; MENDONÇA *et al.*, 2009), principalmente, nos horizontes mais superficiais, ou seja, na zona vadosa. Já Miranda (2008), afirma que o manejo inadequado do

solo é uma das principais causas da degradação de sua estrutura, podendo provocar redução da macroporosidade, aumento da microporosidade e da densidade do solo, e do teor de matéria orgânica, entre outras alterações. Em pesquisas realizadas sobre os efeitos da estabilização induzida em dunas desérticas da China, foram identificadas alterações na composição granulométrica superficial do solo, em valores de condutividade hidráulica e capacidade de retenção de água, bem como parâmetros químicos e de fertilidade do solo (WANG *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2007, WANG *et al.*, 2007; ZENGHU *et al.*, 2003).

A literatura mostra que a maioria dos estudos sobre técnicas de fixação de dunas no Brasil tem sido conduzida na área de Geografia, com enfoque em aspectos geomorfológicos e de práticas de gestão costeira (ROCHA, 2017; PORTO, 2016; PINHEIRO, 2009; BISPO, 2008; CASTRO, 2001; PORTZ, 2012; PORTZ *et al.*, 2014; BARBOSA e BARBOSA, 2006). As pesquisas brasileiras sobre parâmetros físicos e hidráulicos de dunas, em sua maioria, são desenvolvidas no âmbito da Geologia em que a distribuição granulométrica do solo é analisada sob o ponto de vista sedimentológico, no sentido de compreender melhor a dinâmica costeira (MARINO *et al.*, 2013), e a condutividade hidráulica, na maioria das vezes, é medida em camadas profundas do solo, com o objetivo de compreender a infiltração ao longo de um aquífero (GOMES *et al.*, 2019). Porém, poucas têm sido desenvolvidos com foco na integração destes aspectos com a investigação das propriedades físicas e hidráulicas da camada superficial (zona vadosa) do solo de dunas, e da influência da vegetação nas propriedades do solo de dunas.

Atualmente, pode-se contar com modelos computacionais calibrados em laboratório ou em campo, que são ferramentas econômicas para avaliar e prever o desempenho da cobertura do solo, especialmente, em longo prazo, em situações em que os dados medidos podem não estar disponíveis. Essa abordagem experimental e de modelagem combinada, foi utilizada extensivamente (por exemplo, KHIRE *et al.* 1999; SCANLON *et al.* 2002; SWANSON *et al.* 2003; YANFUL *et al.* 2003; BUSSIE`RE *et al.* 2003; ADU- WUSU *et al.* 2007). Uma das vantagens da modelagem é que ela permite a simulação de casos hipotéticos para verificar a sensibilidade de certos parâmetros após a calibração do programa. Embora vários programas de computador consigam simular o fluxo de água em solos sob condições saturadas e não saturadas, alguns deles são mais comumente usados do

que outros para a avaliação da transferência de água em coberturas de solo. VADOSE/W (GEO-SLOPE 2007), por exemplo, é um programa de elementos finitos 2D que incorpora calor, vapor d'água e fluxo de gás em suas equações fundamentais.

Nesse sentido, este trabalho visa caracterizar propriedades físicas e hidráulicas do solo das dunas e modelar numericamente parâmetros de balanço hídrico em zona vadosa (não saturada), localizadas nas margens da CE-025 – estrada de acesso ao Porto das Dunas –, cujo trecho foi estabilizado com aplicação de palhas de coqueiro (palhagem) sobre a superfície do solo, objetivando minimizar o avanço da areia sobre a estrada.

1.1 Justificativa

A especulação imobiliária tem crescido paulatinamente, tendo como alvo maior as áreas praianas que são constituídas predominantemente por dunas móveis e fixas, concentradas maioritariamente no litoral oeste do Estado. À medida que o número de unidades habitacionais cresce, aumenta também a demanda por uma infraestrutura que atenda à população, que passa a residir nestes locais, visando à garantia de serviços essenciais como, por exemplo, os de transporte e locomoção. Em virtude desta necessidade, obras de infraestrutura rodoviária foram realizadas nos municípios de Aquiraz e Fortaleza, dentre as quais se podem citar a construção da rodovia CE-025, principal estrada de acesso de Fortaleza ao Porto das Dunas, e a mais recente implantação da CE-010, que vai da Ponte sobre o Rio Cocó ao entroncamento da CE-040, conectando os municípios de Fortaleza e Eusébio.

Alguns trechos destas duas rodovias, entretanto, atravessam e margeiam campos de dunas móveis que fazem parte das Áreas de Proteção Ambiental (APA) das Dunas da Sabiaguaba e do Rio Pacoti, fato que, por si só, gerou controvérsias por partes de órgãos, instituições e associações de cunho ambiental. Desde então, estes trechos passaram a sofrer problemas de soterramento, que acabam gerando acidentes por vezes fatais, além de exigir manutenções que com o tempo tornaram-se onerosas, como por exemplo, a retirada periódica dos sedimentos que avançam sobre a estrada.

Em dezembro do ano de 2019, para fortalecer a realização da pesquisa, foi realizado um levantamento de informações na base de dados do Google, com o

objetivo de identificar ocorrências de acidentes relacionados ao avanço de dunas no estado do Ceará, com as seguintes combinações de palavras-chave, “Ceará, dunas avançam sobre casas/rodovias; Ceará, conter avanço dunas; Ceará, dunas acidentes rodovias”. Assim, verificou-se em reportagens dos jornais Diário do Nordeste (2019) e O Povo Online (2012), a ocorrência de acidentes associados à presença de areia em vias. Identificou-se também o avanço das dunas ocorrido em diferentes locais do litoral cearense noticiado em momentos distintos por jornais como no G1 (2015), Tribuna do Ceará (2017) e Diário do Nordeste (2004, 2008 e 2017). Já a Embrapa, em 2008, noticiou a missão de Engenheiros da Angola para conhecer o projeto de contenção de Dunas desenvolvido pela Embrapa e Universidade Federal do Ceará - UFC. Destaca-se, ainda, que em 2012, o Diário do Nordeste realizou uma reportagem sobre o avanço das dunas na CE-025 e o uso de palhas de coqueiro para conter o avanço da areia sobre a rodovia. Atualmente, na área de estudo as dunas encontram-se estabilizadas pela vegetação que se desenvolveu na área anteriormente coberta pela palhagem, conforme se observa na Figura 1.

Figura 1 – Dunas estabilizadas pela palhagem.



Fonte: a autora.

A última notícia está associada ao fato de que em outubro de 2017, o experimento que foi executado pelo DER nas dunas da Sabiaguaba com o objetivo de conter o avanço de areia até o asfalto da CE-010, ter sido removido em novembro do mesmo ano, após duras críticas e manifestações por parte da população e do Conselho Gestor das Unidades de Conservação da Sabiaguaba (CGS), o qual alegou que a prática degradaria o ecossistema do Parque Natural Municipal das Dunas de Sabiaguaba, uma unidade de conservação cuja legislação não permite qualquer tipo de modificação, mas somente atividades de lazer, educação ambiental, ecoturismo e pesquisa científica.

Diante deste contexto, surge o seguinte questionamento: as alterações impostas sobre a mobilidade de dunas móveis exercem influência sobre o comportamento físico, hidráulico e hidrológico da área?

Para responder a esta pergunta, assume-se a hipótese de que as propriedades físicas e hidráulicas do solo, e seu comportamento hidrológico não se alteram com o desenvolvimento de vegetação sobre a superfície das dunas, decorrente da decomposição da palha. No entanto, vale salientar que, segundo Almeida (2016), a morte e a retração das raízes criam espaços (macroporos) que permitem que as chuvas possam infiltrar a uma taxa maior na proximidade do sistema radicular. Essa dinâmica pode, então, influenciar positivamente o fluxo de água no solo com a diminuição do escoamento superficial e carreamento de solo em eventos chuvosos.

Nesse sentido, esta pesquisa buscou obter informações físicas, hidrológicas de infiltração e balanço hídrico no campo de dunas em estudo, o qual faz parte da Área de Proteção Ambiental (APA) do rio Pacoti, cujo plano de manejo encontra-se em fase de elaboração.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma análise comparativa entre aspectos físicos, hidráulicos e hidrológicos de dunas móveis e estabilizadas artificialmente, como contribuição para um melhor entendimento da dinâmica destes ambientes e dos parâmetros

ambientais que controlam o desenvolvimento e comportamento das dunas, além de oferecer subsídios para uma melhor gestão destas áreas.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar propriedades físicas (granulometria, massa específica aparente, densidade das partículas, porosidade total, macro e microporosidade) e hidráulicas (condutividade hidráulica saturada e curva de retenção de água), de dunas móveis e de dunas estabilizadas artificialmente;
- b) Realizar análise comparativa entre a porosidade total, macro e microporosidade dos dois tipos de dunas;
- c) Realizar análise comparativa entre a condutividade hidráulica saturada e a curva de retenção de água dos dois tipos de dunas;
- d) Aplicar equações empíricas para a estimativa indireta da condutividade hidráulica saturada do solo, com base nos dados de caracterização obtidos em laboratório;

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo foi realizada uma descrição dos diferentes tipos de dunas existentes na natureza, decorrentes da direcionalidade do vento e da quantidade de areia disponível para ser transportada. Descrevem-se os diferentes tipos de dunas resultantes da influência de fatores ambientais locais, como o crescimento de vegetação e a exposição do nível de água do terreno. Em seguida, foi feita uma descrição geral dos mecanismos físicos que atuam no processo de transporte eólico de grãos e que leva à formação das dunas de areia.

2.1 Caracterização e classificação de dunas

Dentre as unidades que compõem a paisagem da faixa litorânea, apresenta-se a formação de dunas, que pode ser entendida como um conjunto de elevações de forma regular e característica resultante de uma deposição contínua de partículas transportadas pelos ventos (FALCÃO SOBRINHO, 2004).

Gusmão (2008) define dunas de areia como um solo resultante de areia fina, ausente da presença de seixos ou camadas de argila, constituída em sua maior parte por quartzo, podendo conter porções dos minerais: hematita, gipso, mica, etc. Os grãos de areia, geralmente, são arredondados (mais do que os dos rios), muito finos e com ausência de pedregulho, com granulometria uniforme na faixa entre 0,20 mm e 0,074 mm.

As dunas podem ser classificadas de acordo com o ambiente em que são formadas em costeiras, fluviais ou desérticas (FALCÃO SOBRINHO, 2004). As dunas costeiras ocorrem mais comumente em áreas sujeitas a ventos soprando, predominantemente, do mar costa adentro. Desta forma ocorre a remoção dos sedimentos depositados na berma da praia em direção ao continente, acumulando sedimentos no pós-praia na forma de dunas frontais (*foredunes*) ou incipientes, que são dunas baixas, com até 1m de altura (FERNANDEZ *et al.*, 2012). As dunas frontais crescem concomitantes com a vegetação e os processos erosivos e/ou de maior fluxo de areia que deixam passar os sedimentos, que em seguida se acumulam mais à frente (costa adentro), formando as protodunas (dunas pequenas e largas, sem face de deslizamento), dunas barcanas, barcanoides, etc., com ou sem vegetação (móveis), cuja altura dependerá da intensidade do vento aliada ao

volume de sedimentos transportados. Segundo Fernandez *et al.* (2012), para que o vento possa promover a remobilização dos sedimentos depositados na praia, é necessário que este sopre com frequência e velocidade removendo os diâmetros granulométricos mais finos em direção ao pós-praia.

As dunas podem, ainda, ser classificadas de acordo com sua mobilização em dunas móveis, dunas fixas e dunas edáficas (FALCÃO SOBRINHO, 2004). Dentro da distribuição cronológica de formação dos depósitos eólicos, as dunas móveis fazem parte da geração mais recente. Não possuem cobertura vegetal densa e, por este motivo podem deslocar-se segundo a intensidade dos ventos, que são determinantes no processo de transporte de sedimentos. Neste caso, a velocidade do vento é fundamental, uma vez que segundo Davies (1972), citado por Carvalho (1994), ventos com velocidade inferior a 10m/s, não são suficientes para promover a remoção de areias em quantidades significativas, ao longo de um perfil necessário para formação de dunas.

As dunas fixas constituem-se naquelas que não se movimentam, recobertas por uma vegetação arbóreo-arbustiva. As dunas edáficas, também chamadas de paleodunas, segundo Vicente da Silva (1993), citado por Falcão Sobrinho (2004), apresentam uma cronologia mais antiga que as dunas móveis, diferenciando-se por possuírem cor avermelhada e vegetação mais densa, resultante de uma maior evolução edáfica.

Ao estudarem o papel da vegetação no processo de evolução e morfologia das dunas frontais (*foredunes*) da Praia da Manta Rota – Portugal, Rebêlo e Brito (2004), observaram uma grande variabilidade de espécies com um zonamento bem marcado, sendo a tolerância ao sal e à intensidade de transporte eólico, os dois fatores mais importantes neste zonamento. A respeito do processo de desenvolvimento da vegetação, observou-se que a primeira vegetação a se instalar é bastante tolerante ao sal e tem uma capacidade de crescimento vertical e adaptação ao soterramento muito elevada. À medida que as dunas crescem, verifica-se a existência de um processo de adaptação constante entre as espécies vegetais (e o território que ocupam) e a evolução da duna. Quando a duna atinge uma dimensão tal que o vento já não consegue transportar areia sobre ela, estabiliza, podendo manter a sua forma durante muito tempo (décadas ou séculos). No entanto, se a vegetação que a recobre for destruída, a areia remobiliza-se, dando origem a uma nova duna.

Marino (2014), afirma que o início do transporte sedimentar eólico ocorre com o deslocamento horizontal de grãos, normalmente, ocasionado por processos de rolagem ou rastejamento de partículas. A movimentação dos grãos ocasiona momentos de colisão das partículas transportadas pelas correntes de ar e, conseqüentemente, a ascensão dos grãos menores. Essa nuvem constituída por partículas de menores diâmetros, dependendo da sua granulometria, atinge espaços de maiores velocidades de vento, passando a ser transportada em trajetórias parabólicas. A queda desses grãos, exclusivamente em função do seu peso, propicia uma nova fase de ascensão de grãos, originando um efeito multiplicador do fenômeno de saltação (SÍGOLO, 2000 *apud*. MARINO, 2014). Dessa forma, as condições ambientais de um sistema praiar podem ser avaliadas pela análise e classificação dos grãos de sedimentos, os quais são diretamente afetados pela fonte do material e seus processos de deposição intensos.

2.2 Sedimentação eólica e processos de transporte sedimentar

Para que os grãos de areia sejam transportados pelo vento, é necessário que este possua uma determinada velocidade, capaz de fazer com que os grãos sejam ejetados do chão (LUNA, 2010). Após iniciado o movimento, os grãos de areia podem ser transportados de diferentes maneiras: suspensão, saltação, reptação e rastejamento.

A suspensão ocorre para grãos menores, com diâmetro típico entre 40 e 60 μm . Na suspensão, os grãos mais finos tendem a subir devido a vórtices de turbulência e correntes de convecção que ocorrem na camada limite turbulenta da atmosfera, podendo ser soprados através de longas distâncias se comparados às distâncias dos demais tipos de transporte (PYE E TSOAR, 1987).

Grãos com diâmetro entre 170 e 350 μm tendem a ser transportados através do movimento de saltação. Nesse movimento, os grãos são ejetados do chão para depois serem acelerados pela ação do vento passando a descrever trajetórias balísticas próximas ao chão (BAGNOLD, 1941; PYE E TSOAR, 1990), decorrentes da ação da força gravitacional.

A reptação é o movimento de partículas que se refere a situação em que os grãos em saltação transferem uma pequena quantidade de movimento na colisão

com o chão, e assim não conseguem arrancar do chão outros grãos (ANDREOTTI, 2004).

2.3 Mobilização e estabilização de dunas

As areias dunares são conhecidas como solos inertes desprovidos de qualquer característica de flora devido à sua alta porosidade (TSOAR e ARENS, 2003). As areias têm baixa capacidade de retenção de água (diferença entre capacidade de campo e ponto de murcha), bem como elevada taxa de permeabilidade e lixiviação, resultando em lavagem e transporte dos nutrientes necessários para o crescimento das plantas (TSOAR, 1990). Além disso, a ausência de coesão das areias de dunas resulta em fácil erodibilidade do solo.

Tsoar e Arens (2003), afirmam que a ausência de cobertura vegetal em dunas pode ser explicada pela combinação de um a três dos seguintes fatores:

1. Baixíssima média de precipitação;
2. Ventos muito fortes e frequentes, que erodem a areia e impedem a germinação da vegetação, ou que soterram a vegetação. A areia é muito sensível à erosão eólica em função da sua ausência de coesão, sendo a erosão eólica o principal fator limitante para o crescimento de vegetação em dunas (BOWERS, 1982; TSOAR, 1990; TSOAR E ILLENBERGER, 1998);
3. Intensa interferência humana. O intenso pisoteio e tráfego de veículos pode ocasionar a destruição das dunas em locais mais desenvolvidos.

Um índice muito utilizado na área da geologia e sedimentologia para quantificar a erosão do vento é o potencial de deriva de areias (*drift potential*) – DP (FRYBERGER e DEAN, 1979), o qual se refere à equação (1):

$$DP = \sum q = U^2(U - U_t)t \quad (1)$$

Em que: q é a taxa de erosão de areia, U é a velocidade do vento medido à altura de 10m, U_t é a velocidade limiar de vento (12 nós), t é igual a W (grau de “windness”: percentual anual de dias que experimentam ventos acima da velocidade limiar, capaz de movimentar a areia).

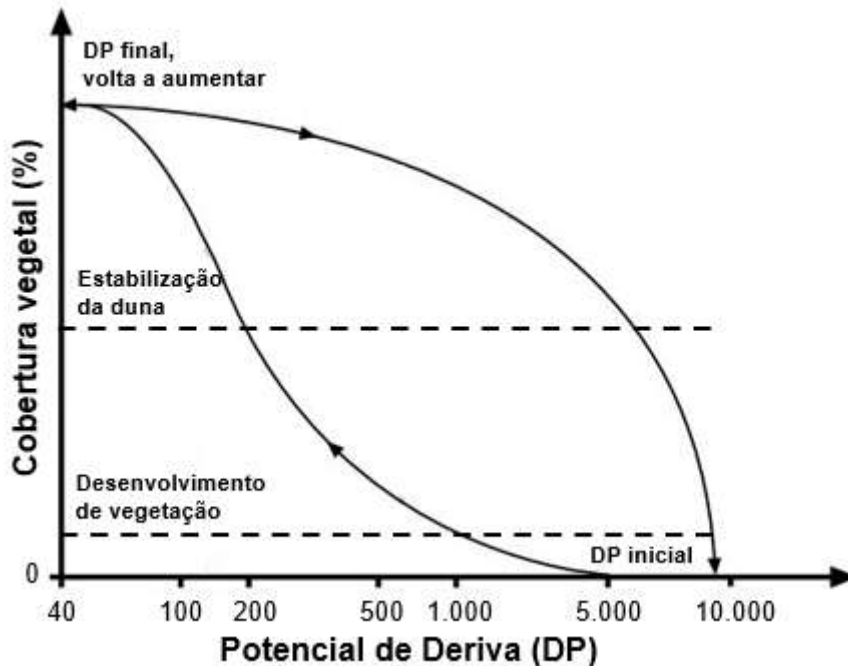
DP é um parâmetro da quantidade máxima de areia que poderia ser erodida pelo vento durante um ano. DP, sendo diretamente proporcional à taxa de transporte de areia e ao tempo de transporte decorrido, representa a energia potencial do vento. DP relaciona-se também com W e na maior parte das vezes, W aumenta com o DP.

O valor numérico do Potencial de Deriva (DP), obtido pelo método de Fryberger (1979) é tido como Unidades Vetoriais (u.v.), pelo fato da velocidade do vento ser tratada como um vetor. Dessa forma, o DP é o somatório da quantidade relativa de areia potencialmente movida pelo vento (em cada direção) em um espaço de tempo.

Tsoar (2005) apresenta uma relação entre a energia do vento (DP) e a cobertura vegetal através de uma curva de histerese (Figura 2). Quando o clima muda e ocasiona diminuição da energia do vento para valores abaixo de 1000 DP, a vegetação começará a recobrir a duna. Com valores abaixo de 200 DP, a vegetação poderá alcançar o máximo de cobertura, o que ocasionará a estabilização das dunas. No entanto, quando a energia do vento volta a aumentar para valores acima de 1000 DP, esta não será capaz de produzir a extinção completa da vegetação que se desenvolveu na superfície das dunas. Plantas como micrófitas, plantas anuais, vegetação rasteira, arbustos e árvores, formarão um obstáculo tampão entre o vento e a areia (WOLFE e NICKLING, 1993). Dunas já estabilizadas, livres de influência humana, permanecerão estáveis mesmo que a energia do vento aumente para valores que normalmente impedem as plantas de germinarem ($DP > 1000$).

Segundo Wolfe e Nickling (1993), a presença de vegetação representa um obstáculo significativo ao fluxo de ar acima da superfície do solo, sendo necessários valores de DP substancialmente elevados como $DP > 6000$, para remobilizar a areia. Valores dessa magnitude podem ser encontrados na região da Antártica (PYE e TSOAR, 2008).

Figura 2 – Curva de histerese que representa a relação entre a energia do vento e a cobertura vegetal



Fonte: Adaptado de Tsoar (2005).

Dessa forma, as plantas desempenham importante função por modificarem o padrão de movimentação da areia. Como a vegetação causa uma desaceleração no vento, esta acaba por inibir a erosão da areia. Por outros aspectos, a vegetação também é capaz de modificar a erosão do solo, já que reduz a evaporação da água do solo e pode capturar partículas de argila e silte suspensas no ar que formam uma crosta na superfície unindo os grãos de areia (DANIN, 1978; DANIN, 1987).

Por outro lado, a vegetação também é afetada pela movimentação de areia, já que podem ter suas raízes expostas pela erosão, ou mesmo serem soterradas em lugares de elevada deposição. De maneira geral, as plantas podem até sobreviver à alguma deficiência de nutrientes, aos períodos de estiagem e até mesmo às altas temperaturas. Entretanto, a erosão do solo e a consequente exposição das raízes quase sempre levam as plantas à morte (DANIN, 1991; HESP, 1991; BOWERS, 1982).

Em solos arenosos a precipitação anual e evapotranspiração média, não são fatores determinantes para o desenvolvimento da vegetação, ao contrário do que ocorre em solos argilosos (TSOAR, 1990; TSOAR, 2005). Devido à granulometria da areia, a água consegue atingir profundidades nas quais fica protegida da evaporação. Como resultado, o crescimento da vegetação em solos arenosos está

fortemente acoplado à evolução da superfície de areia, isto é, o desenvolvimento das plantas é controlado pela competição entre a redução do fluxo de areia pelas mesmas e a capacidade destas em sobreviver à erosão e à deposição da areia. O crescimento da vegetação e o transporte de areia ocorrem em escalas de tempo diferentes. As mudanças no campo de ventos e no transporte por saltação ocorrem na escala temporal de segundos. Por outro lado, uma mudança significativa nas plantas ocorre numa escala de horas ou mesmo de dias.

2.4 Propriedades físicas e hidráulicas do solo arenoso

O arranjo ou organização das partículas do solo (isto é, a configuração interna da matriz do solo), denomina-se estrutura do solo. As partículas do solo diferem em forma, tamanho e orientação, podendo ser associadas e interligadas de várias formas, formando padrões complexos e irregulares difíceis de caracterizar com exatidão. Aliado a isso, a estrutura do solo possui natureza instável e grande variabilidade espacial por ser constantemente afetada por mudanças climáticas, atividades biológicas e práticas de manejo do solo, além de ser altamente vulnerável a forças externas de natureza mecânica e internas de natureza físico-química (HILLEL, 2004).

Devido a estes e outros motivos, existe certa heterogeneidade nos métodos que medem a estrutura do solo. Por conseguinte, a análise de um conjunto de parâmetros do solo que são dependentes de sua estrutura, consiste em uma boa maneira de compreendê-la e caracterizá-la.

Segundo Marques (2000), quando se busca caracterizar o solo hidráulicamente, deve-se considerar quatro propriedades básicas: condutividade hidráulica, curva de retenção de água, infiltração e difusividade. Estas permitem inferir uma noção sobre capacidade de drenagem, permeabilidade e retenção de água, e trazem boas perspectivas para a análise do movimento da água no solo. Guerra e Botelho (1996) argumentam que para uma melhor compreensão da erodibilidade dos solos e dos efeitos do manejo em sua estrutura, devem-se considerar propriedades físicas como: teor de areia, silte e argila (distribuição granulométrica); densidade real e aparente; porosidade; e teor e estabilidade dos agregados.

2.4.1 Distribuição granulométrica de um solo arenoso

Segundo Marino *et al.* (2013), as análises granulométricas vêm sendo utilizadas como ferramentas na investigação dos processos sedimentares, para a compreensão da dinâmica sazonal de ambientes sedimentares costeiros recentes. Vários métodos têm sido utilizados para relacionar as classes granulométricas com o ambiente deposicional. Variações de tamanho de grão ao longo da costa e transversalmente a ela são observadas em diversas praias em todo o mundo, sendo controlada por fatores geológicos, hidrodinâmicos e eólicos que atuam de forma distinta sobre os sedimentos. De acordo com Marino (2013), estudos abordando a distribuição sedimentar ao longo das praias e fatores condicionantes, podem auxiliar na obtenção de um melhor entendimento das condições predominantes no momento da deposição e retrabalhamento dos grãos, além de permitir o traçado de um fluxo para a carga sedimentar.

2.4.2 Porosidade

No solo, os poros representam cavidades de diferentes formas e tamanhos, que são determinados pelo arranjo de suas partículas sólidas. Existem inúmeros conceitos na literatura, no sentido de estabelecer um padrão para classificar os diferentes tamanhos de poros considerando sua geometria e configuração no espaço poroso (MARQUES, 2000). Libardi (2005) afirma que, em Física do Solo, define-se tamanho de poro como o diâmetro da maior esfera inscrita no interior do espaço ocupado pelo poro, motivo pelo qual na maioria das vezes os poros são classificados em função de seu diâmetro.

Segundo Hillel (2004), pode-se classificar os poros em duas faixas distintas: macroporos e microporos. Os macroporos são os principais canais para a aeração, infiltração e drenagem da água, e os microporos são os capilares responsáveis pela retenção de água e solutos. Por outro lado, Libardi (2005) cita a classificação de Koorevaar *et al.* (1983), que divide os poros, empiricamente, em três grupos: a) macroporos, com diâmetro maior que 100 μm , cuja função é a aeração da matriz do solo e condução da água durante o processo de infiltração; b) mesoporos, com diâmetro entre 30 e 100 μm , cuja função é o transporte de água após a infiltração, após o esvaziamento dos macroporos; e, c) microporos, também chamados de

capilares, com diâmetro menor que 30 μm , que atuam no armazenamento da água, dentro dos quais ela se move muito lentamente.

A determinação da macro e da microporosidade pode ser realizada por meio da utilização de diversos equipamentos, dentre eles a mesa de tensão. Nesta, amostras de solo indeformadas e saturadas são submetidas a uma tensão de 6,0 kPa correspondente a 60 cm de coluna d'água durante um determinado tempo, tal que o conteúdo de água correspondente aos macroporos seja completamente drenado. A água drenada corresponde ao volume total dos macroporos e a retida ao volume dos microporos (ARAÚJO, 2010).

Almeida (2016), afirma que os principais fatores que podem influenciar a porosidade do solo são a densidade do solo, a distribuição granulométrica e a densidade de partículas, em que os dois últimos têm pouca variação no tempo, sendo necessárias centenas de anos, ou mais, para que haja mudanças significativas em seus valores. A densidade do solo, por sua vez, pode ser facilmente alterada pelo manejo de solo, o que indica que seu monitoramento pode fornecer informações sobre alterações na estrutura do solo. Além disso, alterações na estrutura do solo promovidas por ação natural ou antrópica, podem afetar diretamente a porosidade do solo aumentando ou reduzindo o espaço ocupado pelo ar e pela água (STRUDLEY *et al.*, 2008).

2.4.2.1 Método da placa de sucção

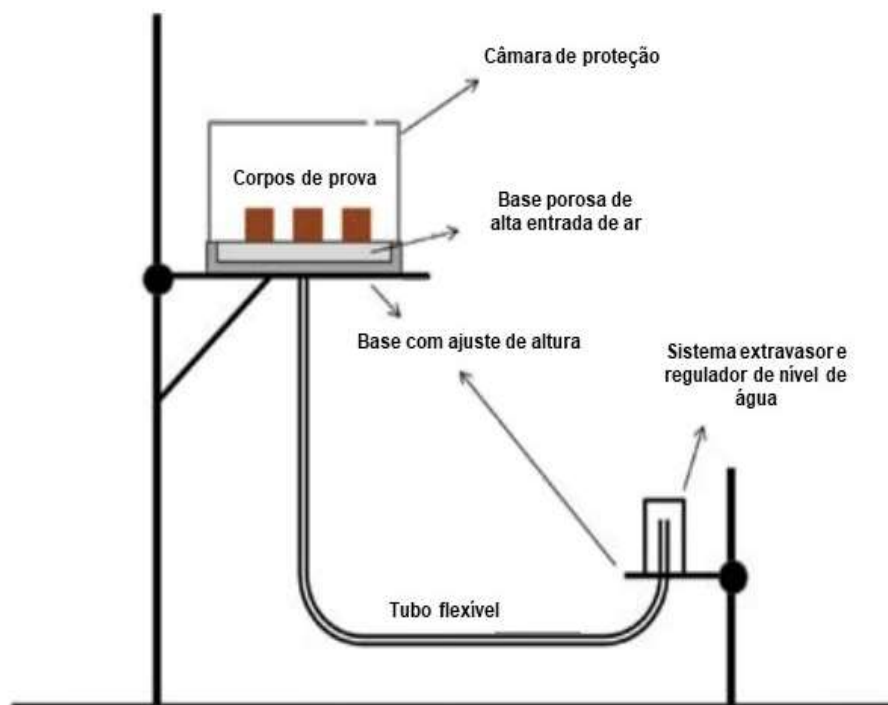
Também conhecido como funil de Haines, a placa de sucção é um dos métodos mais utilizados para definir o trecho inicial da curva de retenção, por ser capaz de impor sucções de 0 a 70 kPa sobre amostras de solo. Porém, também pode funcionar como mesa de tensão para determinar a macro e a microporosidade do solo quando se decide impor sobre as amostras de solo, uma tensão pré-definida de 6 kPa que é o suficiente para esvaziar seus macroporos, conforme comentado no tópico anterior. Esse método se destaca por ser largamente utilizado e exigir equipamentos e recursos laboratoriais relativamente simples (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

A placa de sucção, segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), consiste em uma placa porosa devidamente saturada, com um valor de entrada de ar compatível com a sucção máxima a ser imposta. A placa porosa é colocada sobre um

compartimento totalmente preenchido por água, o qual é conectado a um tubo flexível, que possui na sua extremidade, um regulador de nível. Esse regulador mantém o nível de saída de água em uma cota qualquer, escolhida em função da sucção matricial necessária. Durante o ensaio, a água da amostra flui pelo tubo até que seja atingido o equilíbrio de carga hidráulica no sistema.

O ensaio pode ser realizado com múltiplos corpos de prova do mesmo solo ou de diferentes materiais. Quando a umidade de equilíbrio é atingida ao fim do estágio de tensão aplicado, os corpos de prova são retirados para pesagem e determinação da massa de sólidos. Na Figura 3, apresenta-se esquema da placa de sucção utilizada para determinação da macro e microporosidade do solo.

Figura 3 – Placa de sucção



Fonte: adaptado de CAMAPUM DE CARVALHO *et al.* (2015).

2.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado e parcialmente saturado

A condutividade hidráulica do solo, ou a capacidade de um solo de transmitir água, possui uma vasta aplicação em diversas áreas do conhecimento. Hidrólogos, por exemplo, precisam de valores de condutividade para modelagem hidrológica, bem como para estimar a recarga de água subterrânea através da zona vadosa,

prevendo o fluxo de água no solo em diferentes pontos (PRASAD e RASTOGI, 2001; GÓMEZ-HERNÁNDEZ e GORELIK, 1989; EVANS *et al.*, 2018).

Na agricultura, utiliza-se a condutividade hidráulica para a determinação indireta do fator de erodibilidade do solo (K), por exemplo, e para solução de problemas relativos à irrigação, lixiviação de nutrientes, ou à quantidade de água disponível para as plantas (WISCHMEIER *et al.*, 1971; TESTEZLAF, 2017; LI *et al.*, 2018; ANDRY *et al.*, 2009).

Engenheiros geotécnicos empregam-na em camadas de pavimentos, avaliação da segurança de encostas e taludes, ou qualquer outro sistema de drenagem projetado para capturar e direcionar o escoamento superficial (PMPA/IPH, 2005; URBONAS e STAHERE, 1993; HOYOS, 2014). Além disso, na área de saneamento e de geotecnia ambiental, a condutividade hidráulica pode ser utilizada para determinar a eficácia de cobertura do aterro sanitário (COSTA *et al.*, 2018; SOUZA, 2018). Desse modo, para que se possa entender e prever a movimentação da água no solo, torna-se essencial o entendimento da condutividade hidráulica, pois esta governa o fluxo.

A condutividade hidráulica pode ser definida como a razão entre a densidade de fluxo (ou seja, a vazão) e o gradiente de potencial (variação da carga hidráulica por unidade de distância na direção do fluxo), conforme Equação 2. Como o gradiente de potencial é adimensional por se tratar de uma relação de comprimento por comprimento, as dimensões do coeficiente de permeabilidade (K) são iguais às da densidade fluxo, LT^{-1} , sendo geralmente expressas em m/s ou em cm/s, cuja unidade é equivalente à da velocidade, podendo ser entendida como a velocidade média com que a água se movimenta através dos poros existentes no solo (CAPUTO, 1981; HILLEL, 2004):

$$v = K.i \rightarrow K = \frac{q}{iA} = \frac{q}{(H/l).A} = \frac{V.l}{H.A.t} = \frac{[L^3]}{[L^2].[T]} = [L.T^{-1}] = \text{m/s ou cm/s} \quad (2)$$

Em que: K corresponde ao coeficiente de permeabilidade; V corresponde ao volume de água que atravessa a amostra em um determinado intervalo de tempo; H é a carga hidráulica; l é a espessura da seção transversal ao tubo; A é o comprimento percorrido pelo fluxo; e t é o intervalo de tempo.

O coeficiente de permeabilidade real de uma área é de difícil determinação, devido à sua alta variabilidade espaço-temporal e à sua dependência a um conjunto de propriedades do solo e do fluido. Características próprias do solo como: a porosidade total, a distribuição dos tamanhos dos poros (macro e microporosidade) e a tortuosidade – ou seja, a geometria dos poros do solo exerce influência direta sobre a condutividade hidráulica, inclusive características do fluido como a densidade e a viscosidade (RIENZNER e GANDOLFI, 2014; HILLEL, 2004).

Quando saturado, o solo tem valor de condutividade máximo e constante, que vai decrescendo com a diminuição da umidade. Devido à dificuldade em se obter a condutividade em função da umidade do solo, a maioria dos modelos hidrológicos utiliza como parâmetro de entrada a condutividade hidráulica saturada, K_s (RIENZNER e GANDOLFI, 2014).

A condutividade hidráulica saturada pode ser determinada em laboratório através de ensaios em amostras de solo indeformadas, ou em campo por meio de medidas diretas. A escolha do método mais adequado dependerá de fatores como as propriedades do solo, o objetivo da pesquisa, os recursos e o tempo disponíveis, e a precisão requerida para os dados (JAČKA *et al.*, 2014).

Existem diversos tipos de equipamentos para a obtenção da condutividade hidráulica de solos em laboratório. Esses equipamentos são denominados permeâmetros. Segundo Libardi (2005), o Permeâmetro de Carga Constante (PCC), consiste em uma repetição da experiência de Darcy, e deve ser utilizados em amostras de solos cujos valores de K_s sejam maiores que $2 \cdot 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$. Neste tipo de permeâmetro, a carga hidráulica é mantida sobre uma amostra de solo durante certo tempo, até que se atinja a condição de regime estacionário. Então, a água percolada através da amostra, é colhida, e seu volume é medido. Conhecida a vazão e as características geométricas da amostra, aplica-se a equação de Darcy (3), em que o gradiente de potencial total é dado por $(h+L)/L$:

$$K_s = \frac{V_a \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad (3)$$

Em que: h é a carga hidráulica no topo da amostra e L é o comprimento da amostra, ao longo da qual a carga hidráulica se dissipa; A , é a área da seção

transversal, V_a é o volume de água percolada durante o tempo t ; e, K_s é a condutividade hidráulica saturada.

Jačka *et al.* (2014) apontam que o método do PCC, apresenta como vantagem o fato de que K_s é calculado com base na equação de Darcy, em que as condições de fluxo (carga hidráulica, fluxo unidimensional e temperatura do fluido) são bem definidas, aliada à uma redução máxima da influência das bolsas de ar presente nos poros no decorrer do ensaio. No entanto, uma grande desvantagem é que os experimentos de laboratório, geralmente, são realizados em amostras de pequeno tamanho que podem não ser representativas para o solo estudado. Durante a coleta, as amostras podem ficar dispostas em pontos de alta, baixa ou nenhuma presença de macroporos (ALMEIDA, 2016), por este motivo, deve-se procurar preservar ao máximo a continuidade vertical dos macroporos em superfícies com grande índice radicular.

2.5 Propriedades hidráulicas dos solos não saturados

O conceito de condutividade hidráulica abordado até o momento aplica-se a um meio poroso saturado, isto é, onde todos os espaços vazios estão preenchidos por água. No entanto, alguns solos, especialmente os que se localizam próximos à superfície, raramente encontram-se saturados. Neles, os espaços vazios geralmente são preenchidos parcialmente por água, enquanto o restante dos poros é ocupado por ar. Neste caso, denomina-se o fluxo da água como não saturado ou parcialmente saturado.

O fluxo de água em um solo saturado é governado pela Lei de Darcy e as equações diferenciais de continuidade. Na condição não saturada o fluxo é governado pela equação de Richards, que é uma combinação da Lei de Darcy – Buckingham e das equações diferenciais de continuidade (JÚNIOR, 2013).

2.5.1 Curva de retenção de água

A curva de retenção de água, também chamada de curva característica do solo, relaciona o teor de umidade da água (gravimétrico, h , ou volumétrico, θ) e a sucção matricial do solo (ψ), em que a sucção tem uma relação inversamente

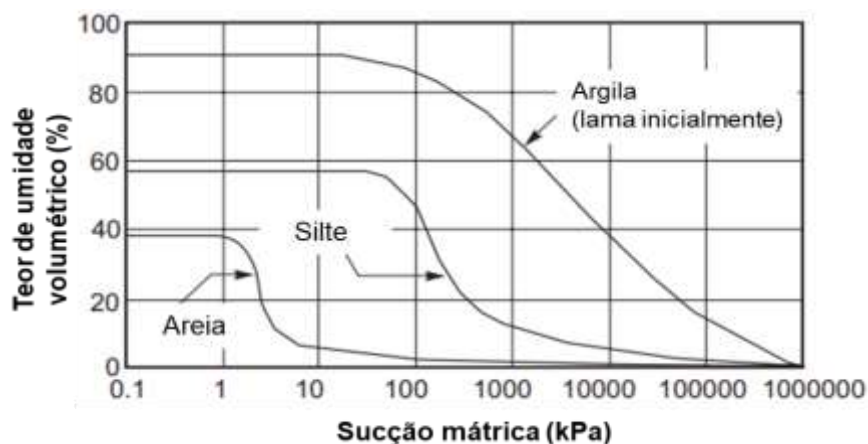
proporcional ao teor de umidade, ou seja, quando o teor de umidade se aproxima da saturação, o valor da sucção tende a zero.

A curva de retenção de água pode ser construída por meio de equações empíricas, a partir de dados de sucção e teor de umidade, ou grau de saturação do solo obtido por ensaios específicos como o de papel filtro (ASTM D5298-16), ou o método da câmara de pressão de Richards, descrito pela Embrapa (2018).

A relação entre o teor de umidade e a sucção matricial está diretamente associada à aspectos granulométricos e mineralógicos do solo (SOTO, 2004), em que a geometria dos poros, a magnitude e composição mineralógica da fração fina são aspectos determinantes na posição relativa, forma e inclinação da curva. Dentre os principais fatores que exercem influência na forma da curva característica, Salter e Williams (1965); citados por Marques (2000); destacam a granulometria como o fator que mais interfere na retenção de água. Segundo eles, solos com textura grosseira tem maior proporção de macroporos, sendo bem drenados e arejados. Em contrapartida, solos de textura mais fina possuem drenagem e aeração inferior aos arenosos, apesar de possuírem a porosidade total bem maior.

Na Figura 4, apresenta-se o comportamento da curva de retenção de água para três tipos de solos com diferentes distribuições granulométricas.

Figura 4 – Curva de retenção de água típica para solo arenoso, siltoso e argiloso

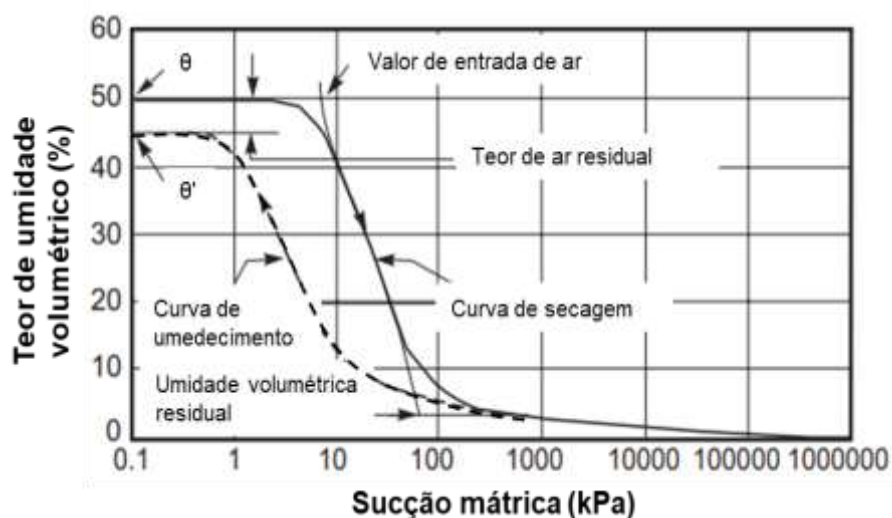


Fonte: adaptado de Fredlund e Xing (1994).

Além disso, o teor de umidade inicial do solo (trajetória de secagem ou umedecimento), também pode influenciar no formato da curva característica (VANAPALLI *et al.*, 1999), ou seja, o mesmo solo pode apresentar valores diferentes

de sucção para um mesmo teor de umidade, caso este tenha sido atingido por umedecimento (por meio da chuva, por exemplo), ou secagem (evaporação) (SOTO, 2004). A esta diferença denomina-se efeito de histerese. Na Figura 5, representa-se uma típica de curva de retenção de água para um solo siltoso, onde se observa a histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento. Na curva, destacam-se os valores de entrada de ar e de umidade residual, ou seja, o teor de umidade a partir do qual é necessária uma grande variação na sucção para remover mais água do solo (VILLAR, 2002).

Figura 5 – Curva de retenção de água típica para um solo siltoso



Fonte: adaptado de Fredlund e Xing (1994).

A curva de retenção de água tem sido amplamente utilizada no estudo de solos não saturados. Nestes, considera-se que a água presente nos poros está contida, em sua maior parte, no interior dos microporos, os quais comumente encontram-se cheios de água (umidade higroscópica). Os macroporos, por sua vez, possuem um conteúdo de água muito pequeno, podendo ser nulo em solos altamente insaturados (XU, 2013).

Diversos estudos como os de Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980) e Fredlund *et al.* (1994), utilizaram a curva de retenção de água associada à condutividade hidráulica saturada, com o objetivo de prever a condutividade hidráulica não saturada de diversos tipos de solos a diferentes níveis de sucção.

Além disso, as curvas de retenção de água são ferramentas fundamentais em diversas áreas de estudo da Ciência do Solo, pois por meio delas se pode estimar a variação do potencial de água disponível ao desenvolvimento das plantas (MARQUES, 2000).

Dentre as diversas expressões para modelagem da curva de retenção de água, as que mais se destacam, são: as de Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), por proporcionarem um bom ajuste para uma grande variedade de solos (Equações 4 e 5, respectivamente):

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad (4)$$

$$\theta(\psi) = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right)} \right]^m \quad (5)$$

Em que: θ_r é o teor de umidade volumétrica residual, θ_s é o teor de umidade volumétrica saturada, α e n são parâmetros empíricos, m é a constante de restrição ($m = 1 - 1/n$) Mualem (1986), e o valor de α corresponde a uma aproximação do valor de entrada de ar do solo.

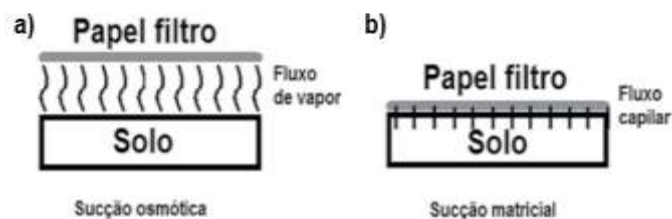
2.5.1.1 Método do papel filtro

A técnica do papel filtro é, segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), a mais simples e econômica de todas as técnicas para se medir sucção do solo em uma faixa de sucção de 10 a 100.000 kPa. Leong *et al.* (2002), também destacam como vantagens do método, além da capacidade de medir um amplo intervalo de sucções, o seu baixo custo e a possibilidade de execução tanto em campo como em laboratório.

O método consiste na utilização de papéis filtro (do tipo quantitativo), como instrumentos de medida para a quantificação indireta da sucção matricial e total do solo. Quando um solo é colocado em contato com um material poroso que possua

capacidade de absorver água, esta passará do solo para o papel até que o equilíbrio de sucções seja alcançado. A sucção matricial é medida quando o fluxo ocorre por capilaridade com contato direto através das partículas do solo e o papel, pois apenas tensões capilares são vencidas nesse processo. Por outro lado, a sucção total é medida se o fluxo ocorre em forma de vapor, sem contato entre o solo e o material poroso, já que são vencidas as forças osmóticas e capilares, que retêm a molécula de água (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015). Na Figura 6, mostra-se a diferença entre a medição da sucção matricial e total.

Figura 6 – Técnica do papel filtro: a) sem contato; e b) com contato



Fonte: Adaptado de Camapum de Carvalho *et al.* (2015).

Após um determinado tempo de equilíbrio, geralmente sete dias para sucção matricial, alcança-se o estado de equilíbrio entre a sucção do solo e do material poroso, porém, com umidades diferentes. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da sucção correta (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Em posse da relação entre sucção e umidade do papel, a sucção do solo pode ser determinada através da curva de calibração correspondente ao papel utilizado. Os papéis filtro mais utilizados neste ensaio são: o *Whatman nº 42* e o *Schleicher & Schuelo 589*. Cada papel possui sua curva de calibração.

2.5.2 Curva de condutividade hidráulica

Denomina-se curva de condutividade hidráulica, a representação gráfica da função que relaciona a condutividade hidráulica do solo não saturado com o seu correspondente conteúdo de água (grau de saturação ou umidade volumétrica), ou poropressão (sucção mátrica), para uma determinada porosidade (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015). Dessa forma, o coeficiente de permeabilidade saturado

(Ks), se torna uma condição particular da curva de condutividade hidráulica do solo não saturado (BICALHO *et al.*, 2007).

O fluxo de água em solos não saturados, então, pode ser descrito através de três variáveis não lineares relacionadas: a umidade volumétrica, a sucção mátrica e a condutividade hidráulica (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Em meio saturado, a condutividade hidráulica é função apenas das propriedades do fluido e do meio poroso, porém, em meio não saturado ela depende também do grau de saturação do solo (FREEZE e CHERRY, 1979).

Esta função pode ser obtida diretamente através de ensaios de laboratório, obtendo-se os valores dos coeficientes de permeabilidade da amostra de solo sob os vários níveis de sucção controlada. No entanto, há dificuldades na determinação experimental, geralmente, associadas com fenômenos de difusão do ar e em virtude das pequenas quantidades de fluxo medidas (BROOKS e COREY, 1966).

Alternativamente, a função de condutividade pode ser obtida indiretamente em função da curva característica, por meio de várias equações publicadas na literatura. Dentre os modelos estatísticos para determinação da função de condutividade hidráulica, destacam-se os modelos de Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), que são apresentados pelas equações 6 e 7, respectivamente:

$$k = k_s \frac{\left[1 - (\alpha \Psi^{n-1})(1 + (\alpha \Psi)^n)^{-m}\right]^2}{(1 + (\alpha \Psi)^n)^{\frac{m}{2}}}; \text{ para } \Psi > 0 \quad (6)$$

$$k = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^{y_i}} \theta(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta(e^{y_i})} \quad (7)$$

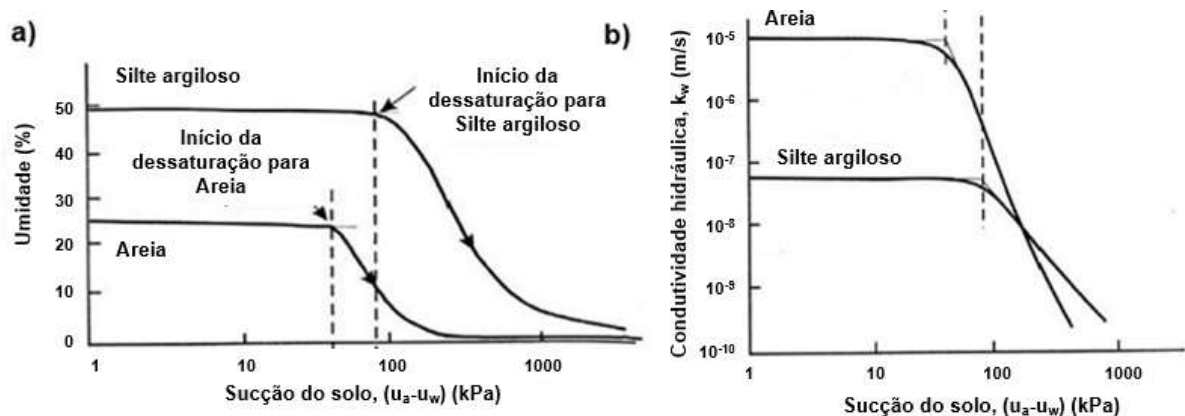
Em que: Ks é a condutividade hidráulica saturada, α , n e m são parâmetros empíricos, n é $1/(1-m)$, Ψ é o valor de sucção inicial, y é o logaritmo da sucção no meio do intervalo $[i, i+1]$, N é o número de intervalos de integração ao longo da curva característica de sucção.

A função do teor de umidade volumétrico para solos coesivos tem configuração relativamente horizontal, enquanto para solos granulares pode

apresentar-se bastante inclinada, evidenciando que além dos valores de poropressão, a curva característica de sucção depende também das propriedades da estrutura do solo (PACHECO, 2005).

Na Figura 7, apresenta-se uma comparação entre as curvas de condutividade hidráulica de um solo arenoso e de um solo siltoso, em paralelo com as curvas de retenção de água. Observa-se que, independentemente do tipo de solo, a condutividade hidráulica permanece relativamente constante até a entrada de ar, ou início da redução do grau de saturação, e, em seguida, decresce rapidamente. Observa-se, também, que a taxa de redução da condutividade hidráulica do solo arenoso é maior do que a do solo mais fino.

Figura 7 – Curva de retenção (a) e condutividade hidráulica (b) para areia e silte argiloso



Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (1994)

2.6 Aspectos hidrológicos afetados pela presença de vegetação

De Oliveira (2013), afirma que dentre os fatores que exercem influência sobre a infiltração do solo, pode-se citar a curva de condutividade hidráulica, a curva característica, os volumes e intensidade de precipitação. Além disso, a geometria do talude e a vegetação também interferem no processo de infiltração, visto que esses dois condicionantes modificam o escoamento superficial.

Vários aspectos referentes à cobertura vegetal podem afetar diretamente a resposta hidrológica. O principal impacto está no balanço hídrico, na energia na superfície do solo e tipo, e no porte da cobertura vegetativa. A cobertura vegetal, por meio do processo de transpiração das plantas, contribui com mais de 90% do vapor

de água e transferência de calor latente do solo no mundo, excedendo o valor do escoamento na maioria das regiões (DINGMAN, 2015).

Ainda segundo Dingman (2015), as principais propriedades das diferentes coberturas vegetativas que influenciam os solos frente aos fenômenos do ciclo hidrológico, são: índice de área foliar (IAF), altura da vegetação, condutância de água das folhas, extensão da área das raízes e biota associada, e profundidade do sistema radicular.

Além dos aspectos hidrológicos, relacionados essencialmente ao controle de erosão, a vegetação atua (“juntamente” com as propriedades dos solos), modificando a distribuição da sucção matricial (ou poropressão, em taludes e encostas saturadas). Isso acontece porque a interceptação da chuva pelas folhas leva à diminuição da velocidade do escoamento superficial, aumentando a permeabilidade e porosidade, reduzindo também a quantidade de água no solo via evapotranspiração (TERWILLIGER, 1990).

2.7 Investigações anteriores sobre propriedades de dunas

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos desenvolvidos em âmbito internacional em dunas costeiras e desérticas, que passaram ou não por processo de estabilização induzido.

Lopez *et al.* (2020) compararam granulometria, porosidade e condutividade hidráulica de um campo de dunas da Arábia Saudita e do Uruguai, com o objetivo de determinar se existiam diferenças significativas entre as propriedades das dunas desses dois locais. A distribuição granulométrica do solo foi obtida por peneiramento e classificada sedimentologicamente de acordo com a escala phi de Folk e Ward (1957), que determina o diâmetro médio, a seleção (*sorting*), a assimetria (*skewness*) e a angulosidade (*kurtosis*) da curva granulométrica dos grãos, utilizando valores de diâmetro transformados logaritmicamente. Os resultados mostraram que o diâmetro médio dos grãos foi significativamente menor no campo de dunas desérticas em comparação com o campo de dunas costeiras (1,95-2,79 phi) e que as dunas costeiras possuem uma melhor seleção de grãos do que as dunas desérticas (0,40-0,66 phi). A porosidade das dunas desérticas foi maior em comparação às dunas costeiras (0,39-0,35). Além disso, os autores identificaram que, em média, as dunas costeiras apresentaram uma condutividade hidráulica

significativamente maior (25,3 m/dia) em comparação com as dunas do deserto (9,32 m/dia).

Wang *et al.* (2019) estudaram os efeitos da estabilização de dunas sob o ponto de vista biológico. Determinaram características da vegetação superficial, o banco de sementes do solo e suas relações com fatores ambientais que mudaram com a estabilização das dunas em uma planície interdunar do Deserto de Horqin, na China. Os resultados mostraram que houve mudanças na relação entre a vegetação superficial, o banco de sementes e a qualidade do solo. A riqueza das espécies de vegetação aumentou com a estabilização das dunas, mas a riqueza de espécies de sementes diminuiu. Ao fim do estudo, os autores sugerem que tanto as dunas móveis quanto as estabilizadas sejam mantidas, uma vez que as dunas móveis são essenciais para a sobrevivência de espécies endêmicas ou pioneiras e as dunas estabilizadas para sustentar a riqueza de espécies.

Rosas *et al.* (2014) determinaram distribuição granulométrica, porosidade e condutividade hidráulica de mais 400 amostras de solos em quatro ambientes deposicionais ao longo do mundo. Os valores de condutividade hidráulica medidos em laboratório por meio de um Permeâmetro de Carga Constante foram comparados aos valores calculados por meio das 20 equações empíricas, por exemplo: Hazen, Carman-Kozeny, Ayamani e Sen, mais usadas para estimar a condutividade hidráulica a partir da granulometria do solo. Verificaram que a maioria dos valores de condutividade hidráulica, estimados a partir das equações empíricas se correlacionavam muito pouco com os valores de condutividade hidráulica medidos em laboratório, com erros variando acima de 500%. Em uma tentativa de melhorar a estimativa empírica, as amostras foram agrupadas por ambiente deposicional e subdivididas em subgrupos com base na litologia e no percentual de argila, e então os métodos empíricos foram analisados novamente para avaliar quais deles melhor estimaram os valores medidos. Além disso, foram efetuados ajustes nas equações empíricas, incluindo alterações em alguns coeficientes e adição de compensações, para produzir equações que melhor estimassem a condutividade hidráulica a partir de dados de granulometria de sedimentos de praia, dunas, mares offshore e rios. Os erros estimados de condutividade hidráulica foram reduzidos para 6 a 7,1 m/dia para os subgrupos de praia, 3,4 a 7,1 m/dia para subgrupos de dunas e 2,2 a 11 m/dia para subgrupos de sedimentos offshore. Melhorias foram feitas nos

ambientes fluviais, mas, ainda assim, produziram elevados erros, correspondentes a valores entre 13 e 23 m/dia.

Li *et al.* (2007), investigaram as propriedades do solo e da vegetação em cinco locais do deserto de Tengger, de dunas estabilizadas por períodos de até 50 anos. Na camada superficial do solo, as partículas finas, o N total, P, K e a matéria orgânica, aumentaram significativamente com o aumento do tempo de estabilização. No entanto, não houve mudanças significativas nos perfis mais profundos do solo (> 0,4 m de profundidade). Além disso, foi identificado que o pH do solo, o conteúdo de carbonato de cálcio e o conteúdo total de sal tendem a aumentar. O conteúdo de água na camada superficial do solo quase não se alterou com o passar do tempo, mas esteve intimamente relacionado com a precipitação durante o período de 50 anos. Já nas camadas mais profundas do solo (0,4 - 3,0 m), o conteúdo de água diminuiu significativamente com o tempo. Após a revegetação, o número de espécies herbáceas aumentou em um período de até 30 anos e depois estabilizou para 12-14 espécies, enquanto o número de espécies arbustivas diminuiu das 10 espécies iniciais para apenas 3 espécies. A cobertura de arbustos diminuiu de uma média de cerca de 33% para os atuais 9%, enquanto a cobertura e biomassa de espécies herbáceas aumentaram entre 1956 e 2006. O desenvolvimento de solo e crostas criptogâmicas na superfície de dunas estabilizadas aumentaram a colonização e o estabelecimento de plantas herbáceas, devido ao aumento da disponibilidade de água, conteúdo de argila e silte e nutrientes no solo.

Zhenghu *et al.* (2004), avaliaram padrões espaciais e temporais de pedogênese em dunas estabilizadas no deserto de Shapotou, noroeste da China, que ameaçavam soterrar a linha férrea Baotou – Lanzhou, no trecho que cruza o Deserto de Tengger. O método de estabilização consistiu na combinação de quebra-ventos, xadrez de palha e plantio de arbustos xerófilos. Foram estudadas dunas com idades de 0, 18, 35 e 43 anos (2004 – 1956), e realizadas análises granulométricas da areia retirada da superfície das dunas estabilizadas pelo método da pipeta, além da análise de propriedades químicas do solo - conteúdo de N, P e K, determinação da densidade pelo método do anel volumétrico, e de outras características do solo. Os resultados mostraram que o ambiente de formação e movimentação do material granular, foi influenciado pelos processos de fixação da areia, e o tamanho médio das partículas do solo diminuiu de 0,2 para 0,08 mm na profundidade de 0-20 cm com o desenvolvimento das plantas implantadas. A capacidade de água disponível

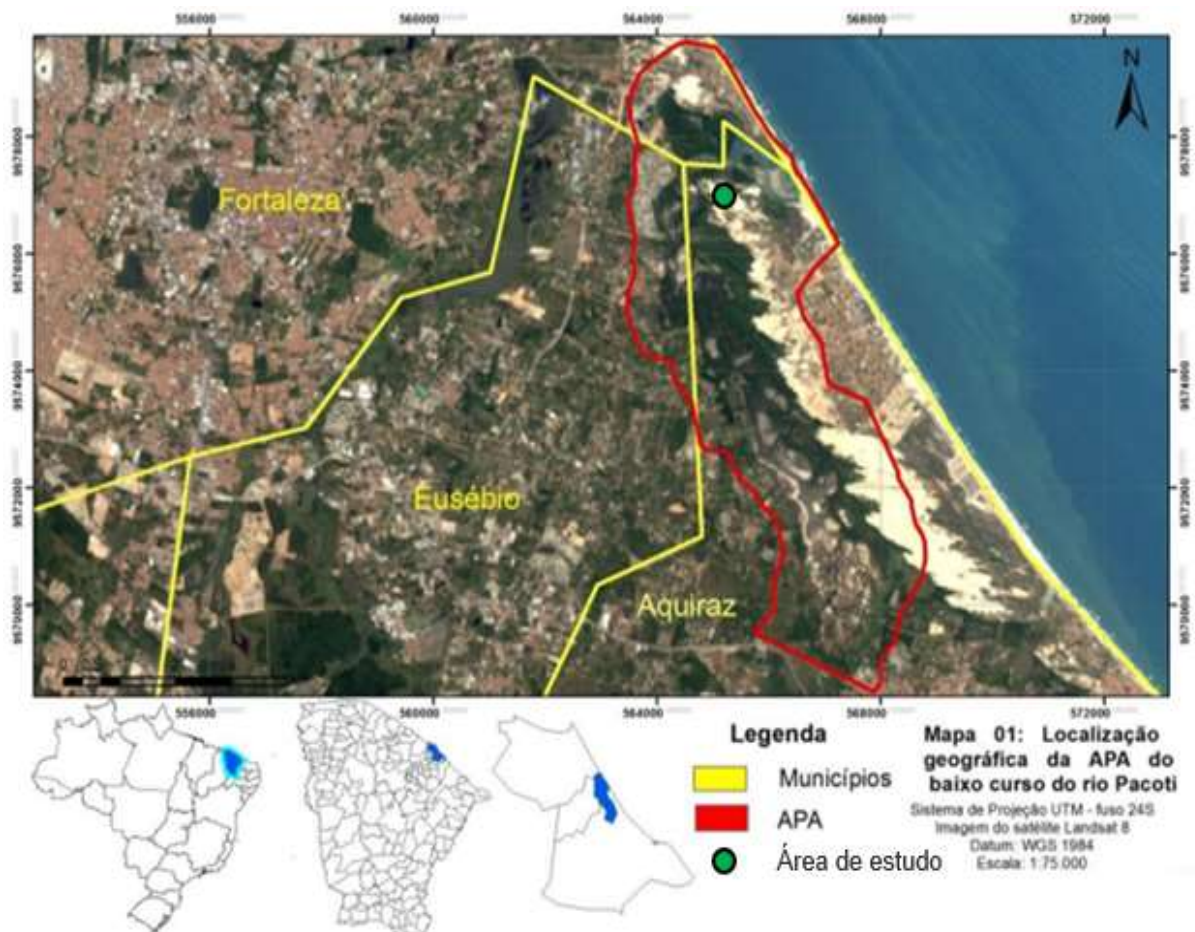
no solo com vegetação aumentou cinco vezes, enquanto a infiltração profunda de água no solo não ocorreu mais devido ao aumento da capacidade hídrica do solo e à alteração na redistribuição da água nos perfis de solo. Em relação à fertilidade, os autores observaram que os microrganismos do solo evoluíram de simples para complexos no solo com vegetação. Além disso, identificaram que, após 39 anos de fixação, o conteúdo de matéria orgânica no solo arenoso aumentou dez vezes em comparação com a duna móvel, e outros nutrientes também aumentaram significativamente. A interação desses processos trouxe acúmulo de fertilidade do solo, evolução dos perfis do solo e desenvolvimento dos perfis com ocorrência de encrostamentos na superfície.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 APA do rio Pacoti

De acordo com dados da Cartilha das Unidades de Conservação do Estado do Ceará, de autoria da Secretaria do Meio Ambiente (SEMA), a APA do rio Pacoti foi criada a partir do Decreto nº 25.778, de 15/02/2000, e possui uma área de aproximadamente 2.914,93ha, que engloba parte dos municípios de Fortaleza, Eusébio e Aquiraz – CE (Figura 8).

Figura 8 – Mapa de localização da APA do rio Pacoti



Fonte: Sousa (2017).

A APA do rio Pacoti situa-se no estuário do rio Pacoti, que é um dos mananciais mais importantes para o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Conforme Sousa (2017), o rio Pacoti nasce em um enclave de

mata úmida, no alto do maciço residual de Baturité, e sua foz compreende duas localidades: Porto das Dunas (município de Aquiraz) e Praia da Cofeco (município de Fortaleza). Tem como contribuintes de maior porte os riachos Baú e Água Verde, ambos afluentes pela margem esquerda (BRANDÃO, 1995). Possui um curso de aproximadamente 130 km com direção sudoeste-nordeste, drenando terrenos cristalinos e sedimentares da Formação Barreiras, possibilitando a formação de amplas faixas aluvionares, associadas a áreas de mangues (CAVALCANTE, 1998).

O rio Pacoti, como a maioria dos rios da região semiárida do Nordeste, pode ser classificado como intermitente, fluindo durante a estação chuvosa, que se dá de maneira mais intensa entre os meses de fevereiro a maio. Porém, a penetração da água do mar em sua faixa de baixo curso, que chega a atingir até 8 km em direção ao continente (CAVALCANTE, 1998), impede que o rio fique sem comunicação com o oceano durante a estiagem. Moraes *et al.* (2006) afirmam que os cursos médio e alto do rio estão inseridos no núcleo de semiaridez, em que a vazão é reduzida e controlada por barragens construídas para o abastecimento.

A fauna é representada por espécies como martim-pescador, anum-preto, gavião-do-mangue, cobra-preta, lagarto, teju, guaxinim, soim, preá, cassaco, peixe galo, bagre camurim, cavalo marinho, caranguejos e ostras, além de ser um local de desova de tartarugas (SEMA, 2018). A flora, em resumo, é representada pela carnaúba, mangue vermelho, mangue preto, mangue-branco e mangue-de-botão (SEMA, 2018).

3.2 Aspectos geológicos e geomorfológicos

A área de estudo, em termos geológicos e de acordo com Brandão (1995), Ribeiro *et al.* (2000) e Castelo Branco (2018), está inserida no contexto das seguintes unidades litoestratigráficas: sedimentos quaternários de dunas móveis e paleodunas, areias de praias recentes, sedimentos flúvio-aluvionares e de mangue na superfície; e, sedimentos terciários da Formação Barreiras e rochas do embasamento cristalino na subsuperfície.

As dunas móveis ou recentes, objeto de estudo desta pesquisa, conforme Brandão (1995) têm sua ocorrência paralela à linha de costa onde a dinâmica eólica é mais intensa, e são caracterizadas pela ausência de vegetação, podendo apresentar um recobrimento vegetal pioneiro, que detém ou ameniza os efeitos da

deflação eólica, tornando-as fixas ou semifixas. Litologicamente, são caracterizadas por areias esbranquiçadas, de granulação fina a média, uniforme, quartzosa, com grãos foscos e arredondados (CASTELO BRANCO, 2018). Ainda segundo Brandão (1995), quanto à morfologia, geralmente apresentam feições de barcanas (meia lua), com declives suaves à barlavento. Em relação à área de estudo, o campo de dunas estudado encontra-se vizinho às planícies aluviais e flúvio-marinhas do rio Pacoti.

As planícies flúvio-marinhas do rio Pacoti são áreas de inundação, com presença de mangues, que possuem relevo plano, e dinâmica condicionada ao regime pluviométrico e à oscilação das marés (GORAYEB *et al.*, 2005).

As paleodunas, por sua vez, são representadas por antigas acumulações eólicas, rebaixadas e situadas à retaguarda das dunas móveis (CASTELO BRANCO, 2018). Segundo Brandão *et al.* (1995), trata-se de uma geração mais antiga de dunas, que apresenta o desenvolvimento de processos pedogenéticos, com a consequente fixação através de um revestimento vegetal de maior porte em comparação à vegetação pioneira das dunas recentes.

Em um trabalho desenvolvido na Região de Aquiraz, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza, Carvalho (1994), distinguiu três gerações de dunas da costa para o mar. A primeira, mais antiga e bem edafizada, possui superfície ondulada, bastante vegetada e com intensa ocupação humana, fato este, que só permite visualizá-la através de fotografias aéreas e através de análise de laboratório. A segunda geração apresenta-se em forma de dunas parabólicas, com extensos campos vegetados e fixos, acompanhando a direção dos ventos, podendo chegar a 100m de altitude. A terceira e última geração de dunas é representada pelas dunas móveis, as quais se deslocam em direção as dunas anteriores. Dessa forma, os campos de dunas ficam condicionados a diversos fatores, e a formação de dunas novas (no caso, as móveis), necessitam de alimentação constante, fazendo parte da dinâmica litorânea, ao mesmo tempo em que contribui para a renovação da paisagem do litoral.

Do ponto de vista morfológico, as dunas em estudo podem ser classificadas como dunas dômicas, pelo seu formato circular com presença de vegetação de restinga em seu topo desenvolvidas logo após o domínio da berma (Figura 9).

Figura 9 – Dunas dômicas



Fonte: autora.

Ribeiro *et al.* (2000) afirmam que, a faixa costeira leste da RMF engloba duas unidades morfológicas principais: os glaciais ou tabuleiros pré-litorâneos e a planície litorânea.

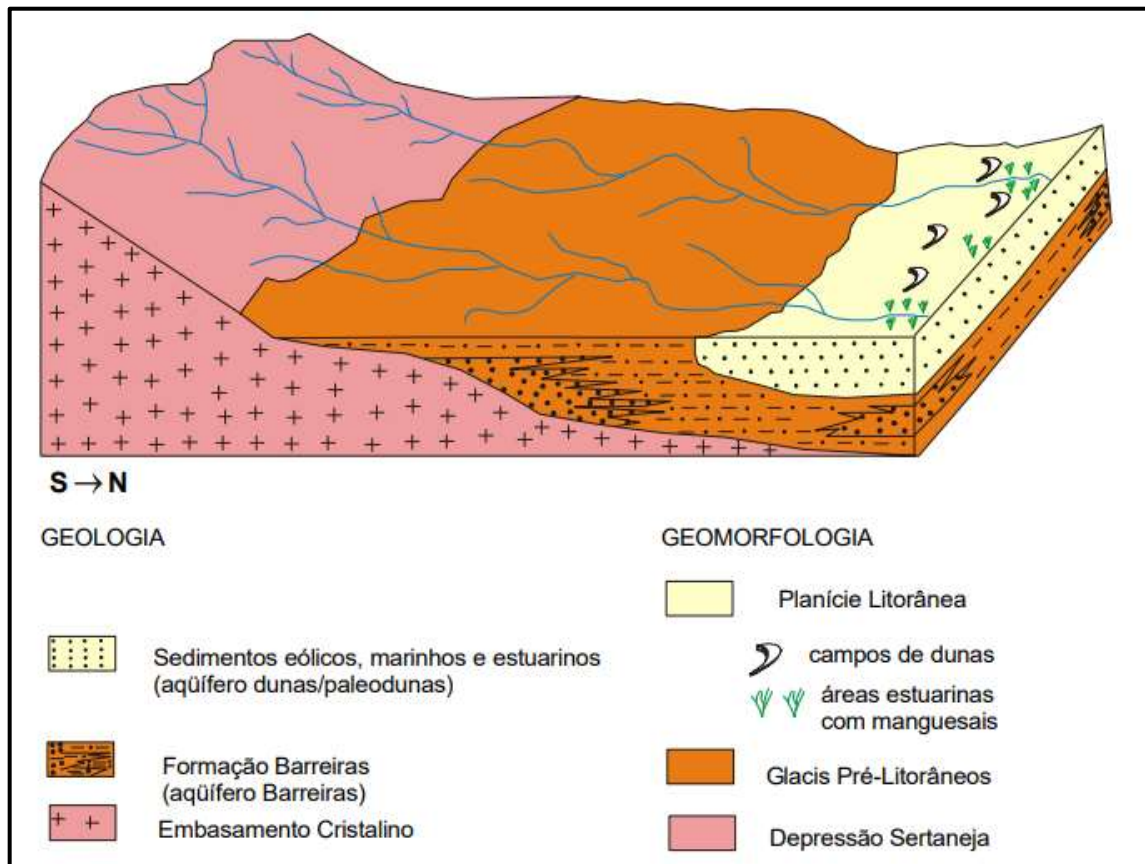
Os glaciais fazem parte da Formação Barreiras e são constituídos por taludes com baixos declives, distribuídos gradativamente do interior para o litoral, cujos sedimentos são de origem continental (RIBEIRO *et al.*, 2000; NASCIMENTO, 2007). No domínio da área de pesquisa, localizam-se à retaguarda dos campos de dunas.

Já a planície litorânea é composta pela faixa de praia e pós-praia, pelos campos de dunas móveis e fixas, resultantes dos processos de acumulações eólicas, pela planície fluviomarinha, e ainda uma parte da Depressão Sertaneja (RIBEIRO *et al.*, 2000; NASCIMENTO, 2007).

A Depressão Sertaneja é o domínio geomorfológico que ocupa maior área de distribuição no âmbito da RMF. Corresponde a uma superfície representada por extensas rampas pedimentadas, que se iniciam na base dos maciços residuais e se inclinam suavemente em direção aos fundos de vales e ao litoral, desenvolvida sobre as rochas cristalinas (BRANDÃO, 1995).

Na Figura 10, apresenta-se uma relação entre a geologia e a geomorfologia, descritas anteriormente.

Figura 10 – Relação entre a geologia e a geomorfologia da faixa leste da RMF



Fonte: RIBEIRO *et al.* (2000).

3.3 Aspectos hidrogeológicos

Do ponto de vista hidrogeológico, as dunas em estudo estão inseridas no aquífero dunas/paleodunas em uma zona de recarga, a uma altitude de aproximadamente 35 metros do nível do mar.

Na RMF existem, basicamente, quatro sistemas aquíferos: dunas/paleodunas, Barreiras, aluviões e rochas do embasamento cristalino.

As rochas do embasamento cristalino representam uma pequena vocação para o armazenamento e captação de água subterrânea, devido à ausência quase total de porosidade e condutividade hidráulica primárias, ficando a infiltração, o armazenamento e a circulação de água restrita somente às zonas que possuem fraturas (CAVALCANTE, 1998). A Formação Barreiras, sobreposta ao cristalino, possui espessuras entre 40 e 50 metros, e é constituída por sedimentos arenoargilosos com granulação que varia de fina a média em diferentes níveis, cuja variabilidade reflete diferentes valores de condutividade hidráulica tanto na vertical

quanto na horizontal, dependendo do contexto local. Segundo Brandão (1998), devido à sua baixa porosidade e permeabilidade (em torno de $1,85 \times 10^{-6}$ m/s), este sistema não pode ser considerado um aquífero, e sim, um aquífero. Apesar disso, a Formação Barreiras ocupa cerca de 615 km² (17,6%) da RMF e, devido à sua grande extensão, tem se mostrado bastante útil para captar pequenas vazões para abastecimento humano, tais como: residências e condomínios (CAVALCANTE, 1998).

As aluviões, apesar de ainda mal dimensionados hidrogeologicamente, associados ao domínio dos terrenos cristalinos, muitas vezes representam a única opção para a captação de água subterrânea nas áreas mais secas (sertões), especialmente através de poços para uso doméstico (BRANDÃO, 1995). Como a exploração desses depósitos é bastante variável, nem sempre pode ser considerado como um aquífero.

Cavalcante (1998) afirma que as dunas e as paleodunas constituem um único sistema aquífero pela sua grande semelhança litológica e hidrodinâmica, o que impossibilita uma distinção a nível regional. Assim, o sistema aquífero dunas/paleodunas, constitui a unidade geológica com maior potencial hidrogeológico da RMF, com espessura local entre, aproximadamente, 4 e 35 metros e saturada entre 6 a 8 metros. As condições de alimentação desse aquífero estão diretamente relacionadas à infiltração pluvial, a qual constitui o seu principal fator de recarga (CASTELO BRANCO, 2018). Conforme Cavalcante (1998), esse sistema funciona, também, como aquífero de transferência, contribuindo para a alimentação das estruturas subterrâneas subjacentes, como a Formação Barreiras e as rochas do embasamento cristalino. Desse modo, as boas condições de permeabilidade das superfícies dunares permitem que as águas infiltradas pela precipitação, contribuam tanto para a alimentação do próprio aquífero, como também para os sistemas posicionados em cotas inferiores.

Segundo Castelo Branco (2018), as zonas de recargas e descargas são definidas em função das diferenças topográficas e morfológicas do sistema dunas/paleodunas, em que a parte mais baixa representa zonas de descargas e a parte mais elevada representa zona de recargas. As zonas de recarga são predominantemente alimentadas por infiltração pluvial, e as de descarga são caracterizadas pela ocorrência de algumas formas naturais e artificiais, como o afloramento do lençol freático na base das dunas, diferenças topográficas

descendentes em direção ao mar e a drenagens efluentes, evapotranspiração e, principalmente, extração de água por poços, considerada a mais efetiva e mais importante forma de descarga (CASTELO BRANCO, 2018). Nesse contexto, o campo de dunas estudado nesta pesquisa, encontra-se inserido em uma área mais elevada, cerca de 35 metros em relação ao nível do mar, o que caracteriza uma zona de recarga.

3.4 Clima

De acordo com Bezerra *et al.* (1995) *apud.* Castelo Branco (2018), as condições climáticas do Nordeste e do estado do Ceará estão relacionadas à circulação atmosférica decorrente de quatro sistemas meteorológicos: Zona de Convergência Intertropical, Frente Polar Atlântica, Massa Equatorial Continental e ventos Alísios de Sudeste.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o sistema meteorológico mais importante na determinação de quão abundante ou deficiente serão as chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil (FUNCEME, 2002), sendo responsável por pesadas chuvas que se estendem do litoral para o sertão, onde atuam com menor intensidade (SILVA, 2000). FUNCEME (2002) esclarece que a ZCIT se constitui em uma banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre, formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul, responsável pelas maiores precipitações que ocorrem no período de fevereiro a maio, sendo os meses de março e abril o período de maior valor pluviométrico.

Aliada à ZCIT, o sistema regido pela Frente Polar Atlântica possui grande importância na produção de precipitações intensas no período de outono-inverno, ao longo do litoral nordestino. Esse sistema é formado pelo deslocamento da massa de ar frio que penetra por baixo da camada de ar quente, provocando a sua elevação, formação de densas nuvens e consequente precipitação (SILVA, 2000).

Já o sistema composto pela massa de ar Tropical Continental, é o responsável pelas chuvas de verão em quase todo o litoral nordestino, resultantes da condensação provocada pelo contato entre massas quentes e úmidas, que

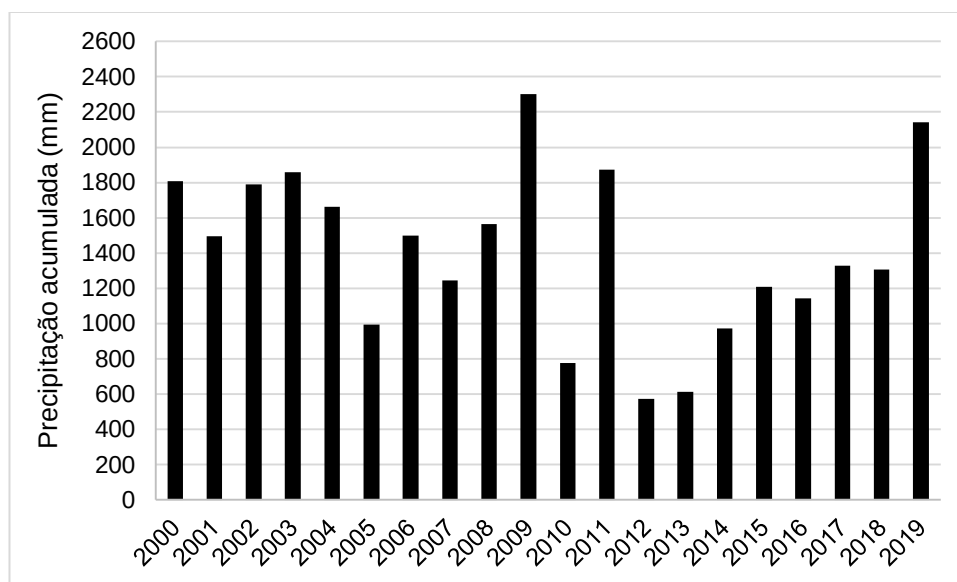
avançam sobre o continente, após o recuo da Frente Polar Atlântica (SILVA, 2000; CAVALCANTE, 1998).

Os Alísios são ventos provenientes da zona subtropical de alta pressão sobre o Atlântico Sul, predominantes do Leste que sopram continuamente no litoral (CAVALCANTE, 1998).

Em resumo, o regime pluviométrico cearense caracteriza-se por chuvas irregulares e esparsas, que ocorrem, geralmente, concentradas em um curto período de tempo (fevereiro a maio). Assim, verificam-se dois períodos bem distintos no ano: um chuvoso, ou úmido, e outro de estiagem, ou seco, sendo este último bastante prolongado, estendendo-se de junho a janeiro (CAVALCANTE, 1998).

Segundo dados fornecidos pela FUNCEME (2020), provenientes do Posto 11 de monitoramento pluviométrico da sede de Aquiraz, observa-se que a máxima precipitação ocorreu em 2009, com 2302,1 mm de precipitação acumulada no ano e média diária de 6,31 mm (Figura 11).

Figura 11 – Pluviometria anual para o período entre 2000 e 2019



Fonte: FUNCEME (2020).

A temperatura apresenta-se praticamente estável ao longo do ano, característica típica das regiões tropicais/ equatoriais, pela maior proximidade com a linha do Equador, o que repercute em baixas amplitudes térmicas mensais (SILVA, 2000).

Devido à indisponibilidade de informações climáticas para a localidade de Aquiraz, foram coletados dados da cidade de Fortaleza, município limítrofe, para os parâmetros de temperatura, velocidade dos ventos e evaporação. Na Tabela 1, apresenta-se um resumo das informações da estação de coleta dos dados climatológicos em Fortaleza.

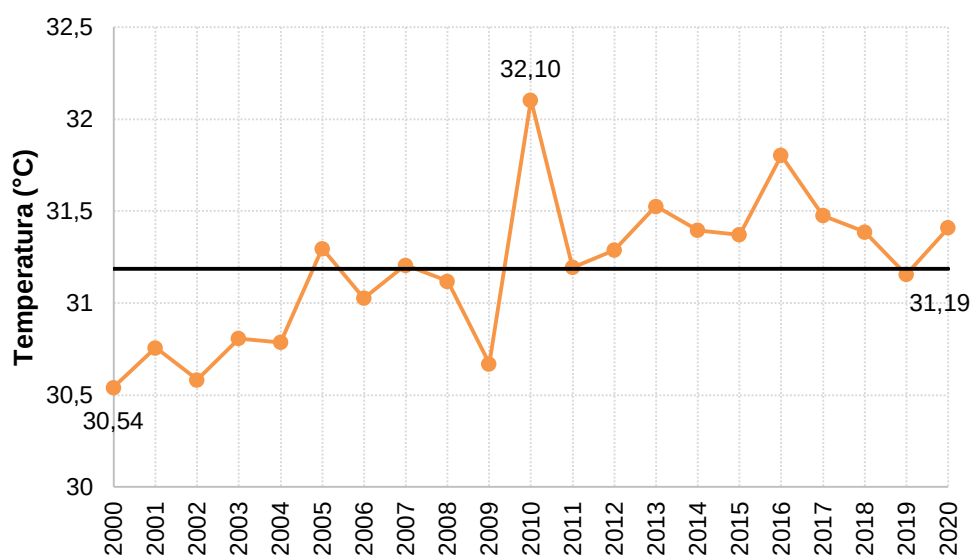
Tabela 1 – Informações da estação de coleta de dados climatológicos de Fortaleza

Estação Convencional (82397)	
Localidade	Fortaleza/Ceará
Climas	Tropical Quente Subúmido; Semiárido
Altitude	29,89 m
Latitude	-381.527.777
Longitude	-3.853.777.777
Período	2000 - 2019

Fonte: autora.

Na Figura 12, observam-se as máximas temperaturas médias anuais para o município de Fortaleza, sendo a mínima de 30,54 °C e máxima de 32,10 °C, segundo dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

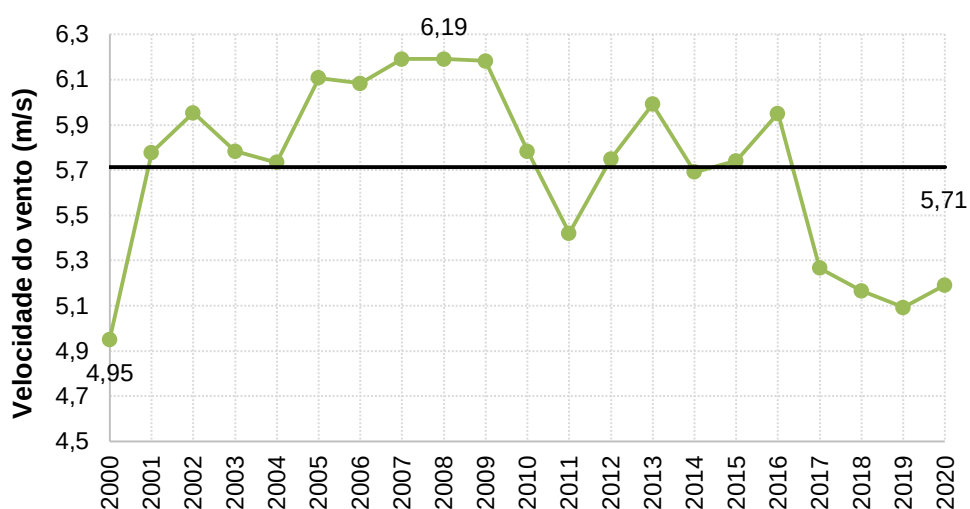
Figura 12 – Temperatura máxima média anual para o período de 2000 a 2020



Fonte: INMET (2021).

Ao longo do ano, os ventos apresentam direções predominantes de SE, ESSE e E. É importante salientar, que existe uma relação entre o período de chuvas e a velocidade dos ventos, os quais atingem velocidades maiores no período de estiagem, principalmente no mês de setembro, e menores velocidades no período de maior pluviosidade, durante os meses de março e abril (NASCIMENTO, 2007). Na Figura 13, mostram-se as velocidades máximas do vento para o município de Aquiraz, segundo dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 13 – Velocidade máxima anual para o período de 2000 a 2020



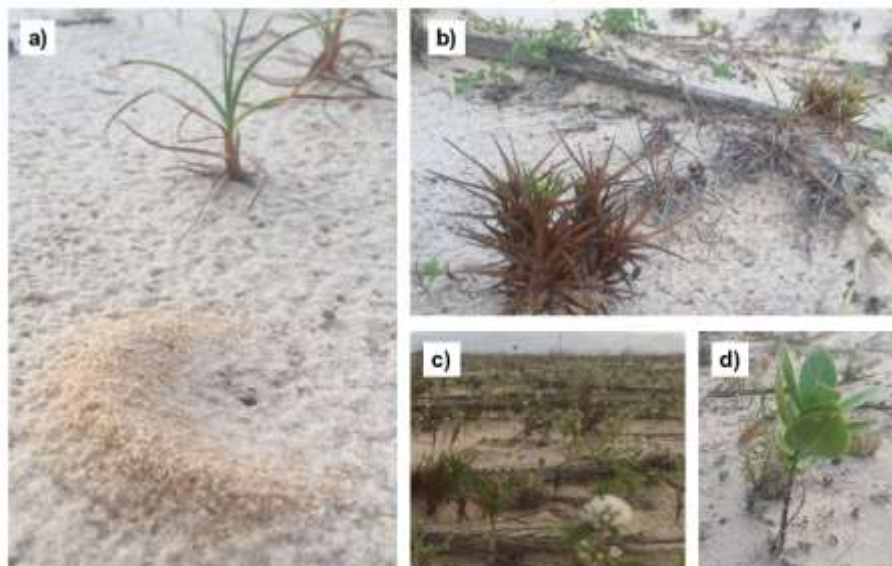
Fonte: INMET (2021).

3.5 Vegetação

A área de estudo, integra o Complexo Vegetal Litorâneo, que é composta pela vegetação pioneira, característica das dunas e pela cobertura vegetal que reveste as dunas mais antigas (CASTELO BRANCO, 2018).

A vegetação pioneira acontece nas áreas mais próximas ao mar, onde predominam gramíneas e várias espécies rasteiras que atuam como fixadores contra a deflação eólica (BRANDÃO, 1998), dentre elas, as mais comuns, são: salsa-da-praia (*Ipomoea pescaprae*, Figura 14d), bredo-da-praia (*Iresine portulacoides*, Figura 14c), capim-da-praia (*Paspalum vaginatum*, Figura 14a), cipó-da-praia (*Remirea marítima*, Figura 14b) e oró (*Phaseolus ponduratus*), além de arbustivas como o murici (*Byrsonima cerícea*).

Figura 14 – Vegetação fixadora da duna em estudo, sendo (a) capim-da-praia (*Paspalum vaginatum*), (b) cipó-da-praia (*Remirea marítima*), (c) bredo-da-praia (*Iresine portulacoides*) e (d) salsa-da-praia (*Ipomoea pescaprae*)



Fonte: autora.

As dunas mais antigas (paleodunas), edafizadas ou em processo de edafização, as quais se situam à retaguarda das áreas de vegetação pioneira, apresentam um revestimento vegetal de porte arbóreo, identificado pelas seguintes espécies: João-mole (*Pisonia tormentosa*), jucá (*Caesalpinia ferrea*), juazeiro (*Zizyphus joazeiro*), pau d'arco roxo (*Tabebuia avellanede*), tatajuba (*Chloroflora tinctoria*) e cajueiro (*Anacardium occidentale*) (BRANDÃO, 1998).

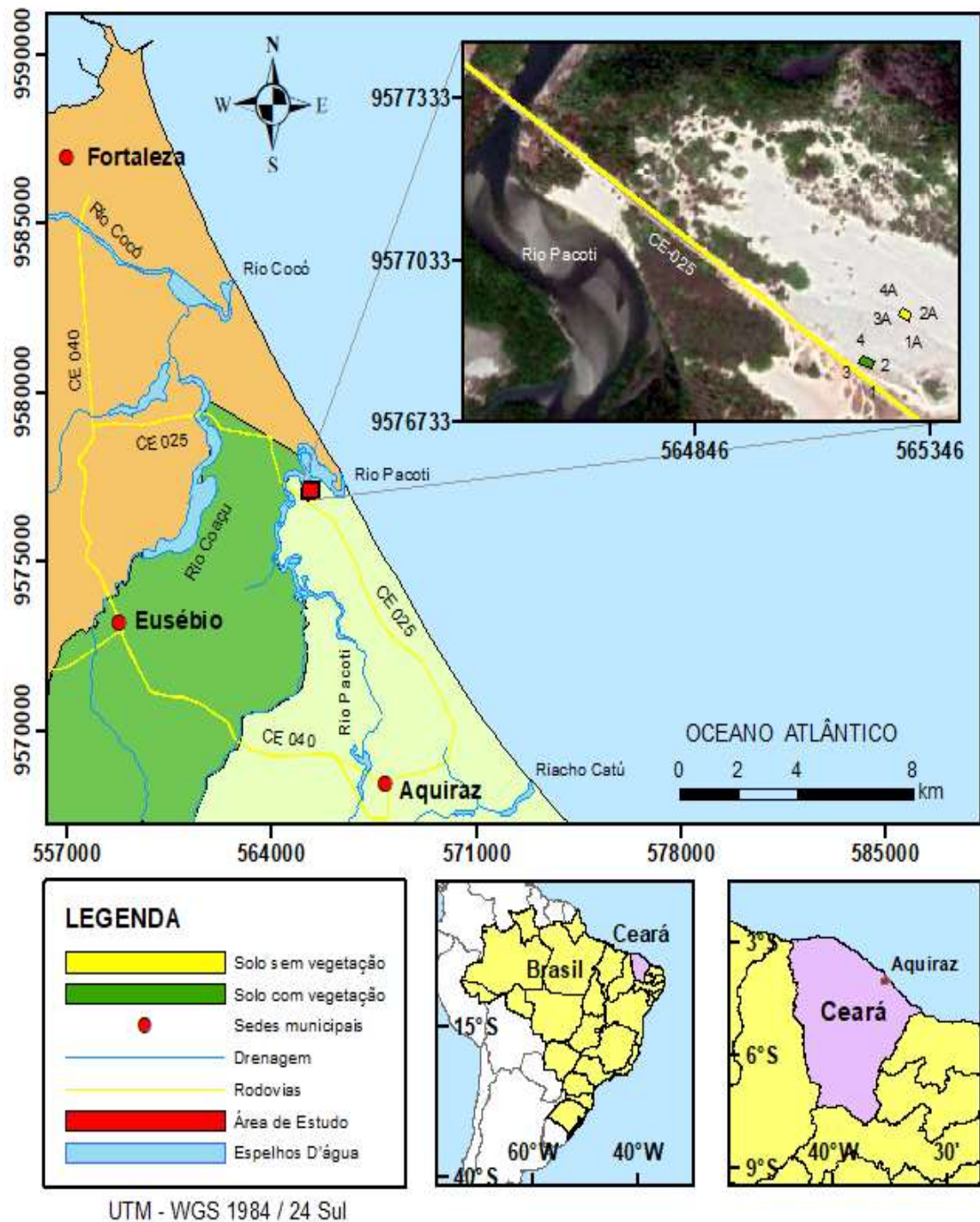
3.6 Localização da Área de Estudo

O projeto de pesquisa foi desenvolvido em parcelas inseridas no município de Aquiraz (porção nordeste do estado do Ceará), abrangendo parte da faixa costeira da RMF, especificamente nas margens da CE-025 (Av. Litorânea), – trecho compreendido entre o rio Pacoti e o início do Porto das Dunas, distante, aproximadamente, 26 km de Fortaleza.

A área de estudo constitui-se de dois polígonos regulares delimitados cada um por quatro vértices com coordenadas UTM apresentadas na Tabela 2, perfazendo uma área total de aproximadamente 60.000 m². O primeiro polígono mais próximo à margem da estrada representa a duna estabilizada pela palha de coqueiro e vegetação do Complexo Vegetal Litorâneo, e o segundo, mais próximo ao

mar, representa a duna em seu estado natural, móvel. A Figura 15 mostra o mapa de localização dos polígonos descritos.

Figura 15 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: autora.

Tabela 2 – Coordenadas dos vértices 1, 2, 3, 4, 1A, 2A, 3A, e 4A, que delimitam os polígonos da área de estudo

Amostra	Coordenadas UTM	Vértices do polígono			
		1	2	3	4
Com vegetação	E	565302	565306	565280	565289
	S	9576918	9576936	9576932	9576944
		1A	2A	3A	4^a
Sem cobertura	E	565222	565229	565193	565202
	S	9576832	9576845	9576842	9576857

Fonte: autora.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Ensaio e amostragem

Os ensaios para a caracterização física e hidráulica do solo utilizado foram realizados conforme os procedimentos da ABNT, exceto os ensaios de porosidade e curva de retenção de água, devido à falta de normatização brasileira. Sendo estes:

- granulometria do solo, conforme procedimentos da NBR 7181 (ABNT, 2016);
- umidade higroscópica, conforme NBR 6457 (ABNT, 2016);
- densidade real, conforme NBR 6458 (ABNT, 2016);
- macro e microporosidade: método da mesa de tensão, conforme Manual de Análise de Solo da Embrapa – Cap. 9 (EMBRAPA, 2017);
- curva de retenção de água: método do papel filtro, conforme a norma americana ASTM D5298-16;
- condutividade hidráulica saturada do solo com e sem raízes, obtidas em ensaios de permeâmetro à carga constante, conforme NBR 13292 (ABNT, 2021).

Para a maior parte dos ensaios de caracterização física e hidráulica do solo, foram definidos 12 pontos georreferenciados (6 em cada área), exceto para o ensaio de macro e microporosidade, para o qual foram definidos 24 pontos (12 em cada área). Foram realizadas três campanhas no segundo semestre de 2019, entre julho e novembro, sendo a primeira para o reconhecimento e as duas últimas para a coleta das amostras.

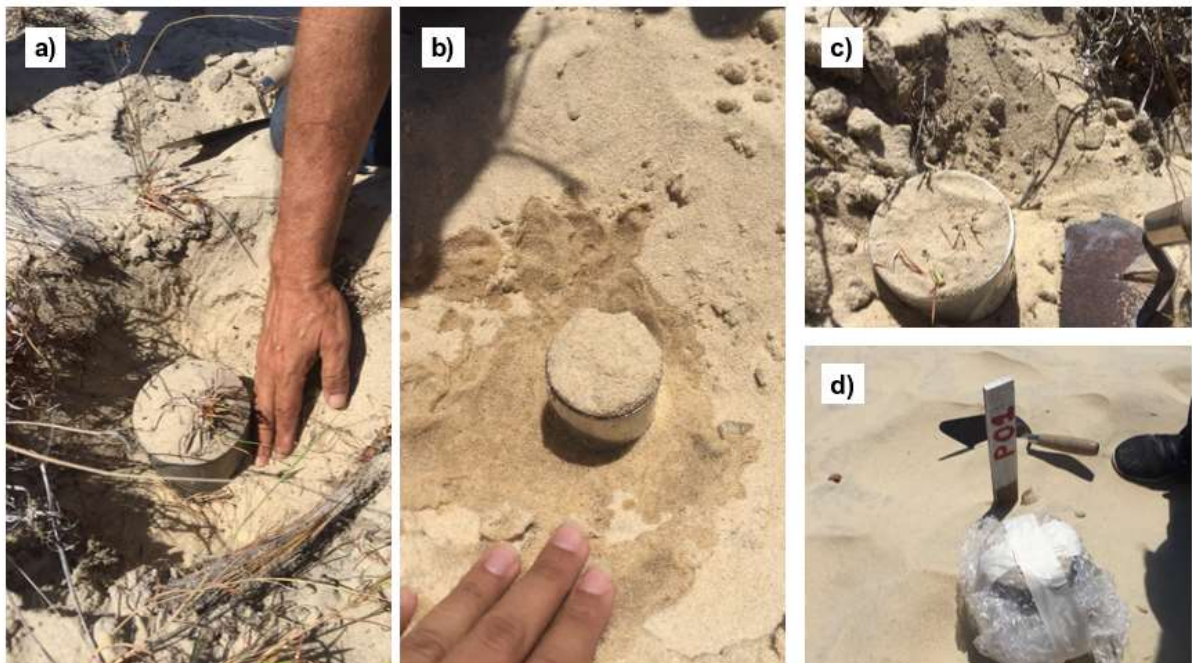
Do intervalo de 0 a 15 cm de profundidade, foram retirados 20 quilos de areia de cada ponto para obtenção da granulometria, densidade real, umidade higroscópica e para a curva característica.

Partindo da superfície, foram cravados 12 cilindros de 4,9 cm de diâmetro e 5,3 cm de altura (12 em cada área) e 12 cilindros de 10 cm de diâmetro por 12 cm de altura (6 em cada área), para os ensaios de macro e microporosidade, e condutividade hidráulica, respectivamente.

Os cilindros menores destinados ao ensaio da mesa de tensão foram cravados com o auxílio das mãos, conforme (Figura 14a), com muito cuidado para

preservar ao máximo a estrutura do solo. Nos pontos em que o solo se encontrava muito seco e solto, foi adicionada água em sua superfície, para conferir um pouco de coesão aparente à areia e facilitar a cravação (Figura 14b). Após a cravação, escavou-se a areia ao redor dos cilindros até que suas laterais ficassem à mostra. Por fim, com o auxílio de uma colher de pedreiro, cada cilindro foi retirado pela parte inferior e envolvido com cuidado em plástico bolha para ser transportado ao laboratório de Física dos Solos da UFC (Figuras 14c e 14d).

Figura 16 – Cravação e retirada dos cilindros



Fonte: autora.

Os cilindros maiores destinados ao ensaio de condutividade hidráulica foram cravados com o auxílio de uma haste guia e de um soquete de cravação, procurando-se obter amostras com a presença de vegetação e raízes no interior do cilindro na área com cobertura vegetal. Após a cravação, escavou-se a areia ao redor dos cilindros, até que suas laterais ficassem à mostra para retirá-los com o auxílio de uma colher de pedreiro. Por fim, os cilindros foram envolvidos em plástico bolha para serem transportados ao laboratório de Mecânica dos Solos do IFCE, onde os ensaios foram realizados.

4.2 Caracterização física do solo

A distribuição granulométrica de cada amostra foi determinada pelo método do peneiramento, conforme procedimento descrito em ABNT (2016). As curvas granulométricas foram determinadas associando-se os diâmetros das partículas com percentuais passantes nas peneiras e, a partir delas, foram determinados os parâmetros que permitem caracterizar a distribuição granulométrica do solo: diâmetro efetivo (d_{10}), coeficiente de uniformidade (C_u), e coeficiente de curvatura (C_c).

A massa específica aparente seca (g_s , $g.cm^{-3}$) foi obtida para todos os tamanhos de cilindro. A umidade higroscópica do solo foi obtida pelo método da estufa, cujo resultado é o teor de umidade em massa (h , $g.g^{-1}$). A conversão para umidade com base no volume (θ , $cm^3.cm^{-3}$) foi feita pela multiplicação da umidade a base massa pela densidade do solo.

Em um primeiro momento, a porosidade total (P_t , $cm^3.cm^{-3}$) do solo foi obtida a partir de uma correlação entre g_s descrita no parágrafo anterior e a densidade de partículas (δ , $g.cm^{-3}$) obtida pelo método do picnômetro, aplicando-se a equação 8 (EMBRAPA, 2018):

$$P_t = 1 - g_s/\delta \quad (8)$$

A macroporosidade (Ma , $cm^3.cm^{-3}$) e a microporosidade (Mi , $cm^3.cm^{-3}$), foram determinadas no laboratório de Física dos Solos da Universidade Federal do Ceará (UFC) Campus do Pici, pelo método da mesa de tensão (EMBRAPA, 2017).

As amostras foram saturadas durante 24h em bandeja com água até dois terços da altura dos cilindros, e pesadas para obtenção da massa do solo saturado. Em seguida, foram colocadas sobre a placa porosa e submetidas à tensão de -6 kPa (0,6 mca).

Figura 17 – Mesa de tensão submetida a um potencial de 0,6 mca (-6 kPa)



Fonte: autora.

A partir do momento em que não foi observado mais gotejamento de água, as amostras foram pesadas obtendo-se a massa do solo úmido. Após esse procedimento, foram levadas para estufa a 105 °C por 24h e pesadas novamente para obtenção da massa de solo seco. Durante o procedimento do ensaio, a massa específica aparente seca, foi obtida novamente para todos os cilindros e utilizada na determinação da porosidade total.

Ao fim do ensaio, a porosidade total foi calculada conforme a Equação 8, já citada, sendo que para a densidade de partículas foi assumido um valor médio de 2,65, por ser uma média dos minerais mais comuns em solos. Essa definição foi feita, porque a densidade real obtida em laboratório foi determinada apenas em 12 dos 24 pontos da área de estudo.

A microporosidade corresponde ao volume de água presente no solo a após o equilíbrio da amostra submetida a um potencial de 0,6 m, e foi calculada conforme a Equação 9. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, conforme a Equação 10.

$$Mi = V_r/V_t, \quad \text{em que} \quad V_r = \frac{m_1 - m_2}{\rho_a} \quad (9)$$

$$Ma = Pt - Mi \quad (10)$$

Em que: M_i é a microporosidade, V_r é o volume de água correspondente aos microporos, V_t é o volume total da amostra em cm^3 (assume-se que o volume total da amostra é igual ao volume do cilindro), m_1 é a massa da amostra após drenagem dos macroporos na mesa a 60 cm de tensão (g), m_2 é a massa da amostra após secagem na estufa (g) e ρ_a é massa específica da água (1 g/cm^3).

4.3 Caracterização hidráulica do solo

A condutividade hidráulica saturada (K_s) foi obtida em laboratório pelo método convencional do permeâmetro à carga constante (Figura 18) no Laboratório de Mecânica dos Solos do IFCE, para isso foram coletadas amostras indeformadas de solo em cada ponto. As amostras foram coletadas com cilindros de 10 cm de diâmetro por 12 cm de altura. O número de repetições dos ensaios de permeabilidade foi sempre maior ou igual a três.

Figura 18 – Ensaio para obtenção da condutividade hidráulica saturada (K_s) pelo método do Permeâmetro à Carga Constante



Fonte: autora.

A curva de retenção de água foi obtida pelo ensaio do papel filtro (Figura 19), realizado com base na metodologia descrita em ASTM (2016), com algumas adaptações sugeridas por Marinho (2000) e Rios Filho (2006), quanto a secagem e quantidade de papel. O papel filtro utilizado nos ensaios foi do tipo Whatman Nº 42. O período adotado de equalização da sucção entre o papel filtro e as amostras foi de sete dias, conforme recomendações de ASTM (2016). Após este prazo, determinou-se a umidade do papel filtro após equalização com a sucção da amostra de solo.

Figura 19 – Ensaio para obtenção da curva característica pelo método do Papel Filtro



Fonte: autora.

4.4 Análise estatística dos dados

Realizou-se uma análise estatística descritiva dos parâmetros físicos e hidráulicos obtidos (granulometria, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, massa específica do solo, densidade das partículas, umidade higroscópica e condutividade hidráulica), constituída pela obtenção do resumo dos cinco números, medidas de posição e dispersão, intervalos de confiança e coeficientes de assimetria e curtose, seguida pela análise de dados discrepantes utilizando diagrama de ramos e folhas, e limites críticos para valores discrepantes.

Um dos grandes problemas da utilização da estatística clássica é a necessidade de ter amostras independentes, e dados que apresentem comportamento normal, o que nem sempre ocorre em estudos que envolvem retenção de água e condutividade hidráulica do solo (MARQUES, 2000). Portanto, para a análise dos dados obtidos, considerou-se que as amostras foram coletadas de forma aleatória, admitindo-se independência entre os dois grupos de solo (duna móvel e estabilizada). Além disso, a determinação de K_s não foi realizada em campo e, portanto, não envolveu fluxo de água horizontal ou ao longo do perfil do solo, o que contribui para a independência entre as amostras.

Outro ponto a se considerar é a independência das variáveis. De acordo com Paes (2010), quando se tem interesse em avaliar a influência de um conjunto de fatores sobre eventos ou outras características de interesse, os métodos estatísticos mais utilizados são os modelos de regressão, que estabelecem uma equação que relaciona as características de interesse (variáveis dependentes), com os fatores que se deseja investigar (variáveis independentes). Como na pesquisa busca-se avaliar se a aplicação da palhagem exerce influência sobre as características hidráulicas do solo, as propriedades físicas foram definidas como variáveis resposta (independentes) e as propriedades hidráulicas como variáveis de interesse (dependentes).

A verificação da normalidade de dados provenientes de pequenas amostras representa outro impasse no âmbito estatístico. Os modelos estatísticos mais conhecidos (paramétricos) supõem que as variáveis possuam distribuição normal, e para que sejam consideradas como tal, geralmente, precisam possuir um número de dados igual ou superior a 30. Contudo, pode-se afirmar que quando se extraem amostras (de qualquer tamanho) de uma população com distribuição normal, a distribuição das médias amostrais será aproximadamente normal (TRIOLA, 1997). Assim sendo, a partir dos pressupostos levantados na literatura, para a condutividade hidráulica saturada do solo se assumirá comportamento log-normal (COOK *et al.*, 1989; SISSON e WIERENGA, 1981; BIGGAR e NIELSEN, 1976), e para os parâmetros físicos comportamento normal (DAHIYA *et al.*, 1984). Realizou-se análise estatística aplicando-se o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO e WILK, 1965), de forma a verificar a normalidade dos dados de porosidade e condutividade hidráulica saturada.

O Teste t de Student, ao nível de 5% de significância foi aplicado para comparação das médias dos valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade. Os programas computacionais utilizados para as análises estatísticas e construção de gráficos foram o SPSS® - *Statistical Package for the Social Sciences* (IBM, 2011) e o R® (R CORE TEAM, 2020).

4.5 Modelagem da condutividade hidráulica saturada (Ks)

Cinco equações empíricas para obtenção indireta da condutividade hidráulica saturada a partir de parâmetros da granulometria e porosidade do solo, foram

ajustadas de modo a representar os valores de condutividade medidos com o menor erro possível (Tabela 3). Foram escolhidas com base no trabalho desenvolvido por Rosas *et al.* (2014), as equações que forneceram uma melhor correlação estatística entre os valores de condutividade hidráulica estimados e medidos em dunas costeiras avaliadas pelos autores. Foram utilizados os mesmos coeficientes beta (β) ajustados pelos autores para o grupo Dunas, para diâmetros efetivos (d_{10}) entre 0 e 0,20. O conjunto de dados obtidos por Rosas *et al.* (2014), contém valores de condutividade hidráulica para solos provenientes de vários ambientes deposicionais, cujas amostras foram coletadas em diversos continentes, o que indica, que as equações empíricas podem ser aplicáveis em diferentes tipos de solos arenosos (WANG, 2017).

	Método	Equação	β ajustado
(a)	Beyer (1964)	$K[m/s] = \beta \frac{g}{\nu} \log \frac{500}{Cu} d_{10}^2$	$1,47 \times 10^{-4}$
(b)	Harleman <i>et al.</i> (1963)	$K[m/s] = \frac{\rho g}{\mu} d_{10}^2$	$8,13 \times 10^{-4}$
(c)	Hazen-original (1892)	$K[m/s] = \beta C d_{10}^2$	$4,35 \times 10^{-4}$
(d)	Hazen modificada (1959)	$K[m/s] = \beta \frac{g}{\nu} [1+10(n-0,26)] d_{10}^2$	88,82
(e)	Kozeny-Carman (CARMAN 1937a, 1956b; KOZENY 1927a, 1953b)	$K[m/s] = \beta \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{10}^2$	$4,90 \times 10^{-4}$

Fonte: adaptado de Rosas (2014).

Em que: ν = viscosidade cinemática do fluido [L^2/T]; μ = viscosidade dinâmica do fluido [$M/L.T$]; ρ = massa específica do fluido [M/L^3]; g = aceleração da gravidade [L/T^2]; Cu = coeficiente de uniformidade; d_{10} = diâmetro efetivo; β = coeficiente beta; C = coeficiente de Hazen em $[cm.s]^{-1}$; n = porosidade.

O diâmetro efetivo dos grãos é a principal base de todas as equações empíricas, como por exemplo, a de Harleman *et al.* (1963) e Hazen (1892), sendo esta, a primeira a ter correlacionado granulometria com condutividade hidráulica. Posteriormente, em 1959, a equação de Hazen foi modificada por Lange (apud KRESIC, 1997), que introduziu a porosidade efetiva (n), e variável do fluido na equação, obtendo-se a condutividade hidráulica a partir da fórmula (d). Kozeny-

Carman (KOZENY, 1927a, 1953b; CARMAN, 1937a, 1956b), representado na equação (e), também é outro modelo clássico que incorporou o efeito da porosidade.

Outras equações típicas para estimar a condutividade hidráulica a partir do tamanho do grão, mas considerando também os efeitos da uniformidade do tamanho da partícula e da porosidade, também foram desenvolvidas, posteriormente, como, por exemplo, a equação (a) de Beyer (1964), que leva em consideração o efeito da uniformidade das partículas, representada pelo coeficiente de uniformidade (C_u).

A modelagem da condutividade hidráulica, foi realizada por meio de um programa em Excel desenvolvido por Rosas *et al.* (2014), que permite normalizar os valores medidos e modelados de condutividade hidráulica saturada à uma temperatura de 25° C. O processo de normalização exigiu que os valores de condutividade hidráulica fossem convertidos em permeabilidade intrínseca, incorporando o termo $[\rho \cdot g \cdot \mu^{-1}]$ a equações para que a viscosidade cinemática tivesse sua temperatura ajustada. Por fim, os valores obtidos foram convertidos de volta para condutividade hidráulica.

4.6 Modelagem numérica

Foi realizada uma análise da percolação e da infiltração nas dunas por meio do programa Vadose/W 2007. O programa realiza a simulação de fluxo em meios não saturados e saturados, utilizando o método de elementos finitos para resolver a equação de Richards (1931).

A simulação das condições de fluxo não saturado, através de dunas móveis e estabilizado artificialmente quando sujeitas às condições ambientais atuantes, foi realizada a partir da utilização do modelo numérico desenvolvido pela GEOSLOPE (2007), em seu *software* VADOSE/W do pacote Geostudio 2007.

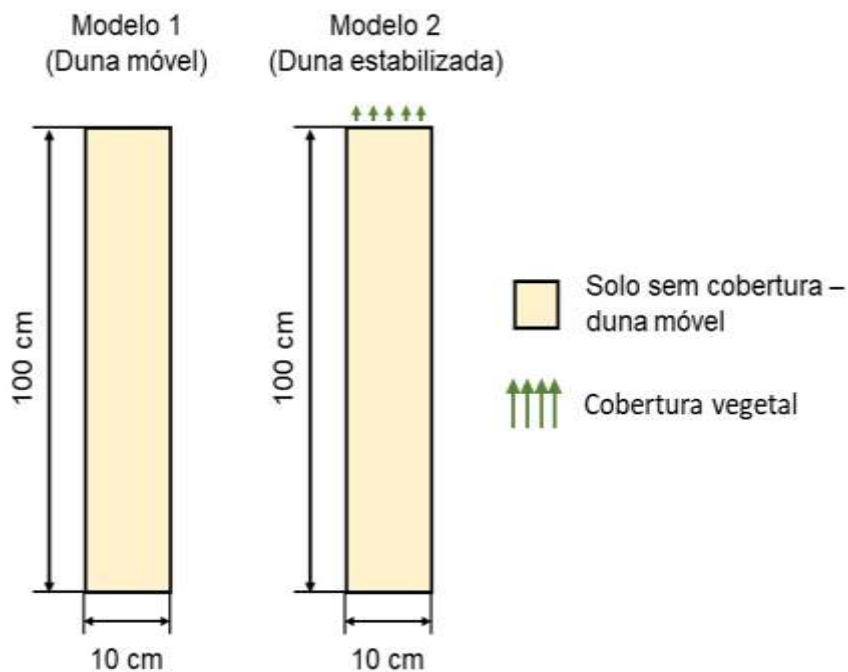
Para o estudo das condições de fluxo através das dunas, deve-se analisar o balanço hídrico resultante da incidência de precipitação ao longo de um ano, em que se verifica o volume de água, que de fato penetra no interior da massa de solo. O *software* Vadose/W permite a obtenção das curvas de precipitação, escoamento superficial, erro acumulado (associado ao método numérico), armazenamento de água, evaporação e percolação em termos de volume acumulado (m^3) ao longo do ano que se deseja estudar, levando em conta a presença de vegetação na superfície do solo.

4.6.1 Parâmetros de entrada e condições de contorno

O Vadose é um software formado por três módulos: *define*, *solve* e *contour*. O módulo *define*, compreende o conjunto de etapas de desenho do perfil de solo, de definição do material pela curva característica e de condutividade, e a definição das condições de contorno. O módulo *solve*, consiste na resolução do problema pelas equações de elementos finitos do programa. O módulo *contour* é aquele que apresenta todos os resultados da modelagem após análise, dentre eles, o balanço hídrico.

Inicialmente, foram definidas as configurações e as espessuras das camadas dos dois sistemas de coberturas a serem estudados, as quais terão espessura total de 100 cm. As características e dimensões dos dois sistemas estão apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Configurações dos modelos estudados



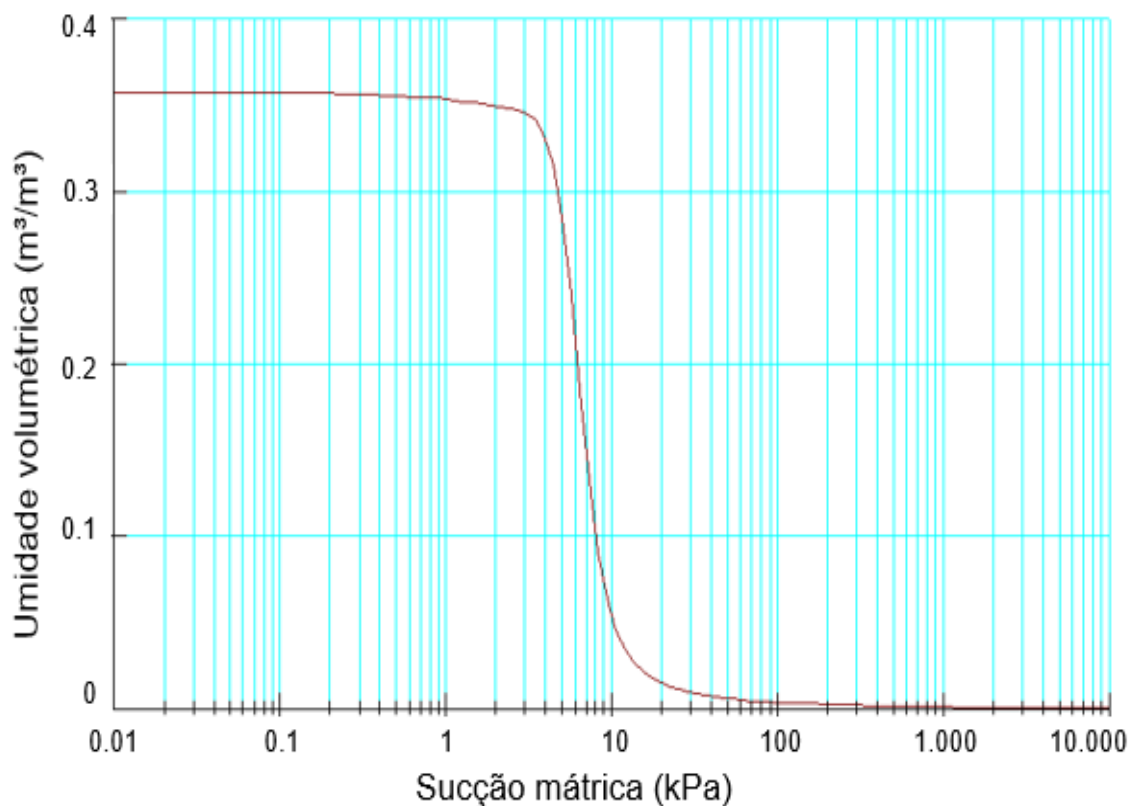
Fonte: autora.

O primeiro modelo, que representa a duna em seu estado móvel é constituído por apenas uma camada de 100 cm de espessura com o mesmo tipo de solo. Para o segundo modelo, que representa a duna estabilizada, foi considerada a mesma

camada de 100 cm de espessura com o mesmo tipo de solo, porém, com presença de vegetação superficial. Os elementos possuem seção transversal quadrada com 10 cm de largura, referente ao diâmetro dos cilindros utilizados para a amostragem do solo.

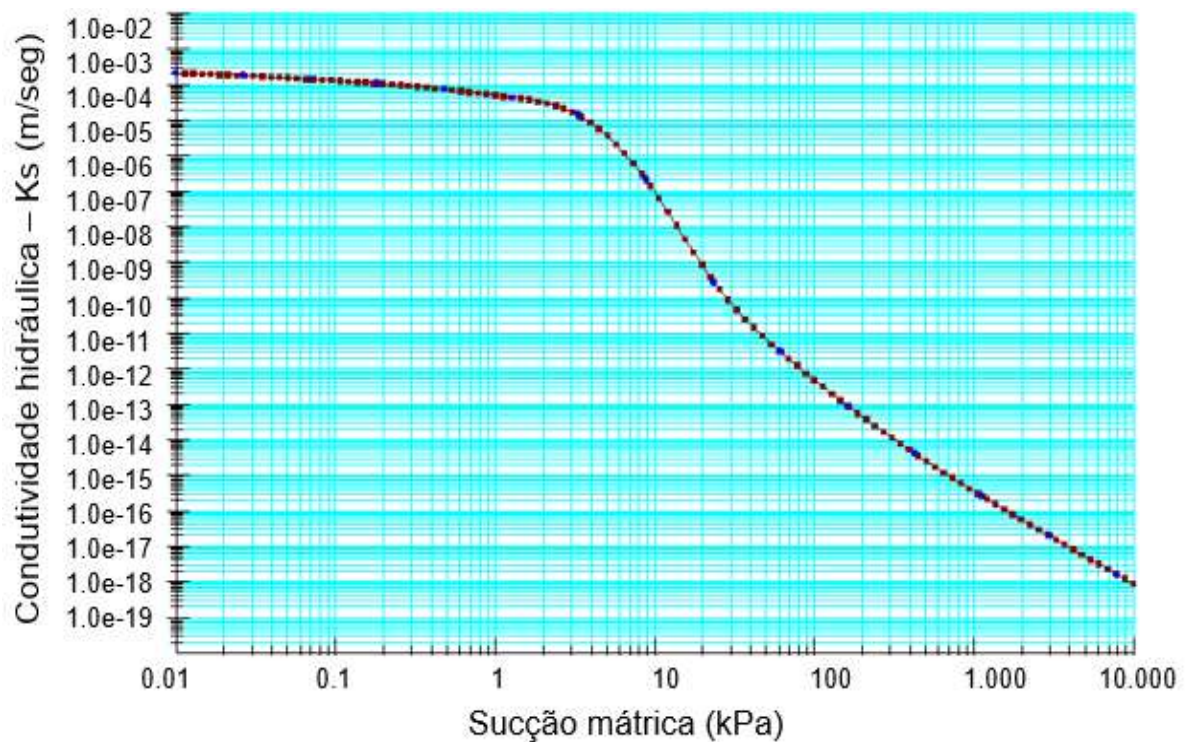
A modelagem foi realizada em regime transiente por uma malha de elementos finitos quadrada com 1 cm de abertura. A condição térmica foi de 26°C para todo o perfil de solo e o tipo de material foi adotado de acordo com a curva característica inserida. Somente a curva característica do solo sem cobertura foi utilizada, já que houve uma grande semelhança entre as curvas dos dois tipos de solo, com e sem vegetação. Já as curvas de condutividade hidráulica, foram estimadas por meio da curva característica e de uma média do coeficiente de permeabilidade saturada (K_s) de todas as amostras, da ordem de 10^{-4} cm/s, conforme os resultados dos ensaios de permeabilidade.

Figura 21 – Curva de retenção de água gerada no modelo



Fonte: autora.

Figura 22 – Curva de condutividade hidráulica gerada no modelo



Fonte: autora.

Quanto aos parâmetros térmicos, foi adotada condutividade térmica de 190 J/sec/m/°C e capacidade de calor volumétrica de 2.000.000 J/m³/°C.

Para a condição de contorno climática, foi considerada uma precipitação arbitrária, considerando-se o ano de 2018, com precipitação acumulada de 1543,3 mm no ano e média diária de 4,2 mm, conforme análise dos dados obtidos do posto pluviométrico 82397.

O software Vadose utiliza o modelo de Penman-Wilson (1990), para a estimativa das condições de evaporação em solos não saturados. O método se baseia naquele proposto por Penman (1948), que define um modelo para a obtenção da taxa de evaporação na superfície de sistemas de coberturas, com base em parâmetros climáticos. Assim, a estimativa foi feita com base nos parâmetros de temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e velocidade do vento coletados da base de dados do INMET, para a cidade de Fortaleza.

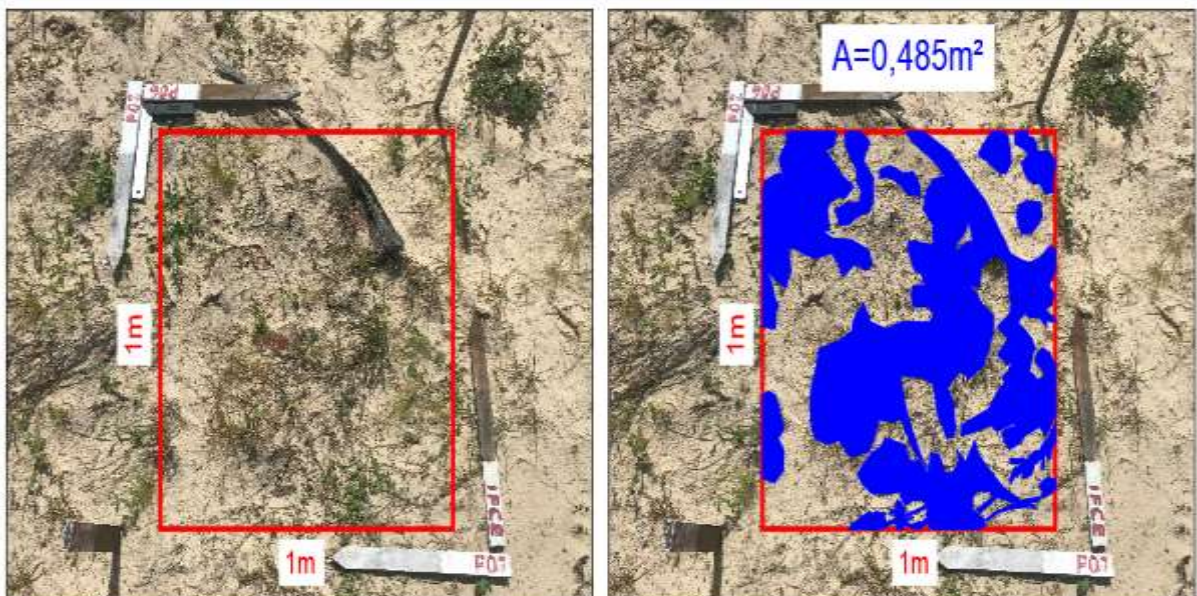
A modelagem do tipo Transiente Não Acoplado permitiu estudar o fluxo em meio não saturado, sob a influência do clima em um período de um ano. O número máximo de iterações foi de 50 com tolerância de 0.01. O tempo total simulado no

regime transiente foi de 31536000 segundos (1 ano), com um intervalo de tempo de 1 dia (365 passos).

Uma das condições de contorno relacionadas à vegetação é o Índice de Área Foliar (IAF), que é utilizado pelo VADOSE/W para reduzir a quantidade de radiação líquida que intercepta a superfície do solo de forma a reduzir a evaporação real calculada. O Índice de Área Foliar, portanto, controla a forma como a energia na superfície é dividida entre o que está disponível para a evaporação direta a partir do solo e a que está disponível para a transpiração das plantas.

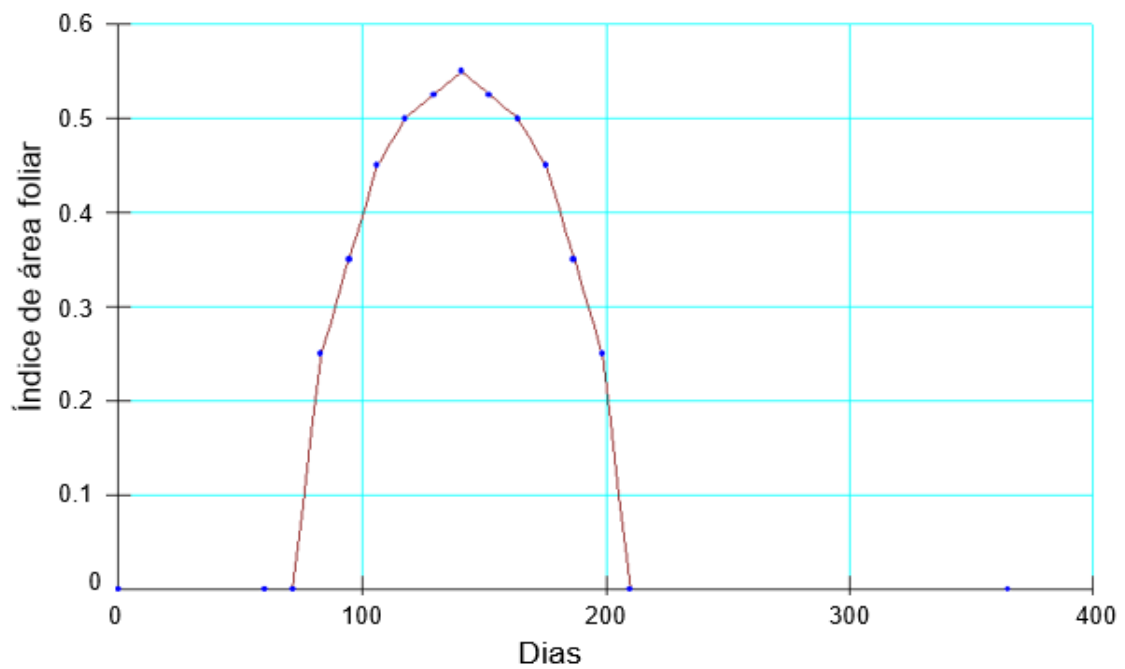
Para verificar a influência da vegetação no comportamento das dunas, duas condições de cobertura vegetal foram simuladas: nenhuma e ruim. Em que “nenhuma”, representa a duna em seu estado móvel, e “ruim” se refere à duna estabilizada com cobertura vegetal, do tipo rasteira. Um valor de IAF = 0,55 foi adotado para a condição “ruim”, sendo equivalente à área coberta pelas folhas em um perímetro de 1 x 1 metro. A Figura 23 mostra a obtenção do valor de IAF pelo programa AutoCAD, sendo o preenchimento na cor azul correspondente à área coberta pelas folhas.

Figura 23 – Obtenção do IAF do solo com vegetação por meio do software AutoCAD



Fonte: autora.

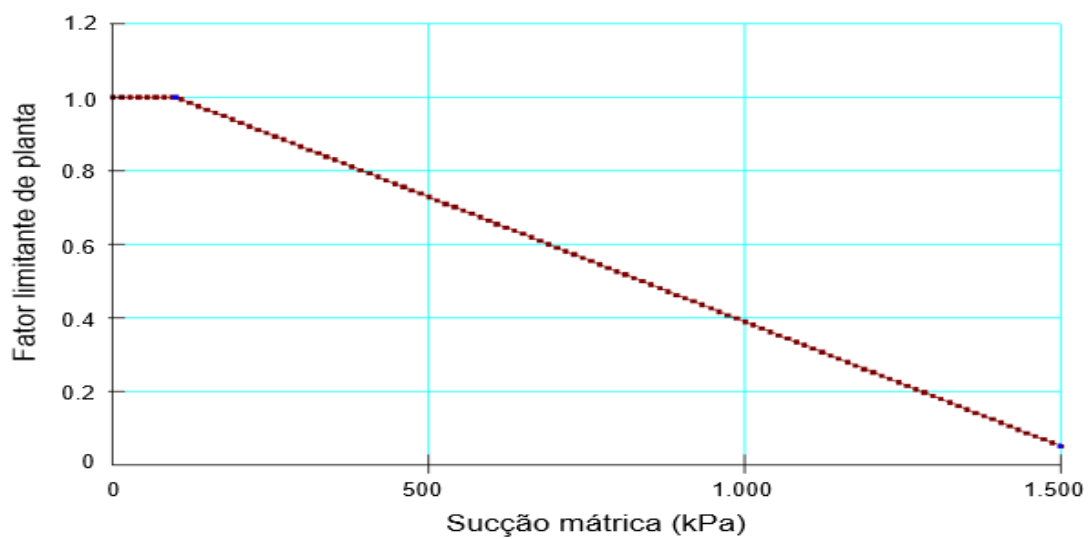
Figura 24 – Evolução do Índice de Área Foliar com o decorrer do tempo gerada no modelo



Fonte: autora.

O parâmetro Umidade Limite de Planta foi atribuído em função da sucção, e para o comportamento de crescimento radicular, foi considerado que no período de um ano, as raízes atingem profundidade de 15 cm.

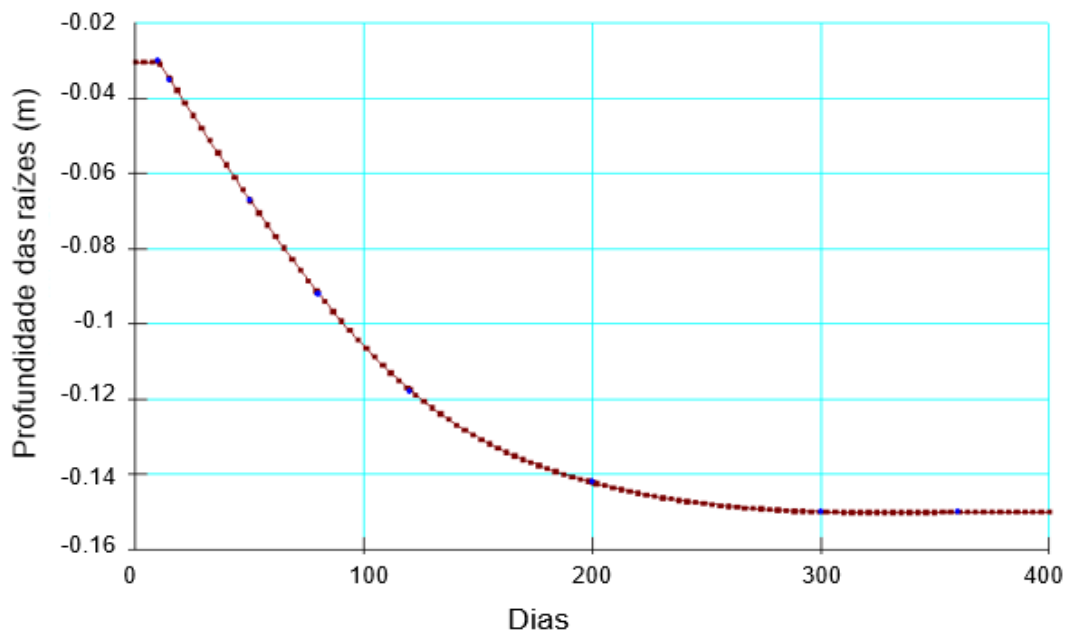
Figura 25 – Umidade limite de planta gerada no modelo



Fonte: autora.

O comportamento de crescimento radicular em função do tempo adotado é descrito na Figura 26. No período de um ano, foi considerado que as raízes atingem profundidade de 15 cm.

Figura 26 – Crescimento das raízes com o decorrer do tempo gerado no modelo



Fonte: autora.

Por fim, foi atribuída à base da camada de solo, uma condição de contorno de livre drenagem – ou de gradiente hidráulico unitário.

4.6.2 Métodos de simulação numérica

A análise numérica foi desenvolvida a partir de uma simulação de fluxo em regime Transiente Não Acoplado. Para isso, foi definida uma sucção inicial correspondente ao teor de umidade inicial do solo.

A partir dos dados da curva de retenção e de condutividade hidráulica saturada, foram estimados os valores da curva de condutividade hidráulica pelo método de van Genuchten (1994).

O Vadose/W determina o valor da evaporação real por meio de uma conexão entre a umidade e o estado de tensão de calor na superfície do terreno, considerando as condições climáticas presentes acima da superfície do mesmo.

Tradicionalmente, a modelagem de fluxo evaporativo tem se limitado a métodos que determinam o coeficiente de fluxo unitário de evaporação, baseado em um valor de Evaporação Potencial (EP), em que EP é função de uma complexa combinação de parâmetros, multiplicada pela diferença entre a pressão de vapor de saturação na superfície do terreno e aquela no ar acima do terreno. Esta forma aproximada se baseia no método amplamente utilizado de Penman (1948), o qual assume que a superfície do terreno está sempre saturada. Outros métodos, como Thornthwaite (1948), baseado na temperatura, e o método Priestly-Taylor (1972), baseado em energia, também determinam (EP), porém, igualmente considera que a superfície do terreno está saturada, o que nem sempre representa a situação real, conforme o que afirma Wilson (1990).

Por este motivo, o *software* VADOSE/W vale-se da solução de Penman-Wilson (WILSON, 1990), para o cálculo do fluxo evaporativo do solo sob as condições simuladas de interação atmosfera-planta-solo, conforme Equação 11:

$$ER = \frac{\Gamma Q_n + \eta E_a}{\Gamma + \frac{\eta}{h_s}} \quad (11)$$

Em que: ER é a evaporação real (mm/dia), Γ é a inclinação da curva pressão de vapor saturado versus temperatura, na temperatura média do ar (kPa/°C), η é a constante psicométrica (Pa/°C), E_a é a evapotranspiração do ar (mm/dia), h_s é a umidade relativa do ar.

O valor encontrado é, então, modificado pela Equação 12, de forma que uma parte da energia disponível seja dividida entre as plantas. O valor de evaporação modificado (ER_{mod}) é definido igual a zero, se o Índice de Área Foliar (IAF) for maior que 2,7, e é definido para seu valor total se o IAF for menor que 0,1 (TRATCH, 1996):

$$ER_{mod} = ER \{1 - (-0,21 + 0,7\sqrt{IAF})\} \quad (12)$$

Em seguida, determinou-se a contribuição da Transpiração Potencial (TP), sendo seu valor relacionado à Evaporação Potencial (EP), esta será igual ao valor da evaporação potencial se o IAF for maior que 2,7. O cálculo da transpiração potencial está expresso pela Equação 13.

$$TP = EP(-0,21+0,7\sqrt{IAF}) \quad (13)$$

O valor da Transpiração Potencial é referente à energia que agora está disponível para a planta. Se o solo estiver saturado, a quantidade total dessa energia será aplicada às raízes, de acordo com as funções de profundidade e formato da raiz. Entretanto, se o solo estiver parcialmente saturado, o valor de Transpiração Real (TR) é ainda mais reduzido, de acordo com a função de Umidade Limite de Planta inserida no *software*, conforme Equação 14.

$$TR = \frac{2TP}{R_T} \left(\frac{R_n}{R_T} \right) A_n \quad (14)$$

Em que: ER_{mod} é a Evaporação Real modificada pela contribuição vegetal (mm/dia); TR é a Transpiração Real (mm/dia); TP é a Transpiração Potencial (mm/dia); R_T é a Espessura total da zona radicular; R_n é a profundidade da raiz em análise; A_n é a Área de contribuição do nó analisado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização física do solo

Neste item serão apresentadas e discutidas algumas características físicas dos solos em estudo. Observa-se na Tabela 4, os dados parciais obtidos para umidade higroscópica (h), massa específica do solo (gs), densidade das partículas (δ), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), e granulometria para os dois tipos de solos, com e sem cobertura vegetal. Os valores de porosidade total da tabela foram obtidos pelo método da mesa de tensão.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos dados de massa específica aparente seca (gs em g/cm³), densidade real (δ), % retida de areia média e fina, porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) para solo de duna com e sem cobertura vegetal, na camada de 0 – 0,15 m

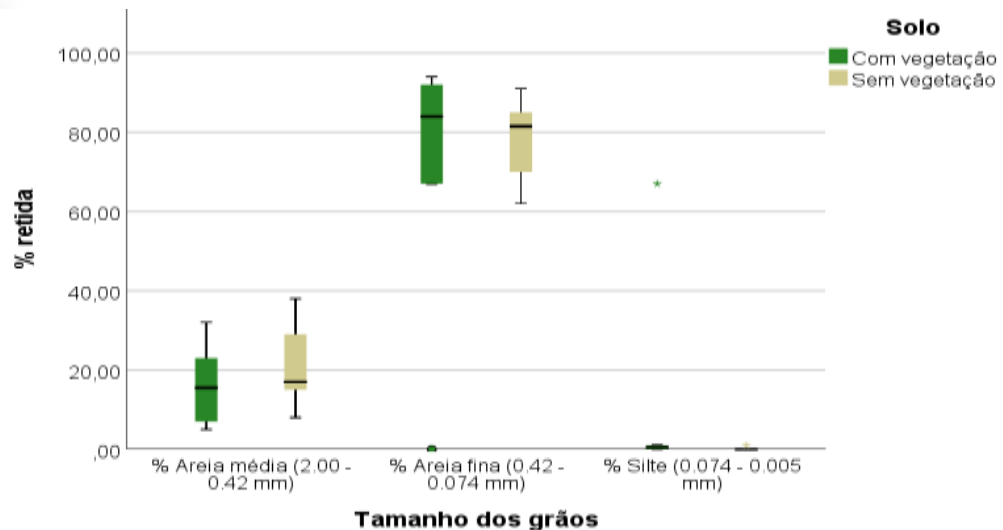
	Solo com vegetação							Solo sem vegetação						
	gs	δ	Areia média	Areia fina	Pt	Ma	Mi	gs	δ	Areia média	Areia fina	Pt	Ma	Mi
P1	1,71	2,75	5	50	0,36	0,27	0,05	1,71	2,55	15	85	0,28	0,23	0,05
P2	1,63	2,57	7	92	0,36	0,31	0,05	1,60	2,62	18	80	0,31	0,25	0,05
P3	1,60	2,60	8	92	0,36	0,31	0,05	1,66	2,56	8	91	0,32	0,26	0,05
P4	1,66	2,67	23	76	0,38	0,32	0,05	1,60	2,56	29	70	0,32	0,27	0,05
P5	1,49	2,73	23	67	0,38	0,32	0,06	1,65	2,60	16	83	0,32	0,27	0,06
P6	1,70	2,66	32	67	0,39	0,33	0,06	1,65	2,50	38	62	0,33	0,27	0,06
P7	-	-	-	-	0,39	0,33	0,06	-	-	-	-	0,33	0,27	0,06
P8	-	-	-	-	0,40	0,33	0,06	-	-	-	-	0,33	0,28	0,06
P9	-	-	-	-	0,40	0,34	0,06	-	-	-	-	0,33	0,28	0,06
P10	-	-	-	-	0,40	0,35	0,07	-	-	-	-	0,33	0,28	0,06
P11	-	-	-	-	0,43	0,35	0,08	-	-	-	-	0,35	0,29	0,06
P12	-	-	-	-	0,43	0,38	0,09	-	-	-	-	0,36	0,30	0,07
Nº dados	6	6	6	6	12	12	12	6	6	6	6	12	12	12
Média	1,63	2,66	16	74	0,39	0,33	0,06	1,64	2,57	21	79	0,33	0,27	0,06
Desv. Pad.	0,08	0,07	11	17	0,03	0,03	0,01	0,04	0,04	12	11	0,02	0,02	0,01
Coef. Var.	4,94	2,72	68,39	22,45	6,71	7,95	19,73	2,50	1,69	55,18	14,64	5,62	6,64	9,51
Assimetria	-	-0,10	0,35	-0,22	0,41	-0,19	1,09	0,41	-0,28	0,81	-0,69	-0,75	-0,92	-0,03
Curtose	1,17	-1,44	-2,00	-2,75	-0,39	1,13	0,59	0,00	-0,28	-0,13	-0,45	2,12	1,34	-1,55

Fonte: autora.

Analisando a composição granulométrica dos dois tipos de solo e o box-plot da Figura 27, verificou-se que as amostras são constituídas em sua maior parte por

areia média (5 a 38%) e areia fina (50 a 94%), sendo o percentual de finos quase nulo (0 a 1%).

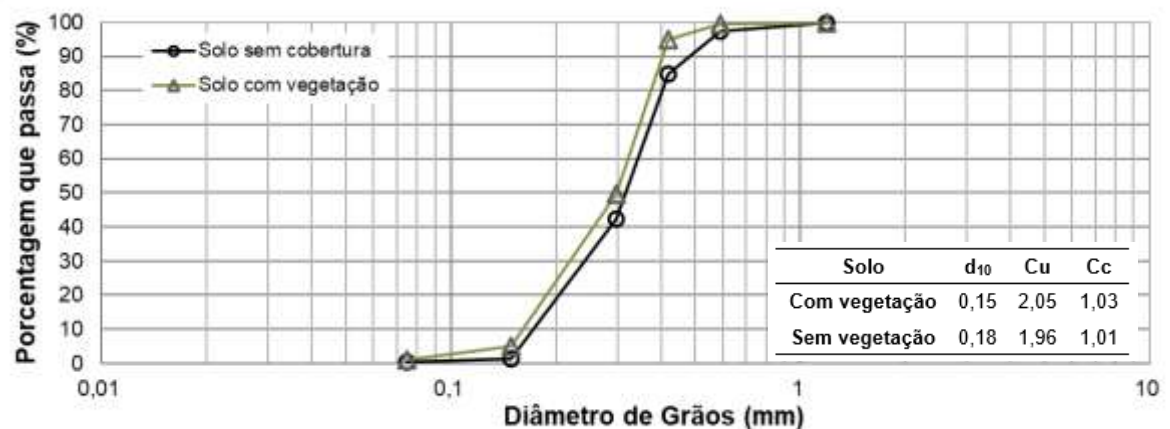
Figura 27 – Box-Plot da composição granulométrica para solos de dunas com e sem cobertura vegetal



Fonte: autora.

Para a construção da curva granulométrica apresentada na Figura 25, foi feita uma média dos valores passantes em todos os pontos dos solos, com e sem a presença de vegetação.

Figura 28 – Curva granulométrica, diâmetro efetivo (d_{10}), coeficiente de uniformidade (Cu) e de coeficiente de curvatura (Cc) para solos de dunas com e sem cobertura vegetal



Fonte: autora.

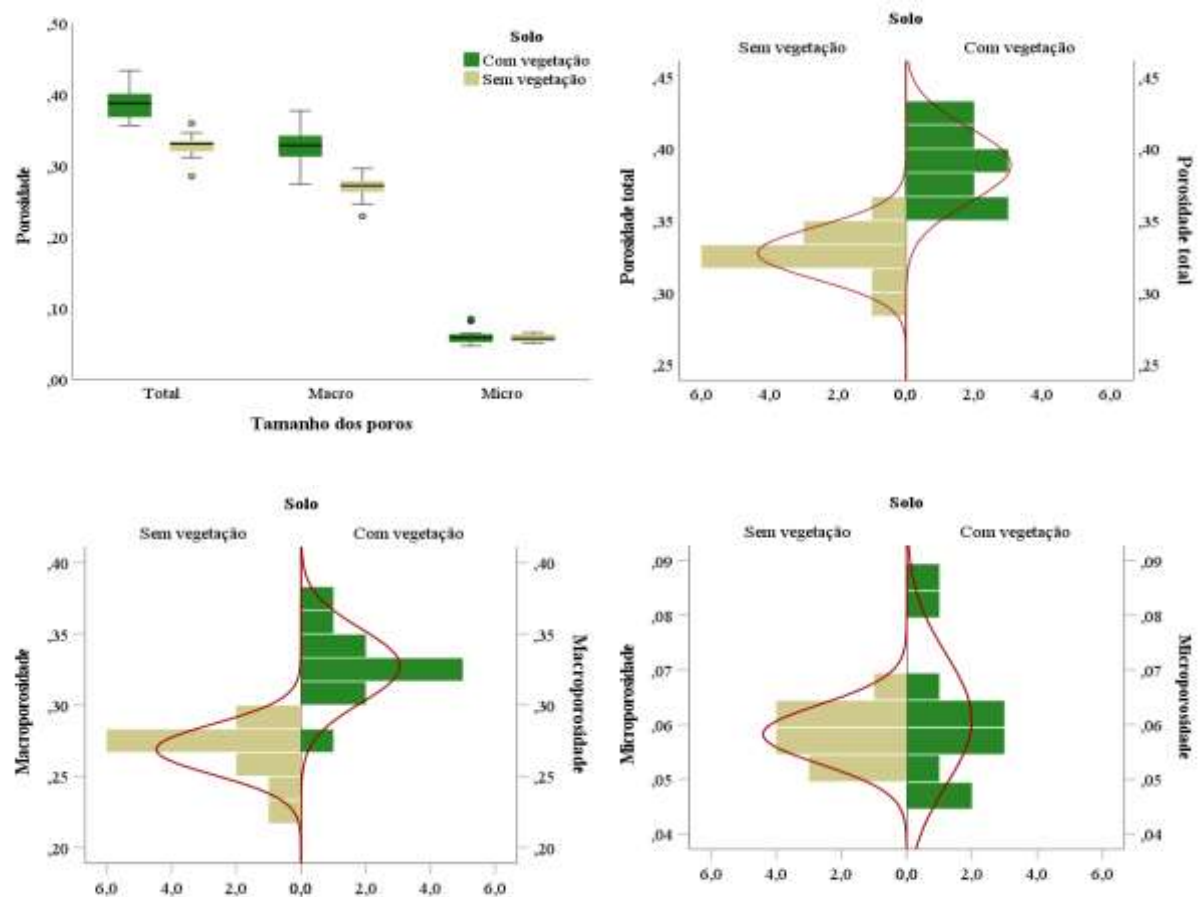
Valores baixos de C_u ($C_u < 5$) indicam que o solo possui grãos uniformes e a distribuição granulométrica é do tipo mal graduada. Assim, classificou-se o solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como SP (areia mal graduada) e pela classificação da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), como A-3 (areia fina).

A massa específica aparente apresentou praticamente o mesmo comportamento com a presença da vegetação, de 1,64 para 1,63 g/cm³. Wang *et al.* (2007), obteve resultados semelhantes ao analisar os efeitos da estabilização em dunas da China. Segundo o autor, o aumento no teor de matéria orgânica e a diminuição da densidade do solo, sinalizam uma melhoria na estrutura do solo, permitindo maior capacidade de retenção de água, maior disponibilidade de água e maior porosidade. A densidade de partículas, em geral, mostrou-se homogênea para ambos os solos, com pequenos desvios padrão e baixa variação em torno da média, comportamento esperado em função da uniformidade característica do solo. Resultados similares de densidade real para areias de praia uniformes, foram obtidos por Oliveira Filho (1987), Guimarães (2014), Goldbach (2016) e Costa *et al.* (2018), com valores variando entre 2,64 e 2,66.

Os parâmetros porosidade total e macroporosidade, apresentaram maiores valores no solo com vegetação (0,36 – 0,43), conforme se observa no diagrama box-plot na Figura 29, o que pode ser explicado pela presença de raízes no solo. A literatura indica que os parâmetros físicos do solo possuem comportamento normal (DAHIYA *et al.*, 1984), o que se confirmou pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk aplicado ao conjunto de valores de porosidade total, macro e microporosidade de cada solo ($p > 0,05$; $n = 12$), conforme se observa nos histogramas da Figura 29.

Realizou-se, também, o Teste *t* de Student ao nível de 5% de significância para comparação das médias dos valores de porosidade entre os dois grupos de solo, o qual confirmou que o solo com vegetação, possui porosidade total e macroporosidade estatisticamente maiores que os do solo sem cobertura ($p < 0,05$; $n = 22$). Esse resultado consiste em um reflexo dos valores dos macroporos do solo com vegetação (0,27 – 0,38), pois, segundo Almeida (2016), a morte e a retração das raízes criam espaços (macroporos), que permitem que haja uma maior taxa de infiltração na proximidade do sistema radicular.

Figura 29 – Diagrama de caixa (blox-plot) e histogramas de Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade do solo, com e sem cobertura vegetal



Fonte: autora.

5.2 Caracterização hidráulica do solo

Na Tabela 5, são relacionados os resultados da estatística descritiva, aplicada aos dados de condutividade hidráulica saturada (K_s), com e sem transformação logarítmica. Os valores de K_s obtidos, possuem a mesma ordem de grandeza (10^{-2}), enquadrando-se no intervalo estabelecido por Terzaghi *et al.* (1967), para areias com boa capacidade de drenagem.

O teste de Shapiro-Wilk mostrou que as condutividades normal e transformada do solo com vegetação, possuem comportamento normal ($p > 0,05$; $n = 6$), mas que os dados de condutividade do solo natural não seguem a mesma homogeneidade entre si.

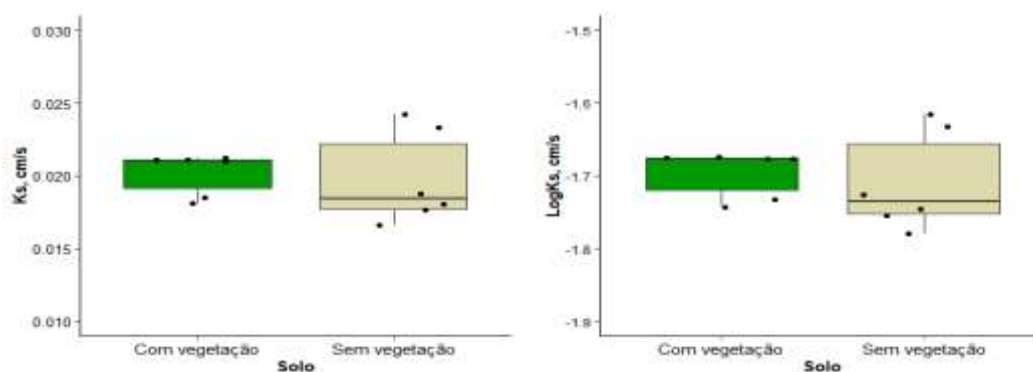
Tabela 5 – Estatísticas descritivas, valores medidos e modelados de condutividade hidráulica saturada (Ks) para os dois tipos de solo, com e sem cobertura vegetal, na camada de 0 – 0,15 m

		Ks	LogKs	Ks	LogKs	Beyer	Harleman	Hazen (orig.)	Hazen (mod.)	Kozeny-Carman
P1	Solo com palha	1,85E-02	-1,73			1,99,E-2	2,01,E-2	2,13,E-2	1,90,E-2	1,82,E-02
P2		1,81E-02	-1,74			2,02,E-2	2,04,E-2	2,09,E-2	1,92,E-2	1,71,E-02
P3		2,10E-02	-1,68			2,05,E-2	2,07,E-2	2,29,E-2	1,95,E-2	2,02,E-02
P4		2,11E-02	-1,68			2,02,E-2	2,05,E-2	2,18,E-2	1,93,E-2	1,85,E-02
P5		2,11E-02	-1,68			1,99,E-2	2,03,E-2	2,69,E-2	1,91,E-2	3,19,E-02
P6		2,12E-02	-1,67			1,99,E-2	2,04,E-2	2,01,E-2	1,92,E-2	1,59,E-02
P7	Solo sem palha			1,66E-02	-1,78	2,03,E-2	2,06,E-2	1,80,E-2	1,94,E-2	1,31,E-02
P8				1,76E-02	-1,76	2,04,E-2	2,07,E-2	2,28,E-2	1,95,E-2	2,01,E-02
P9				1,80E-02	-1,75	2,03,E-2	2,05,E-2	1,95,E-2	1,93,E-2	1,49,E-02
P10				2,42E-02	-1,62	2,01,E-2	2,05,E-2	2,10,E-2	1,93,E-2	1,72,E-02
P11				1,88E-02	-1,73	2,00,E-2	2,01,E-2	1,99,E-2	1,90,E-2	1,57,E-02
P12				2,33E-02	-1,63	2,03,E-2	2,11,E-2	1,93,E-2	1,98,E-2	1,43,E-02
Nº de dados		6	6	6	6	12	12	12	12	12
Média		2,02E-2	-1,70	1,97E-2	-1,71	2,02,E-2				
Desvio Padrão		1,46E-3	3,24E-2	3,19E-3	6,80E-2					
Coef.de var.		7,26%	-1,91%	16,17%	-3,98%	18%	20%	25%	13%	7%
Assimetria		-0,99	-1,00	0,79	0,71					
Curtose		-0,05	-1,65	-1,65	-1,68					

Fonte: autora.

Na Figura 30, observa-se que ambos os solos apresentaram dados com a mesma ordem de grandeza, e em média, o solo com vegetação possui maiores valores de Ks que o solo com vegetação, o que pode ser reflexo do aumento na macroporosidade. As características dos poros nos solos, bem como suas dimensões, distribuição e interconexões, são conhecidas por impactar Ks.

Figura 30 – Condutividade hidráulica saturada (Ks) e transformada (LogKs) para os dois tipos de solos, com e sem cobertura vegetal, na camada de 0 – 0,15 m

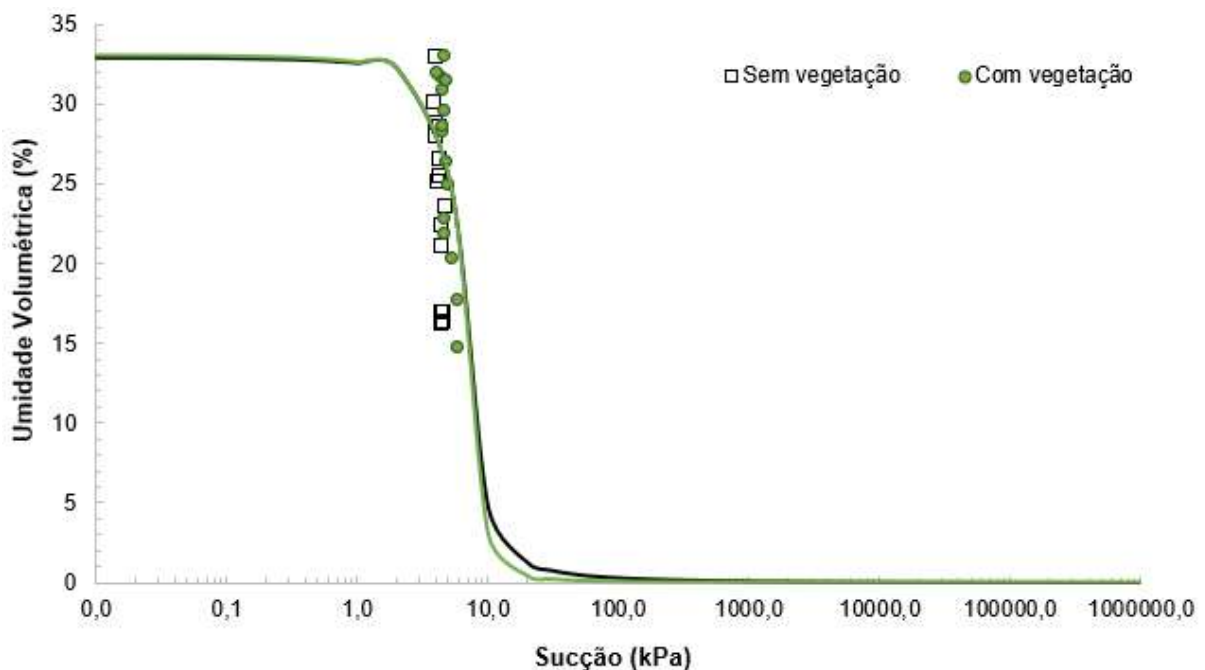


Fonte: autora.

O fato de a amostragem ter sido realizada durante o período de estiagem (julho-dezembro) pode ter relação com esse comportamento, pois a decomposição das raízes pode levar à formação de caminhos preferenciais que aumentam o K_s do solo (MITCHELL *et al.*, 1995; GHESTEM *et al.*, 2011). Já o solo sem vegetação apresenta maior amplitude de resultados e regiões com K_s maior, resultados que podem ser creditados à heterogeneidade dos locais de coleta.

Foram obtidas as curvas de retenção para o solo com e sem a presença de vegetação, as quais foram expressas em termos de sucção e umidade volumétrica. Na Figura 31 são apresentados os pontos experimentais encontrados no ensaio. As curvas foram obtidas utilizando-se as equações de ajuste propostas por Fredlund e Xing (1994).

Figura 31 – Curva de retenção de água do solo com e sem vegetação



Fonte: autora.

Os parâmetros de ajuste da equação de Fredlund e Xing (1994), utilizados para o solo com palha, foram: $a = 6,4$ kPa; $m = 2,3$, $n = 5,7$; $\theta_s = 33,1\%$ e $\psi_{res} = 6$ kPa. Para o solo sem palha os parâmetros, foram: $a = 5,9$ kPa; $m = 1,6$, $n = 5,9$; $\theta_s = 32,9\%$ e $\psi_{res} = 8$ kPa. As curvas foram semelhantes para as duas áreas com e sem

vegetação, e tendem a apresentar um formato mais próximo do unimodal, típico em solos arenosos, o que representa homogeneidade na distribuição dos poros.

Segundo Morel-Seytoux *et al.* (1996), os parâmetros α e ψ_b refletem a capacidade de retenção de água do solo e, portanto, espera-se que apresentem alguma correlação.

O parâmetro α aumentou com a adição das raízes da vegetação, 7,8% maior que o α do solo natural. Por outro lado, o parâmetro ψ_{res} diminuiu com a adição de vegetação, 25% menor que o ψ_{res} do solo natural. Portanto, evidencia-se que a presença de vegetação impacta os valores de α e ψ_b , sendo inversamente proporcionais.

Já o parâmetro n , manteve-se praticamente uniforme. Lenhard *et al.* (1989), afirma que o valor de n depende da combinação planta-tipo de solo em que, normalmente, valores baixos são indicativos de solos com poros de tamanho variados, e n maiores indicam poros mais uniformes.

O parâmetro θ_s que representa a umidade volumétrica na saturação foi levemente maior para o solo com vegetação, o que de alguma forma reflete a diferença entre a macroporosidade dos dois solos, já que quanto maior for o tamanho dos poros, mais eles serão preenchidos por água quando saturados.

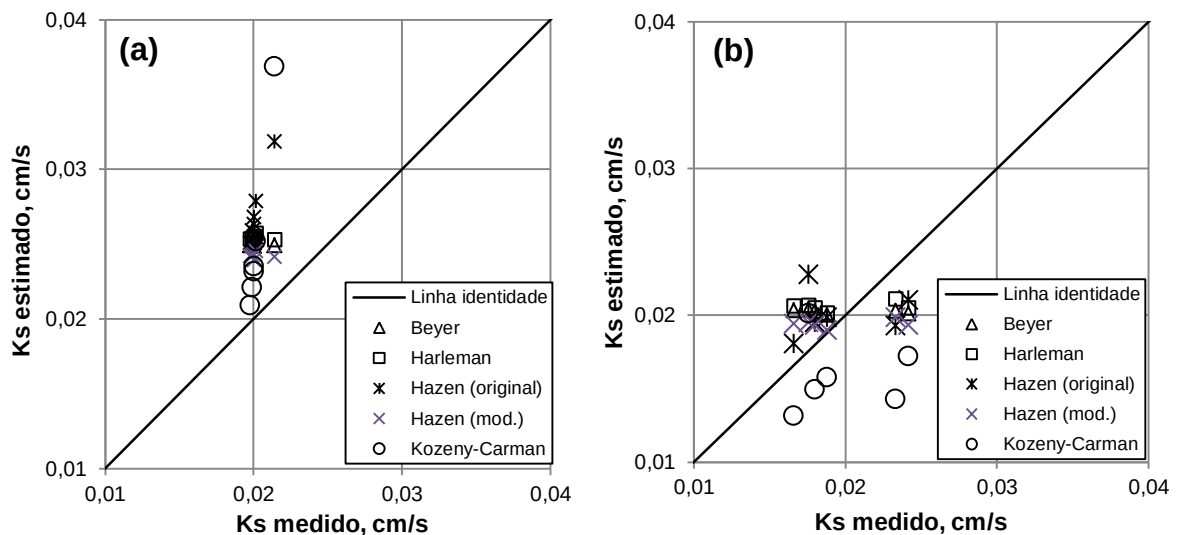
5.3 Estimativa da condutividade hidráulica saturada por equações empíricas

Na Figura 32, são comparados os valores estimados e medidos da condutividade hidráulica saturada do solo das áreas com e sem vegetação, como forma de validação das equações ajustadas por Rosas *et al.* (2014), a partir dos mesmos parâmetros β utilizados pelo autor. Para o solo sem vegetação, observa-se que todos os modelos, exceto o de Kozeny-Carman, apresentaram valores próximos aos medidos. No campo da engenharia geotécnica, existe um consenso de que a equação Kozeny-Carman só funciona bem com areias, e não com argilas.

Na comparação entre os dois tipos de solos, com e sem a presença de vegetação, percebe-se que ambos apresentaram tendências diferentes. Na área com vegetação a tendência foi de superestimativa de valores para todas as equações, pois os pontos se localizaram todos acima da linha identidade. Já para a

área sem vegetação, o resultado dos diferentes modelos não apresentou tendência, além dos pontos encontrarem-se mais próximos da linha identidade.

Figura 32 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos pelo método direto e pelo método indireto para o solo das áreas com vegetação (a) e sem vegetação (b), a linha contínua representa relação de igualdade perfeita



Fonte: autora.

Na Figura 33, são comparados os valores estimados e medidos da condutividade hidráulica saturada para a totalidade das amostras de solo, com e sem vegetação, e na Tabela 6, temos o cálculo do erro para cada ponto medido, por equação. Com base nos valores de erro apresentados na Tabela 6, verifica-se que as equações empíricas que apresentaram o menor erro foram as de Hazen (modificada) e Beyer.

A fórmula de Hazen foi originalmente desenvolvida para determinação da condutividade hidráulica de areia uniformemente graduada, mas também é útil para areia fina, desde que o sedimento tenha um coeficiente de uniformidade menor que 5 e tamanho de grão efetivo entre 0,1 e 3 mm. Já a fórmula desenvolvida por Beyer, apesar de não considerar a porosidade, é a mais útil para materiais mal graduados com distribuições heterogêneas, com coeficiente de uniformidade entre 1 e 20 e tamanho de grão efetivo entre 0,06 mm e 0,6 mm (ODONG, 2007).

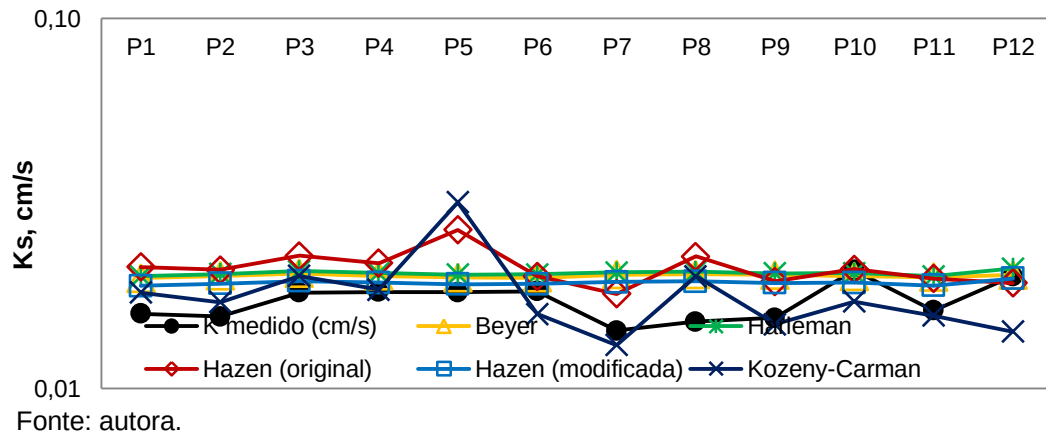
Tabela 6 – Diferença relativa entre os valores medidos e calculados em cada modelo empírico

Beyer			Harleman			Hazen		
K _S MEDIDO (m/s)	K _S CALC (m/s)	Diferença Relativa (%)	K _S MEDIDO (m/s)	K _S CALC (m/s)	Diferença Relativa (%)	K _S MEDIDO (m/s)	K _S CALC (m/s)	Diferença Relativa (%)
1,50,E-2	1,99,E-2	32	1,50,E-2	2,01,E-2	34	1,50,E-2	2,13,E-2	42
1,49,E-2	2,02,E-2	36	1,49,E-2	2,04,E-2	37	1,49,E-2	2,09,E-2	41
1,52,E-2	2,05,E-2	35	1,52,E-2	2,07,E-2	37	1,52,E-2	2,29,E-2	51
1,50,E-2	2,02,E-2	34	1,50,E-2	2,05,E-2	36	1,50,E-2	2,18,E-2	45
1,64,E-2	1,99,E-2	21	1,64,E-2	2,03,E-2	24	1,64,E-2	2,69,E-2	64
1,48,E-2	1,99,E-2	35	1,48,E-2	2,04,E-2	38	1,48,E-2	2,01,E-2	36
1,66,E-2	2,03,E-2	23	1,66,E-2	2,06,E-2	24	1,66,E-2	1,80,E-2	9
1,76,E-2	2,04,E-2	16	1,76,E-2	2,07,E-2	18	1,76,E-2	2,28,E-2	30
1,80,E-2	2,03,E-2	13	1,80,E-2	2,05,E-2	14	1,80,E-2	1,95,E-2	8
2,42,E-2	2,01,E-2	17	2,42,E-2	2,05,E-2	15	2,42,E-2	2,10,E-2	13
1,88,E-2	2,00,E-2	6	1,88,E-2	2,01,E-2	7	1,88,E-2	1,99,E-2	6
2,33,E-2	2,03,E-2	13	2,33,E-2	2,11,E-2	10	2,33,E-2	1,93,E-2	17
Menor erro		6	Menor erro		7	Menor erro		6
Maior erro		36	Maior erro		38	Maior erro		64

Hazen (mod.)			Kozeny-Carman		
K _S MEDIDO (m/s)	K _S CALC (m/s)	Diferença Relativa (%)	K _S MEDIDO (m/s)	K _S CALC (m/s)	Diferença Relativa (%)
1,50,E-2	1,90,E-2	26	1,50,E-2	1,82,E-2	21
1,49,E-2	1,92,E-2	29	1,49,E-2	1,71,E-2	15
1,52,E-2	1,95,E-2	29	1,52,E-2	2,02,E-2	33
1,50,E-2	1,93,E-2	29	1,50,E-2	1,85,E-2	23
1,64,E-2	1,91,E-2	17	1,64,E-2	3,19,E-2	94
1,48,E-2	1,92,E-2	30	1,48,E-2	1,59,E-2	8
1,66,E-2	1,94,E-2	17	1,66,E-2	1,31,E-2	21
1,76,E-2	1,95,E-2	11	1,76,E-2	2,01,E-2	15
1,80,E-2	1,93,E-2	7	1,80,E-2	1,49,E-2	17
2,42,E-2	1,93,E-2	20	2,42,E-2	1,72,E-2	29
1,88,E-2	1,90,E-2	1	1,88,E-2	1,57,E-2	16
2,33,E-2	1,98,E-2	15	2,33,E-2	1,43,E-2	39
Menor erro		1	Menor erro		8
Maior erro		30	Maior erro		94

Fonte: autora.

Figura 33 – Condutividade hidráulica estimada, utilizando os 5 métodos empíricos em todas as amostras de solo em comparação com medições de condutividade hidráulica medidas



5.4 Modelagem no programa Vadose W

Os resultados para o balanço hídrico, após processamento do modelo, mostraram-se incoerentes com os valores típicos de uma região de dunas. Isso aconteceu provavelmente devido a problemas de convergência, pelo fato de o solo ser arenoso.

O próprio manual do programa Vadose W (GEO-SLOPE, 2014, p. 147), alerta que “funções de condutividade hidráulicas muito íngremes podem criar dificuldades com a convergência”. Na verdade, pode não ser possível obter convergência quando a função de condutividade hidráulica se aproxima de uma linha vertical, que é o caso do solo em estudo. A solução tenderá a divergir, ao invés de convergir e oscilar entre duas soluções extremas, representadas pelas extremidades da função de condutividade hidráulica.

6 CONCLUSÃO

Continua a ser um desafio científico descrever em detalhes o complexo espaço contínuo do solo. No entanto, podemos concluir que as características dos poros do solo, são fatores que podem influenciar K_s . Além disso, nossos resultados mostraram que o desenvolvimento de vegetação, também é um fator que altera sutilmente as propriedades hidráulicas dos solos de dunas, aqui representadas por K_s e pela curva de retenção de água.

Através da caracterização das propriedades físicas dos solos estudados, identificamos que ambos possuem características semelhantes de densidade e granulometria.

Por meio do teste de comparação de médias, confirmou-se que o solo com vegetação, possui porosidade total e macroporosidade estatisticamente maiores que o solo sem cobertura.

As curvas de retenção de água foram semelhantes para as duas áreas, e tendem a apresentar um formato mais próximo do unimodal, típico em solos arenosos, o que representa homogeneidade na distribuição dos poros. O parâmetro θ_s , que representa a umidade volumétrica na saturação, foi levemente maior para o solo com vegetação, o que de alguma forma reflete a diferença entre a macroporosidade dos dois solos, já que quanto maior for o tamanho dos poros, mais serão preenchidos por água quando saturados.

A condutividade hidráulica saturada (normal e transformada), comparando ambos os solos, também apresentou resultados semelhantes; porém, os valores médios para o solo com vegetação foram maiores que os do solo sem vegetação. Já o solo sem vegetação apresenta maior amplitude de resultados e regiões com K_s maior, resultados que podem ser creditados à heterogeneidade dos locais de coleta.

Dentre as equações empíricas de estimativa de K_s avaliadas, os modelos de Hazen (modificado) e de Beyer foram os que mais aproximaram-se dos valores de medidos.

Por fim, os resultados para o balanço hídrico após processamento do modelo no software Vadose/W, mostraram-se incoerentes com os valores típicos de uma região de dunas. Isso aconteceu, provavelmente devido à problemas de convergência, pelo fato de o solo ser arenoso.

REFERÊNCIAS

ADEKALU, K. O. *et al.* Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. **Bioresource technology**, v. 98, n. 4, p. 912-917, 2007.

ALMEIDA, C. L. **Relações solo-planta-atmosfera em caatinga preservada: o caso da bacia experimental de Aiuaba**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará. 130 f.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D7181: **Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils**. 2011.

ANDRY, H. *et al.* Water retention, hydraulic conductivity of hydrophilic polymers in sandy soil as affected by temperature and water quality. 2009. **Journal of Hydrology** 373, 177-183.

ARAÚJO, A. O. **Avaliação de propriedades físicas dos solos e da macrofauna edáfica em áreas submetidas a manejo florestal de vegetação nativa na Chapada do Araripe**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará. 76 f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante-Método de ensaio. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2016.

BARBOSA, L. M.; BARBOSA, A. E. M. **Estágios de alteração do campo de dunas costeiras em Fortaleza, Ceará**. 2006. In: 1º Simpósio Brasileiro sobre Dunas Costeiras/ Simpósio Internacional. Fortaleza, CE.

BEZERRA, E. C. *et al.* **Balanço hídrico**. 1995. Fortaleza: Atlas do Ceará, p. 14-23.

BEYER, W. Zur bestimmung der wasserdurchlässigkeit von kiesen und sanden aus der kornverteilungskurve. **Wasserwirtschaft Wassertechnik**, v. 14, n. 6, p. 165-168, 1964.

BICALHO, K. *et al.* Determination of water hydraulic conductivity functions of unsaturated soils. In: **3rd Asian Conference on Unsaturated Soils**, China. 2007.

BIGGAR, J. W. NIELSEN, D. R. **Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil**. 1976. Water Resources Research 12, 78-84.

BISPO, S. C. **Análise da variação morfológica das dunas costeiras ativas da reserva biológica de Santa Izabel (SE) no período de 1955-2005.** 2008.

BISPO, S. C. **Análise da variação morfológica das dunas costeiras ativas da reserva biológica de Santa Izabel (SE) no período de 1955-2005.** 2008.

Dissertação (Mestrado em Ciências – Geologia) — Universidade Estadual de Feira de Santana. 92 f.

BOWERS, J. E. The plant ecology of inland dunes in western North America. **Journal of Arid Environments**, v. 5, n. 3, p. 199-220, 1982.

BRANDÃO, R. de L. *et al.* **Diagnostico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza.** Fortaleza: Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), 1995. 88 p. (Projeto SINFOR).

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media.** 1964. Colorado State University, Hydrology Paper, Nº 3, p. 27.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Properties of porous media affecting fluid flow. **Journal of the irrigation and drainage division**, v. 92, n. 2, p. 61-88, 1966.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico.** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), São Paulo, 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 5ª edição. Rio de Janeiro. Livros técnicos e científicos, 1981.

CARMAN, P. C. Flow of gases through porous media. **Butterworths Scientific Publications**, London, 1956.

CARMAN, Philip Crosbie. Fluid flow through granular beds. **Trans. Inst. Chem. Eng.**, v. 15, p. 150-166, 1937.

CARVALHO, A. M. **Mapeamento Geológico, História Evolutiva e Avaliação Ambiental da Região de Aquiraz-Ce.** 1994. Dissertação de Mestrado – UFPE, Recife.

CASTELO BRANCO, J. L. **Integração de dados geofísicos (tomografia elétrica 2d), hidrogeológicos e aerofotogramétricos aplicados ao estudo das águas subterrâneas da Praia de Porto das Dunas, Aquiraz (CE).** 2018. Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geologia, Fortaleza. 151 f.

CASTRO, J. W. A. **Geomorfologia do sistema sedimentar eólico de Paracuru.** 2001. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 227 f.

CAVALCANTE, I. N. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada de recursos hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza Estado do Ceará.** 1998. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 182 f.

CHEN, N. *et al.* Ecohydrological effects of biological soil crust on the vegetation dynamics of restoration in a dryland ecosystem. **Journal of Hydrology**, v. 563, p. 1068-1077, 2018.

CLAUDINO-SALES, V. **Cenários litorâneos-Lagoa do Papicu: natureza e ambiente na cidade de Fortaleza, CE.** Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993. 349 p.

COOK, P. G. *et al.* Spatial variability of groundwater recharge in a semiarid region. 1989. **Journal of Hydrology** **111**, 195-212.

COSTA, M. D. *et al.* **Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações.** 2018. Engenharia Sanitária e Ambiental **23**, 77-90.

DAHIYA, I.S. *et al.* Soil spatial variability: a review. 1984. **International Journal of Tropical Agriculture** **11**, 1-102.

DAVIES, J.L. **Geographical Variation in Coastal Development.** 1972. Longman Group Ltd., New York, NY. 204 pp.

DE OLIVEIRA, C. M. M. **Avaliação de mecanismos de ruptura associados aos escorregamentos da Prainha e Condomínio em Nova Friburgo.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Técnico Científico – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. 105 f.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME 213: **Determinação do teor de umidade.** 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME 80: **Solos – Análise granulométrica por peneiramento.** 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME 93: **Solos – Determinação da densidade real.** 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME 55: **Areia – Determinação de impurezas orgânicas.** 1995.

DINGMAN, S. L. (2015). **Physical Hydrology** - Third Edition. Long Grove, Illinois. Waveland Press, Inc., 657 p.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água.** 2005. Porto Alegre/RS: EST Edições. 189p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. 3 ed. Brasília – DF: Embrapa. 2018. E-book.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA . **Métodos Combinados para Contenção do Processo Erosivo Eólico na Praia do Serviluz em Fortaleza, Ceará**. 22 p. 2006.

EVANS, C. M. *et al.* **Modeling Subsurface Hydrology in Floodplains**. 2018. *Water Resources Research* 54, 1428–1459.

FALCÃO SOBRINHO, J. A modificação do relevo de um campo de dunas (CE). 2004. In: **V Simpósio Nacional de Geomorfologia**. UFMS – RS.

FARIAS, T. R. L. *et al.* (2019). Unpaved rural roads as source areas of sediment in a watershed of the Brazilian semi-arid region. *International Journal of Sediment Research*, 34(5), 475-485.

FERNANDEZ, G. B. *et al.* Dunas Frontais no Estado do Rio de Janeiro: Ocorrência, Morfologia e Dinâmica. 2012. In: **IX Simpósio Nacional de Geomorfologia – Rio de Janeiro**.

FREDLUND, D. G. XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. 1994. **Canadian Geotechnical Journal** 31, nº 4, 521-532.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability functions for insaturated soil using the soil-water characteristics curve. 1994. **Canadian Geotechnical Journal** 31, nº 4, 533-546.

FREDLUND, D. G.; XING, Anqing; HUANG, Shangyan. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533-546, 1994.

FREDLUND, Murray D. *et al.* Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties. In: **Proc., 3rd Brazilian Symp. on Unsaturated Soils**. Rio de Janeiro, 1997. p. 13-23.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. **Groundwater**. 1979.

FRYBERGER, S. G.; DEAN, G. Dune forms and wind regime. In: **A study of global sand seas**. US Government Printing Office Washington, 1979. p. 137-169.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Research** 31, 514–529.

FUNCEME. **Sistemas meteorológicos causadores de chuva na região Nordeste do Brasil**. 2002. Disponível em:

<http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/entender/entender2.htm> Acesso em: 27 ago. 2020.

GEO-SLOPE. **Vadose Zone Modeling with VADOSE/W**. 2014. 242 p.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer 17.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers.** User's Guide. 2019. New York: Golden Software.

GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. J.; GORELIK, S. M. **Effective groundwater model parameter values:** Influence of spatial variability of hydraulic conductivity, leakance, and recharge. 1989. *Water Resources Research* 25 (3), 405-419.

GORAYEB, A. *et al.* **Impactos ambientais e propostas de manejo sustentável para a planície flúvio-marinha do rio Pacoti – Fortaleza/Ceará.** 2005. *Sociedade & Natureza* 17, 143-152, Uberlândia.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Características e propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos e análise dos processos erosivos. 1996. **Anuário do Instituto de Geociências.** V. 19, p 93-114.

GREEN, T.; AHUJA, L.; BENJAMIN, J. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 116, n. 1-2, p. 3-27, 2003.

GOLDBACH, R. **Caracterização geotécnica da areia da praia de Copacabana a partir de ensaios de campo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2016. 208 p.

GOMES, M. *et al.*. Analysis of the Levels of Alteration of Aquifers Caused by the Installation of Wind Farms on Dunes on the Coast of Ceará, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, 2019.

GHESTEM M. *et al.* The Influence of Plant Root Systems on Subsurface Flow: Implications for Slope Stability, **BioScience**, v. 61, p. 869-879, 2011.

GUIMARÃES, M. **Modelagem Centrífuga da Movimentação Lateral de Dutos em Areia.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.

GUSMÃO, J. A. Solos de formação geológica o uso na engenharia. 2ª ed. Recife: **Ed. Universitária da UFPE.** Cap. 6, pág. 92-94. 2008.

HARLEMAN, Donald RF. Dispersion permeability correlation in porous media. **J. of Hydraulic, Div., Proc. Of ASCE**, p. 67-85, 1963.

HAZEN, Allen. Discussion: Dams on sand foundations. **Transactions, American Society of Civil Engineers**, v. 73, n. 11, 1911.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics.** 2004. Califónia-USA, Elsevier Science. 511p.

HOYOS, E. M. **Influência dos Parâmetros Hidrológicos e Geotécnicos na Estabilidade de Taludes.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília. 124 p.

IBM C. **IBM SPSS Statistics for Windows, Versão 20.0.** 2011. Armonk, Nova York: IBM Corp.

JÁČKA, L. *et al.* A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. 2014. **Geoderma** 219-200, 82-88.

JÚNIOR, E. A. V. **Análise de confiabilidade de taludes em condições saturadas - não saturadas via análise limite no espaço cônico quadrático.** 2013. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

KOZENY, Josef. Das wasser im boden. Grundwasserbewegung. In: **Hydraulik.** Springer, Vienna, 1953. p. 380-445.

KOZENY, Josef. Über kapillare leitung der wasser in boden. **Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I**, v. 136, p. 271-306, 1927.

KOOREVAAR, P. *et al.* **Elements of soil physics.** 1983. Development of soil science 13, Amsterdam, Elsevier, 228p.

KRESIC, N. **Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling.** Text book, 307p. 1996.

LEONG, Eng Choon; HE, Liangcai; RAHARDJO, Harianto. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 3, p. 322-333, 2002.

LEME, R. F. Influência da sucção mátrica nas condições de fluxo e estabilidade de taludes de barragem pesqueiro. 2009. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 150 p.

LENHARD, R. J. *et al.* On the correspondence between Brooks-Corey and van Genuchten models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 115, n. 4, p. 744-751, 1989.

LI, S. *et al.* **Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil.** 2018. Soil and Tillage Research 183, 100-108.

LI, X. R. *et al.* Changes in soil and vegetation following stabilisation of dunes in the southeastern fringe of the Tengger Desert, China. **Plant and Soil**, v. 300, n. 1, p. 221-231, 2007.

LIU, Y. *et al.* Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in revegetated areas of the Tengger Desert, China. **Applied soil ecology**, v. 80, p. 6-14, 2014.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** 2005. Piracicaba, SP, EdUSP. 335 p.

LOPEZ, O. M. *et al.* **Statistical comparisons of grain size characteristics, hydraulic conductivity, and porosity of barchan desert dunes to coastal dunes.** 2020. *Aeolian Research* 43.

LUNA, M. C. M. **Simulações de campos de dunas sob a influência do crescimento de vegetação e da exposição do nível de água do terreno.** 2010. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 131 p.

MAIA, L. P. *et al.* Gestão de dunas costeiras e conflitos de usos nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte-Nordeste do Brasil. In: **La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa.** Societat d'Història Natural de les Balears, 2013. p. 257-270.

MAGALHÃES, Danilo Carneiro. **Evolução costeira controlada por promontório no litoral de Paracuru–Ceará.** 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 97 f.

MARINO, T. *et al.* Variações granulométricas ao longo da costa da região metropolitana de Fortaleza, Ceará, Brasil. 2013. **Revista da Gestão Costeira Integrada** 13, 267-282.

MARINO, T. **Análise integrada dos aspectos geoambientais e da dinâmica costeira de médio e curto período da planície litorânea entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Ceará, Brasil.** 2014. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 274 f.

MARQUES, J. D. O. **Horizontes pedogenéticos e sua relação com as camadas hidráulicas do solo.** 2000. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 101 f.

MENDONÇA, L. A. *et al.* Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, p. 89-98, 2009.

MIRANDA, J. P. L. **Propriedades físico-hídricas de um solo submetido a cultivos perenes e a pousio em ambiente agrícola serrano-Bom Jardim (RJ).** Dissertação de Mestrado em Geografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008. 123 p.

MITCHELL A. R. *et al.* Effect of root systems on preferential flow in swelling soil. **Soil Sci. Plant Anal.**, 26 (15–16), p. 2655-2666. 1995.

MORAIS, J. O. *et al.* **Erosão e progradação do litoral brasileiro/CE.** 1. 2006. ed. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente (MMA), v. 1.

MORVAN, X., *et al.* (2014). Effect of ground-cover type on surface runoff and subsequent soil erosion in C champagne vineyards in France. **Soil Use and Management**, 30(3), 372-381.

MOREL-SEYTOUX, H. J.; *et al.*. Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soil characteristics: Preserving the effective capillary drive. **Water Resources Research**, 32(5), p. 1251-1258, 1996.

NASCIMENTO, G. S. **As dunas do litoral leste de Aquiraz/CE: evolução, dinâmica e gestão ambiental**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models- Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrologic Engineering**, nº1 10, p. 282-290, 1970.

NIELSEN, D. R. *et al.* **Spatial variability of field measured soil water properties**. 1973. *Hilgardia* 42, 215-259.

ODONG, J. Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. **Journal of American Science**, v. 3, n. 3, p. 54-60, 2007.

OLIVEIRA FILHO, W. L. **Considerações Sobre Ensaios Triaxiais em Areias**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1987. 266 p.

PACHECO, P. G. M. **Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre**. 2005. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. PUC-RIO, Rio de Janeiro/RJ, 129p.

PAES, A. T. **Análise univariada e multivariada**. 2010. Einstein–Educação continuada em Saúde, 8, 1-2.

PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass**. Proceeding Royal Society, London, v.193, p.120-143. 1948.

PINHEIRO, M. V. A. **Evolução geoambiental e geohistórica das dunas costeiras do município de Fortaleza, CE**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 192 f.

PMPA/IPH, Prefeitura Municipal de Porto Alegre/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana**. Vol. VI. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

PORTO, F. S. **Variabilidade morfossedimentar do sistema praia duna do largo do Balneário Cassino – RS no período de 2006 a 2016**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 99 f.

PORTZ, L. **Gestão de praias e dunas: aplicações para a região costeira do Rio Grande do Sul**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 188 f.

PORTZ, L. *et al.* **Gestão de dunas costeiras: o uso de sistema de informações geográficas (SIG) na implantação de planos de gestão no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil.** 2014. *RGC/* [online]. 2014, vol.14, n.3, pp.517-534.

PRASAD, K. L.; RASTOGI, A. K. Estimating net aquifer recharge and zonal hydraulic conductivity values for Mahi Right Bank Canal project area, India by genetic algorithm. 2001. **Journal of. Hydrology** **243**, 149–161.

PRAVEDNY, G. H. Design and selection of grain size composition of filter beds for the transition zones of large dams. **Energia, Moscow**, 1966.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. **On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters.** *Monthly Weather Review*, v. 100, n. 2, p.81-92, 1972.

PYE, Kenneth; TSOAR, Haim. **Aeolian sand and sand dunes.** **Springer Science & Business Media**, 2008.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** 2020. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

REBÊLO, L. P.; BRITO, P. O. **A importância das dunas frontais na avaliação da evolução da linha de costa - o caso da praia da Manta Rota.** 2004. In: Encontro de Professores de Geociências do Algarve Vila Real de Santo António.

RIBEIRO, J. A. *et al.* Aspectos geológicos e hidrogeológicos da faixa costeira leste da Região Metropolitana de Fortaleza – CE. 2000. **Revista Águas Subterrâneas** 184.

RICHARDS, Lorenzo Adolph. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

RIENZNER, M.; GANDOLFI, C. **Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale.** 2014. *Soil & Tillage Research*. 135, 28–40.

RIOS FILHO, M. G. **Comportamento de um aterro compactado em campo e laboratório.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ROCHA, M. N. **Dinâmica dos depósitos eólicos de bypass na planície costeira de Paracuru, Brasil:** subsídio para ações de contenção e manejo. 2017. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 148 f.

ROSAS, J. *et al.* **Determination of hydraulic conductivity from grain-size distribution for different depositional environments.** 2014. *Groundwater* 52, 399-413.

SAJJAN, A. K.; GYASI-AGYEI, Y.; SHARMA, R.. Rainfall–runoff modelling of railway embankment steep slopes. **Hydrological sciences journal**, v. 58, n. 5, p. 1162-1176, 2013.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. Part I: A critical comparison of techniques of determining the available water capacity and moisture characteristic curve if a soil. 1965. **Journal of Soil Science** **16**, 1-15, Oxford.

SEMA. **Cartilha das Unidades de Conservação do Ceará**. 2018. 56p. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/unidades-de-conservacao-2/>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

SÍGOLO, J. B. **Processos eólicos a ação dos ventos**. 2000. In: *Decifrando a terra* [S.l: s.n.], p. 247-260.

SILVA, J. G. **Hidrogeologia da faixa costeira de Aquiraz – CE**. 2000. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 116f.

SISSON, J. B. WIERENGA, P. J. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. 1981. **Soil Science Society of America** **45**, 699-704.

SOUSA, J. P. **Indicadores ambientais aplicados à APA do Rio Pacoti, Ceará, Brasil**. 2017. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SOUSA, P. *et al.* Contenção de Dunas no Ceará: estudos de caso sobre técnicas de estabilização. In: **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG**. Salvador, BA. 2018.

SOUZA, H. P. **Uso de cinzas de carvão mineral da termelétrica do Pecém como material de cobertura seca de depósitos de resíduos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 160 p.

SOTO, M. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 223 p.

SUTILI, F. J. *et al.* **Potencial biotécnico do sarandi-branco (*Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.) e vime (*Salix viminalis* L.) para revegetação de margens de curso de água**. 2004. Santa Maria: Ciência Florestal **14**, 13-20.

TERZAGHI, K. *et al.* **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 1967. 3rd Edition, John Wiley, New York, 71-81.

TERWILLIGER, Valery J. Effects of vegetation on soil slippage by pore pressure modification. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 15, n. 6, p. 553-570, 1990.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. 2017. Campinas, SP.: Unicamp/FEAGRI, 2017. e-book. 215p. ISBN 978-85-99678-10-7.

THORNTHWAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geographical Review, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 1997.

TSOAR, H. The ecological background, deterioration and reclamation of desert dune sand. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 33, n. 2, p. 147-170, 1990.

TSOAR, H.; ILLENBERGER, W. Reevaluation of sand dunes' mobility indices. **Journal of Arid Land Studies**, v. 7S, p. 265-268, 1998.

TSOAR, H; ARENS, Sebastiaan M. Mobilização e estabilização de dunas em climas úmidos e secos. **Mercator**, v. 2, n. 3, 2003.

TSOAR, H. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 357, n. 1, p. 50-56, 2005.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater**: Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall. 1993. 450 p.

VANAPALLI, S. K.; *et al.* The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. 1999. **Géotechnique** **49**, 143-149.

VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. 1980. **Soil Science Society of America Journal** **44**, nº 5, 892-898.

VASCONCELOS, S. M. S. **Recarga do aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza, CE**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

VICENTE DA SILVA, E. **Dinâmica da Paisagem**: estudo integrado de ecossistemas litorâneos em Huelva (Espanha) e Ceará (Brasil). 1993. Tese de Doutorado – UNE, Rio Claro.

VILLAR, L. F. **Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. 485 p.

VUKOVIC, M.; SORO, S. Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size analysis. **Littleton, CO: Water Resources Publications**, 1992.

XU, Y. **Unsaturated Hydraulic Conductivity of Fractal-Textured Soils**. 2013. In: da Silva, V.R. (ed), Hydraulic Conductivity, Intech, China, Available at: <http://www.intechopen.com/books/hydraulicconductivity/unsaturated-hydraulic-conductivity-offractal-textured-soils>. Acesso em: 02.02.2021.

WANG, J. *et al.* Equations for hydraulic conductivity estimation from particle size distribution: A dimensional analysis. **Water Resources Research**, v. 53, n. 9, p. 8127-8134, 2017.

WANG, Y. *et al.* Sand dune stabilization changes the vegetation characteristics and soil seed bank and their correlations with environmental factors. **Science of the Total Environment**, v. 648, p. 500-507, 2019.

WILSON, G. **Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems**. 1990.

WISCHMEIER, W. H. *et al.* A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. 1971. **Journal of Soil and Water Conservation** **26**, 189-193.

WOLFE, S.; NICKLING, W. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. **Progress in physical geography**, v. 17, n. 1, p. 50-68, 1993.

ZHENGU, D. *et al.* Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China. 2004. **Geomorphology** **59**, 237-246.