

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - SOLOS E NUTRIÇÃO DE
PLANTAS

EURILENY LUCAS DE ALMEIDA

MEDIDA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA
POR DIFERENTES MÉTODOS E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO
PELA KRIGAGEM

FORTALEZA

2013

EURILENY LUCAS DE ALMEIDA

MEDIDA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA
POR DIFERENTES MÉTODOS E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO
PELA KRIGAGEM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira

FORTALEZA
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

A446m Almeida, Eurileny Lucas de Almeida.
Medida da condutividade hidráulica e curva de retenção de água por diferentes métodos e
predição de atributos físicos do solo pela krigagem / Eurileny Lucas de Almeida. – 2013.
109 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,
Departamento de Ciências do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Solos e
Nutrição de Plantas, Fortaleza, 2013.

Área de Concentração: Solo e nutrição de plantas.
Orientação: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.

1. Condutividade hidráulica. 2. Curva de retenção de água. 3. Krigagem. I. Título.

CDD 631.4

EURILENY LUCAS DE ALMEIDA

MEDIDA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA
POR DIFERENTES MÉTODOS E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO
PELA KRIGAGEM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovado em: 30 de janeiro de 2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Pesquisador Dr. Rubens Sonsol Gondim
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

A Jesus Cristo

À minha alma gêmea, Airlo Rebouças

AGRADECIMENTOS

A Jesus Cristo e ao meu anjo da guarda por ter me dado forças para vencer todos os obstáculos.

Ao meu querido esposo, Airlo Rebouças Carlos, por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Às minhas irmãs, Eurideny Lucas de Almeida e Eurilany Lucas de Almeida, pelas palavras de conforto e grande amizade.

Aos meus pais, Sebastião Florêncio de Almeida e Veralucia Lucas de Almeida, pelo exemplo de força, honestidade e determinação.

Ao meu grande amigo Edmundo Mamede Netto, pelo companheirismo, incentivo, ajuda e por estar sempre presente nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Adunias dos Santos Teixeira, pela orientação, paciência, amizade e conhecimentos compartilhados.

Ao Prof. Francisco Chagas da Silva Filho, Prof. Raimundo Nonato de Assis Junior e ao Pesquisador Dr. Rubens Sonsol Gondim, pelos ensinamentos e participação na minha banca de defesa.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal do Ceará – UFC e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade da realização do mestrado.

Aos Professores da UFC: Claudivan Feitosa de Lacerda, Fernando Felipe Ferreyra Hernandez, Francisco Chagas da Silva Filho, Jaedson Cláudio Anunciato Mota, Mirian Cristina Gomes Costa, Ricardo Espíndola Romero, Tiago Osório Ferreira, pelo conhecimento transmitido.

Aos amigos do curso de mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas da UFC (2010.2): Alcione Guimarães Freire, Alide Mitsue Watanabe Cova, Ana Paula Guimarães Santos, Antônia Arleudina Barros de Melo, Bruno Laecio da Silva Pereira, Hermes de Paula Moreira Oliveira, Jordânia Maria Gabriel Pereira, José Aridiano Lima de Deus, Maria Auxiliadora Conceição de Freitas, Naiara Célida dos Santos de Souza, Rafael Cipriano da Silva e Rafaela Watanabe, pela amizade e companheirismo durante o curso.

Em especial ao Alfredo Mendonça, Antônio Alisson Fernandes Simplício, Francisco Gonçalves Evangelista (o Chico), Jordânia Maria Gabriel Pereira, José Lucio Nascimento Nunes Filho, Lea Costa, Roney Mendes Magalhães de Lima e Watylla

Marratyma T. da Silva, pela grande ajuda na coleta de solo, nas análises de laboratório e principalmente pela amizade.

Ao Francisco Jose Firmino Canafístula e Raimundo Alípio de Oliveira Leão pelo conhecimento compartilhado e por sempre estarem dispostos a ajudar.

A todos que fazem parte do laboratório de Mecânica e Eletrônica Agrícola – LEMA pelo companheirismo e ajuda, serão sempre lembrados com carinho.

À administração do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú e todos os proprietários e responsáveis dos lotes pela permissão, interesse e apoio na coleta de solo.

RESUMO

O conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo e de sua dependência espacial é importante, pois permite realizar o zoneamento da área em glebas que receberão práticas de manejo diferenciadas. Este trabalho foi dividido em três capítulos cujo objetivo geral é medir a condutividade hidráulica e a curva de retenção de água no solo por diferentes métodos e, utilizando a Krigagem, elaborar mapas de atributos físicos dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú. Para obtenção da curva de retenção de água no solo foi utilizado o método do papel filtro em comparação ao método tradicional em cinco diferentes solos do Perímetro. Para medida da condutividade hidráulica foram utilizados sensores capacitivos em substituição aos tensiômetros no método do perfil instantâneo instalado em um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico, como também a calibração desses sensores em campo e laboratório. Os mapas obtidos através da Krigagem foram dos atributos do solo: areia, silte, argila, densidade do solo e partículas, porosidade e condutividade hidráulica saturada. Para obtenção deste último foram utilizados o infiltrômetro de tensão e o permeâmetro de carga constante.

Palavras-chaves: Perfil instantâneo, Sensores capacitivos, Método do papel filtro, Dependência espacial, Semivariograma.

ABSTRACT

Knowledge of the physical and hydraulic properties of the soil and its spatial dependence is important because it allows you to perform the zoning of the area in plots that receive differentiated management. This work was divided into three chapters whose general objective is to measure the hydraulic conductivity and water retention curve in soil by different methods and by using the Kriging, draw maps of soil physical attributes of the Irrigation Perimeter Baixo Acaraú. To obtain the water retention in soil curve method was used filter paper compared to the traditional method in five different soils Perimeter. To measure the hydraulic conductivity were used capacitive sensors to replace the tensiometer in the instantaneous profile installed method on a Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico , as well as the calibration of these sensors in the field and laboratory. The maps were obtained by kriging of soil properties: sand, silt, clay, soil and particle density, porosity and saturated hydraulic conductivity. To obtain this last the tension infiltrometer and the constant load permeameter were used.

Key Words: Instantaneous profile, capacitive sensors, filter paper method, spatial dependence; Semivariogram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Calibração do sensor em campo: a - delimitação da área utilizada; b - saturação da área.....	27
Figura 2 - Delimitação da parcela experimental.....	28
Figura 3 - a - Área experimental coberta com plásticos e palhada, b - equipamento para aquisição de dados dos sensores capacitivos.....	29
Figura 4 - Umidade volumétrica em função da frequência na calibração em campo.....	30
Figura 5 - Umidade volumétrica em função da frequência na calibração em laboratório.	31
Figura 6 - Umidade volumétrica (θ) em função da frequência na calibração em campo e laboratório.....	32
Figura 7 - Relação entre as duas calibrações.....	32
Figura 8 - Comportamento das leituras dos sensores capacitivos com o tempo, nas profundidades de 15 cm, 30 cm, 45 cm e 60 cm.....	33
Figura 9 - Curvas de ajuste da umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição de água no solo.....	34
Figura 10- Condutividade K em função da umidade θ a 30 cm de profundidade.....	38
Figura 11- Condutividade K em função da umidade θ a 45 cm de profundidade.....	38
Figura 12- Condutividade K em função da umidade θ a 30 e 45 cm de profundidade.....	39
Figura 13 - Técnica do papel filtro na medida do potencial matricial.....	50
Figura 14 - Método do Papel Filtro: a - colocando o papel filtro em contato com o solo, b - envolvendo a amostra com filme plástico, c - e papel alumínio, d - identificando a amostra.	51
Figura 15 - Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Argissolo Vermelho Amarelo.....	53
Figura 16 - Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Planossolo.....	54
Figura 17 - Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Latossolo Amarelo.....	54
Figura 18 - Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Neossolo Quartzarênico.....	54
Figura 19 - Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico.....	55

Figura 20 - Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Argissolo Vermelho Amarelo.....	56
Figura 21 - Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Planossolo.....	56
Figura 22 - Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Latossolo Amarelo.....	57
Figura 23 - Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico.....	57
Figura 24 - Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Neossolo Quartzarênico.....	57
Figura 25 - Esquema de um permeâmetro de carga constante.....	67
Figura 26 - Localização do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	70
Figura 27 - Mapas de altitude (a) e declividade (b) do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, obtidas com imagem SRTM.....	71
Figura 28 - Pontos de coleta no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	72
Figura 29 - Método do permeâmetro de carga constante.....	75
Figura 30 - Infiltrômetro de tensão.....	75
Figura 31 - Triângulo de classificação textura de solos(a) com os dados da pesquisa(b)...	78
Figura 32 - Mapa de Krigagem da fração areia do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	82
Figura 33 - Mapa de Krigagem da fração argila do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	82
Figura 34 - Mapa da fração silte, obtido por diferença, do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	83
Figura 35 - Mapa de Krigagem da densidade do solo do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	86
Figura 36 - Mapa da densidade das partículas do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	87
Figura 37 - Mapa da Porosidade do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	87
Figura 38 - Mapa de Krigagem do parâmetro θ_{cc} para os solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	90
Figura 39 - Mapa de Krigagem da θ_{pmp} para os solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	91
Figura 40 - Mapas de Krigagem do parâmetro: Ko (mm/h) pelo método do Infiltrômetro de tensão, b - K na tensão de 0,5 kPa (mm/h) pelo método do Infiltrômetro de tensão e c - Ko (mm/h) pelo método do perm. de carga constante.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros das curvas de calibração, utilizando o software SPSS, com ensaio realizado no campo.....	30
Tabela 2 - Parâmetros das curvas de calibração, utilizando o software SPSS, com ensaio realizado em laboratório.....	31
Tabela 3 - Parâmetros da equação de van Genuchten (1980), para quatro profundidades.....	34
Tabela 4 - valores de densidade de fluxo de água em cada profundidade para cada tempo.....	35
Tabela 5 - Valores de densidade de fluxo (q), gradiente de potencial total ($\delta\psi/\delta z$) e de Condutividade hidráulica (K) para as profundidades de 15 a 45 cm e de 30 a 60 cm.....	36
Tabela 6 - Parâmetros de ajuste das curvas características de retenção de água no solo pelo método convencional e método do papel filtro em solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.....	55
Tabela 7 - Distribuição das partículas por tamanho.....	73
Tabela 8 - Medidas estatísticas descritivas e distribuição de frequência da granulometria.....	79
Tabela 9 - Parâmetros dos semivariogramas para os atributos do solo: areia e argila.....	80
Tabela 10 - Medidas estatísticas descritivas de densidade e porosidade.....	84
Tabela 11 - Parâmetros dos semivariogramas para densidade do solo e partículas.....	85
Tabela 12 - Estatística descritiva e distribuição de frequência para os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo por van Genuchten.....	88
Tabela 13 - parâmetros dos semivariogramas para os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo.....	89
Tabela 14 - Medidas de estatística descritiva para condutividade hidráulica.....	92
Tabela 15 - Parâmetros dos semivariogramas para condutividade hidráulica satura ($k_{o(\text{tensi})}$) e com tensão de 0,5 kPa ($k_{0,5 \text{ kPa}}$) pelo infiltrômetro de tensão condutividade hidráulica satura pelo método do permeâmetro de carga constante ($K_{o(\text{perm})}$).....	93
Tabela 16 - Matriz de correlação dos atributos dos solos do Perímetro Irrigado baixo Acaraú. Correlação é significativa ao nível de 0,05.....	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
CAPITULO 1 – MÉTODO DO PERFIL INSTATÂNEO UTILIZANDO SENSORES	
CAPACITIVOS.....	17
RESUMO	17
ABSTRACT	18
2 INTRODUÇÃO.....	19
3 REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1 Movimento da água no solo	21
3.2 Condutibilidade hidráulica	21
3.2.1 Método para a medida da condutividade hidráulica do solo.....	22
3.2.1.1 Método do Perfil Instantâneo	22
3.2.2 Equação do fluxo de água.....	23
3.3 Sensores capacitivos de umidade	24
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 Calibração dos sensores capacitivos.....	26
4.2 Perfil Instantâneo.....	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Calibração do sensor capacitivo	30
5.2 Método do Perfil Instantâneo para determinação do $K(\theta)$	33
6. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	41
CAPÍTULO 2 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO UTILIZANDO MÉTODO DO PAPEL FILTRO	
DO PAPEL FILTRO	44
RESUMO	44
ABSTRACT	45
7 INTRODUÇÃO.....	46
8 REVISÃO DE LITERATURA	47
8.1 Curva de retenção de água no solo - CRA.....	47
8.1.1 Método tradicional	47
8.1.2 Método do papel filtro.....	48
9. MATERIAL E MÉTODOS.....	50
9.1 Curva de Retenção da Água no Solo.....	50

9.1.1 Método do papel filtro.....	50
9.1.2 Método convencional.....	52
10 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
10.1 Curva de retenção de água no solo	53
11 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS	60
CAPITULO 3 – AVALIAÇÃO DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS DO PERÍMETRO IRIGADO BAIXO ACARAÚ.....	
RESUMO	62
ABSTRACT	63
12 INTRODUÇÃO.....	64
13 REVISÃO DE LITERATURA	65
13.1 Importância de atributos físicos do solo	65
13.1.1 Densidade e porosidade.....	65
13.1.2 Textura do solo	65
13.2 Condutividade hidráulica.....	66
13.2.1 Infiltrômetro de tensão	66
13.2.2 Permeâmetro de carga constante	67
13.3 Dependência espacial	68
14 MATERIAL E MÉTODOS.....	70
14.1 Descrição da área	70
14.2 Coleta de solo	72
14.3 Análises laboratoriais.....	72
14.3.1 Granulometria	72
14.3.2 Densidade	73
14.3.3 Porosidade Total	73
14.4 Curva de retenção de água no solo.....	74
14.5 Condutividade hidráulica.....	74
14.5.1 Permeâmetro de carga constante	74
14.5.2 Infiltrômetro de tensão	75
14.6 Análise estatística	76
14.7 Análise geoestatística	76
15. RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
15.1 Granulometria.....	78

<i>15.1.1 Estatística descritiva</i>	78
<i>15.1.2 Dependência espacial</i>	80
15.2 Densidade do solo, densidade das partículas e porosidade total	83
<i>15.2.1 Estatística descritiva</i>	83
<i>15.2.2 Dependência espacial</i>	84
15.3 parâmetros da Curva de Retenção de Água no Solo	88
<i>15.3.1 Estatística descritiva</i>	88
<i>15.3.2 Dependência espacial</i>	89
15.4 Condutividade Hidráulica.....	91
<i>15.4.1 Estatística descritiva</i>	91
<i>15.4.2 Dependência espacial</i>	92
15.5 Correlação linear entre os atributos do solo	95
16 CONCLUSÃO.....	98
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO	102
APÊNDICE B – ROTINA DO MÉTODO DO PAPEL FILTRO.....	108
APÊNDICE C – MAPA DE SOLOS DO PERÍMETRO IRRIGADO BAIXO ACARA	108

1 INTRODUÇÃO

Como a irrigação é um dos tratamentos culturais que mais influencia a produção agrícola, é importante manejá-la corretamente. Assim o estudo do solo e suas interações com água é de fundamental importância para o manejo correto da irrigação, permitindo assim o emprego de técnicas que disponibilize água no tempo e na quantidade correta para o desenvolvimento das plantas de maneira econômica e eficiente.

No Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, localizado na região norte do Estado do Ceará, no trecho final da bacia do Rio Acaraú, foi observado que 88,89% dos irrigantes, não empregam nenhum tipo de equipamento para determinar o conteúdo de água no solo, indicando o inadequado manejo da irrigação (LOPES *et al.*, 2011)¹.

O manejo impróprio da irrigação no Perímetro pode ser também consequência da falta de uma base de dados dos atributos do solo, destacando-se a curva de retenção de água no solo, a granulometria, a densidade do solo e a condutividade hidráulica, que seriam melhor apresentados através de mapas.

Com um modelo de dependência espacial, a geoestatística possibilita a estimativa em pontos não amostrados, viabilizando o mapeamento e o zoneamento dos atributos. Esse procedimento permite o manejo mais racional da água, de fertilizantes e de defensivos agrícolas.

Para elaboração desses mapas é necessário pelo menos trinta pontos amostrais, tornando inacessível a obtenção da curva de retenção de água no solo e a condutividade hidráulica, pois os métodos tradicionais são onerosos, trabalhosos e com grande gasto de tempo. Sendo assim necessário o uso de métodos alternativos, como o emprego do método do papel filtro para obtenção da curva de retenção de água no solo e a utilização de sensores capacitivos na medição da umidade do solo.

Na expectativa de minimizar os problemas passados pelos irrigantes no manejo da irrigação, servindo como base de dados, este trabalho foi dividido em três capítulos cujo objetivo geral foi medir a condutividade hidráulica e a curva de retenção de água no solo por diferentes métodos e, utilizando a Krigagem, elaborar mapas de atributos físicos dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.

¹ LOPES, F. B. *et al* Determinação do padrão do manejo da irrigação praticada no perímetro irrigado Baixo Acaraú, Ceará, via análise multivariada. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 301-316, 2011

CAPITULO 1 – MÉTODO DO PERFIL INSTANTÂNEO UTILIZANDO SENSORES CAPACITIVOS.

RESUMO

A disponibilidade e o movimento da água no solo são fatores importantes para o crescimento e produtividade das culturas, destacando-se a condutividade hidráulica. Como o método do perfil instantâneo é considerado trabalhoso, sendo necessário um consumo elevado de tempo e principalmente mão-de-obra, na instalação e manutenção, o objetivo deste capítulo é utilizar sensores capacitivos no método de campo do perfil instantâneo em substituição aos tensiômetros, como também a calibração destes sensores em um dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú. O experimento foi realizado em um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico. Os sensores foram instalados a 15cm, 30 cm, 45cm e 60 cm da superfície e eram alimentados por painéis de energia solar de dia e a noite por baterias. As leituras dos sensores capacitivos foram coletadas a cada cinco minutos e guardadas na memória da placa de aquisição de dados. Com as medidas simultâneas de umidade, obtida pelos sensores, e potencial total da água no solo, pela curva de retenção de água no solo, foi determinada para cada tempo a condutividade hidráulica em função do conteúdo volumétrico de água, através da equação de Richards. Ao final do experimento pode-se concluir que foi bastante satisfatória a utilização dos sensores capacitivos no método do perfil instantâneo e constituiu uma alternativa ao uso do tensiômetro.

CHAPTER 1 - METHOD OF INSTANTANEOUS PROFILE USING CAPACITIVE SENSORS.

ABSTRACT

The availability and water movement in soil are important for growth and crop factors, especially the hydraulic conductivity. As the instantaneous profile method is considered laborious, a high consumption of time and mostly hand labor, installation and maintenance is required, the purpose of this chapter is to use capacitive sensors in the method of field the instantaneous profile in substitution of tensiometer as well as the calibration of these sensors in a soil of the irrigated perimeter Baixo Acaraú. The experiment was conducted in a Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico. The sensors were installed at 15cm, 30cm, 45cm and 60 cm from the surface and were powered by solar panels during the day and night by batteries. The readings of capacitive sensors were collected every five minutes and stored in the memory of the data acquisition board. With simultaneous measurements of moisture, obtained by the sensors, and the total water potential in the soil by the soil water retention curve was determined for each time the hydraulic conductivity as a function of the volumetric water content, through the Richards equation. At the end of the experiment it can be concluded that it was quite satisfactory use of capacitive sensors in the instantaneous profile method and provided an alternative to using the tensiometer.

2 INTRODUÇÃO

A disponibilidade e o movimento da água no solo são fatores importantes para o crescimento e produtividade das culturas, pois além de satisfazerem a demanda hídrica, permitem que as plantas tenham acesso aos nutrientes. Assim, o solo, como o principal reservatório de água para as plantas, torna-se essencial a determinação das suas propriedades hidráulicas.

Dentre as propriedades hidráulicas do solo, destaca-se condutividade hidráulica por ser o parâmetro que mede a facilidade com a que a água se move no perfil saturado ou insaturado. É importante o estudo no estado não saturado, pois é neste estado que ocorrem processos intrínsecos ao manejo de irrigação como infiltração, drenagem e absorção pelas plantas.

A relação que melhor descreve o fluxo de água no solo é a equação de Darcy-Buckingham na qual a condutividade hidráulica (K) é a constante de proporcionalidade entre a densidade de fluxo (q) e o gradiente de potencial total da água (Ψ).

Quanto maior a condutividade hidráulica, maior a facilidade com que a água se move no solo, atingindo valor máximo na saturação. No entanto, uma condutividade hidráulica alta não implica necessariamente em um grande fluxo, uma vez que o fluxo é dependente do gradiente de potencial (REICHARDT, 1990).

Diversos são os métodos dispostos na literatura para a medida da condutividade hidráulica, que são divididos em métodos de campo e laboratório. Em condições de campo, o mais utilizado é o método do perfil instantâneo, que tem como vantagem a medida direta no campo apresentando assim, uma maior precisão dos valores de condutividade hidráulica, quando comparados com os métodos de laboratório.

Como o método do perfil instantâneo é considerado trabalhoso, sendo necessário um consumo elevado de tempo e principalmente mão-de-obra, na instalação e manutenção, estima-se ser necessário a criação de formas para diminuir as desvantagens deste método. A utilização de sensores, em substituição ao tensiômetro utilizados no perfil instantâneo, pode ser promissora, principalmente por serem mais precisos, tornando mais fácil o acompanhamento do conteúdo de água no solo.

Os sensores do tipo capacitivos tem seu princípio de funcionamento baseado na capacitância elétrica. Por não ser destrutivo, sua aplicação tem se difundido bastante em pesquisas relacionadas à umidade do solo (FREITAS *et al.*, 2012; CRUZ *et al.*, 2010; ZAZUETA E XIN, 1994). Esses sensores tem capacidade de avaliar o conteúdo de água

existente no solo em qualquer profundidade, com nível de precisão relativamente alto. Isto é possível porque a técnica da capacitância elétrica é um método capaz de medir a permissividade dielétrica no solo, podendo ser usada frequentemente para medições do seu conteúdo de água. (GARDNER et al.,1998).

Com a intenção de propor uma alternativa mais precisa e menos trabalhosa na obtenção das leituras de umidade do solo, este capítulo teve como objetivo a utilização de sensores capacitivos no método de campo do perfil instantâneo em substituição aos tensiômetro, como também a calibração destes sensores em um dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.

Assim foi formulada a seguinte hipótese: A utilização de sensores capacitivos pode ser uma alternativa para substituir os tensiômetro no método do perfil instantâneo, com maior precisão nas medidas de umidade do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Movimento da água no solo

Para o entendimento do movimento da água é necessário o conhecimento das propriedades hidráulicas mais representativas como a condutividade hidráulica $K(\theta)$ e a curva de retenção da água no solo $\Psi_m(\theta)$, onde θ representa a umidade e Ψ_m representa o potencial matricial da água no solo. Estas propriedades influenciam diretamente na taxa de infiltração da água e solutos na região insaturada do solo (NAIME et al., 2002).

A maioria dos processos envolvendo interações solo-água no campo, incluindo o fornecimento de água e nutrientes para as plantas, bem como o transporte de água e solutos além da zona de raiz, ocorrem quando o solo está em condição não saturada. Processos de fluxo insaturados são, em geral, complicados e difíceis de escrever quantitativamente, uma vez que estão relacionadas com a umidade do solo, potencial total e condutividade hidráulica. As inter-relações são ainda mais complicadas devido à variabilidade espacial (HILLEL, 2003).

O fluxo de água no solo é impulsionado por um gradiente de potencial e não por um gradiente de umidade. O movimento dá-se no sentido do decréscimo do potencial, isto é, a água se move de pontos de maior potencial para os pontos de menor potencial. É importante ressaltar que, além do potencial total da água Ψ , a condutividade hidráulica também determina o comportamento do fluxo (AMARO FILHO, ASSIS JUNIOR, MOTA, 2008; LIBARDI, 2010), conforme a lei de Darcy-Buckingham.

3.2 Condutividade hidráulica

O conhecimento da condutividade hidráulica em função da umidade ($K(\theta)$) é essencial para os estudos que envolvem a infiltração da água, o movimento da água dentro do perfil, bem como para as raízes das plantas e a drenagem interna do solo.

Segundo Hillel (2003), a diferença mais importante entre o fluxo da água no solo insaturado e saturado é a condutividade hidráulica. Quando o solo está saturado, todos os poros estão preenchidos com água, sendo sua condutividade máxima nessa condição. Quando o solo se torna não saturado, alguns dos poros são preenchidos por ar e a condutividade hidráulica decresce rapidamente. Marinho (2005) lembra que em um meio poroso não saturado a condutividade hidráulica varia em função da quantidade de água presente neste meio.

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade dinâmica, uma vez que o solo

como meio poroso, pela sua formação, pode ter sua estrutura modificada por processos naturais e por processos antropogênicos. Essa propriedade expressa à facilidade com que a água é transportada através do perfil do solo, variando em diferentes solos e até no mesmo solo, dependendo, portanto, das propriedades do meio e do fluido. A condutividade hidráulica pode ser considerada uma das propriedades que reflete as condições físicas do solo, sua qualidade e estabilidade estrutural (ANGELOTTI NETTO; FERNANDES, 2005).

São vários os fatores que influenciam a condutividade hidráulica, dentre eles se destaca a granulometria e a estrutura do solo. No trabalho de Benson e Trast (1995) a condutividade hidráulica tendeu a diminuir com o aumento da plasticidade em treze solos argilosos e no experimento de Nwaiwu, Afolayan e Osinubi (2009) a condutividade aumentou com o aumento do teor de cascalho.

Martins, Cunha e Castro (2001), trabalhando com Latossolo vermelho, constataram que a condutividade diminuiu da superfície para a base do horizonte A. Essa diferença foi devido ao predomínio da macroporosidade e mesoporosidade em superfície, por causa do enraizamento provocado pela pastagem, e da presença de matéria orgânica.

3.2.1 Método para a medida da condutividade hidráulica do solo

Vários métodos são descritos para determinação da condutividade hidráulica em função da umidade. Pode ser determinada em solo na condição de saturação (K_o) ou em solo não saturado, determinando assim condutividade hidráulica do solo em função da umidade ($K(\theta)$) e podem ser medidos em campo e em laboratório.

A condutividade hidráulica do solo, K , em função do conteúdo volumétrico de água, θ , deve ser conhecida com precisão para qualquer investigação quantitativa de água e transporte de solutos no solo não saturado (DIRKSEN, MATULA, 1994).

3.2.1.1 Método do Perfil Instantâneo

Os métodos de campo empregados com mais sucesso na obtenção da condutividade hidráulica são fundamentados em experimentos de drenagem interna, como o método do perfil instantâneo (HILLEL et al., 1972), que se baseia na análise dos componentes da equação de Richards em perfis de potenciais e fluxos transientes durante a drenagem vertical que ocorre após a saturação do solo (PAIGE; HILLEL, 1993).

O método de campo do perfil instantâneo tem como vantagem a obtenção de

medidas diretas no campo, apresentando uma maior precisão dos valores de condutividade hidráulica, quando comparado com os métodos de laboratório. Já as desvantagens são: o método é trabalhoso, requer um consumo elevado de tempo e mão de obra na instalação, dificultando ainda mais se os solos apresentarem algum impedimento físico (JONG VAN LIER; LIBARDI, 1999).

3.2.2 Equação da condutividade hidráulica

Em 1856 o engenheiro hidráulico Henry Darcy em seus experimentos obteve a equação 1 que passou a ser conhecida pelo nome de Lei de Darcy.

A equação desenvolvida por Darcy (Equação 1) estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de área e de tempo através de um meio poroso é proporcional ao gradiente hidráulico e a constante de proporcionalidade, denominada condutividade hidráulica, que diz respeito à transmissão da água através do solo na condição de saturação como lembra Libardi (2010).

$$q = -K_o \frac{\Delta\Psi}{L} \quad 1$$

q = densidade de fluxo de água; K_o = condutividade hidráulica do solo saturado; $\Delta\Psi$ = variação do potencial total; L = distância entre dois pontos.

Como a equação de Darcy foi desenvolvida para a condição de solo saturado e sendo os solos insaturados a condição mais comum, Edgar Buckingham (1907) introduziu então os conceitos de condutividade hidráulica do solo não saturado e de potencial mátrico e, com base em equações de fluxo de calor e de eletricidade, criou uma equação de fluxo semelhante à de Darcy, para solos em condições de não saturação, desconsiderando o efeito da gravidade. Que ficou conhecida como equação de Darcy-Buckingham

Como a equação de Darcy-Buckingham não foi suficiente nos estudos de dinâmica da água no solo devido à necessidade da descrição umidade que varia com o tempo, Richards (1941) combinou a equação de Darcy-Buckingham com a equação da continuidade, obtendo a equação diferencial que descreve o movimento da água no solo insaturado conhecida pelo nome de Equação de Richards (Equação 2).

$$K(\Theta) \Big|_z = \frac{-\int_0^z \frac{\partial \Theta}{\partial t} z}{\frac{\partial \Psi_t}{\partial z} \Big|_z} \quad 2$$

K = condutividade hidráulica do solo; Θ = umidade volumétrica; T = tempo de redistribuição; Ψ_t = potencial total da água no solo; Z = coordenada vertical de posição.

3.3 Sensores capacitivos de umidade

O funcionamento do sensor capacitivo é baseado na capacitância elétrica, sendo similar a um capacitor de placas planas. Sendo assim, um campo elétrico é formado entre as placas, ocorrendo perturbações quando qualquer material entra nesse campo, causando uma variação na oscilação, que se mantém enquanto permanece esse material dentro do campo elétrico. Qualquer material isolante que preenche o espaço entre as placas de um capacitor é denominado de dielétrico e possui um valor específico, variando de acordo com sua composição.

Como os sensores determinam o conteúdo de água do solo de forma indireta, é necessária a realização de calibrações para os solos a serem monitorados, em razão das diferenças físicas que os mesmos apresentam (CRUZ et al., 2010). As calibrações podem ser realizadas em campo, como também em laboratório, pois com a utilização de amostras indeformadas, há preservação das características do solo, como estrutura, densidade e aeração. Assim, Santos et al. (2006) asseguram que pode ser confiável a transferência dos modelos de calibração em laboratório para aplicações práticas em condições de campo.

O objetivo do trabalho de Oliveira A.(2008) foi avaliar um sensor de umidade, do tipo capacitivo, que denominou de TOPDEA, no manejo da irrigação. Os resultados obtidos pelo autor mostraram que o uso do sensor TOPDEA, no monitoramento da irrigação, apresentou-se preciso e eficiente. O sensor permitiu medir a umidade em tempo real e acompanhar a mesma de forma contínua, possibilitando desta forma, o perfeito fracionamento da irrigação.

Cruz (2009), utilizando rede de sensores sem fio, efetuou o monitoramento de irrigação e chuva, através dos sensores capacitivos FDR, revelando-se altamente robustos na medição da umidade do solo. O fator limitante no experimento foi a bateria, necessitando de modificações no protocolo de comunicação para otimizar o consumo das baterias dos módulos sensores e dessa forma evitar perdas de dados que foram essenciais para dinamismo do sistema.

Em Cruz et al. (2010) e Silva (2005), o sensor capacitivo apresentou alta velocidade

de resposta ao imergi-lo na água. Com variações da quantidade de água na amostra de solo, o sensor capacitivo detectou as mudanças de perda de água pela coluna de solo no decorrer do experimento, apresentando maior sensibilidade à medida que se diminui o conteúdo de água no solo. Portanto, o sensor capacitivo pode ser utilizado para determinar o teor de água do solo de forma adequada.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Calibração dos sensores capacitivos

4.1.1 Em laboratório

Os sensores capacitivos utilizados foram desenvolvidos no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Estes sensores já foram utilizados em vários trabalhos (OLIVEIRA, A., 2008; CRUZ et al, 2010) e mostrou-se eficiente no monitoramento da umidade do solo em tempo real.

Para calibração em laboratório foi coletada amostra de solo indeformada em um lote do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, cujo teor de areia, silte e argila são de 814,38 g/kg, 57,41 g/kg e 128,21 g/kg, respectivamente.

Foram acondicionados em cilindro de PVC, com diâmetro de 20 cm e altura de 30 cm, na profundidade de 0 a 30 cm. A amostra foi saturada por capilaridade e acoplada a uma célula de carga da ALFA Instrumentos, com capacidade de 50 kg, para o monitoramento da perda de água pela variação de massa. O sensor capacitivo foi implantado no centro da amostra de solo no sentido vertical, que proporcionou leituras mais significativas da umidade total da amostra.

Para determinação da umidade em base volume, inicialmente foi obtida a densidade do solo e posteriormente a umidade a base de massa. As equações 3, 4 e 5 definem o processo para obtenção da umidade a base de volume.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad 3$$

$$u = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \quad 4$$

$$\theta = \rho_s \cdot u \quad 5$$

ρ_s - densidade do solo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); m_s - massa do solo seco (kg); V - Volume do solo (m^3); u - umidade do solo a base de massa ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); m_u - massa do solo úmido (kg); θ - umidade a base de volume ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

4.1.2 Em campo

Na calibração em campo foi utilizada uma área com 60 cm de diâmetro por 30 cm de profundidade, sendo revestido com plástico nas laterais, permitindo drenagem livre (Figura 1a). Depois de instalado um sensor capacitivo no centro da área, iniciou-se a saturação (Figura 1b).

Figura 1- Calibração do sensor em campo: a - delimitação da área utilizada; b - saturação da área.



Fonte: Elaborado pela autora

O solo foi considerado saturado quando a leitura do sensor capacitivo se estabilizou. Após saturação, amostras do solo foram coletadas e acondicionadas em recipientes, à medida que a água era drenada e/ou evaporada, ao mesmo tempo em que leituras eram tomadas no sensor. Posteriormente os recipientes foram pesados em balança de duas casas decimais e colocados na estufa a 105° C por 24 horas para obtenção da umidade a base de massa. Foram coletadas também três amostras de solo utilizando amostrador tipo Uhland para obtenção da densidade total do solo. Foram então utilizadas as equações 3, 4 e 5, para obtenção da umidade volumétrica.

Após o término da calibração de campo e laboratório, as leituras em frequências dos sensores capacitivos e umidade volumétrica foram analisadas no software IBM SPSS Statistics, onde foram testados os seguintes modelos: polinomial do 2° grau, exponencial, logaritmo e potencial. Ao final, foi escolhida a curva que apresentou maior coeficiente de determinação.

4.2 Perfil Instantâneo

Na utilização do método do Perfil Instantâneo foi delimitada uma parcela experimental com 3 m de diâmetro, a qual foi delimitada lateralmente com lona plástica e circundada por camalhões de aproximadamente 0,3 m de altura para conter a água a ser aplicada na saturação do solo (Figura 2).

Figura 2 - Delimitação da parcela experimental

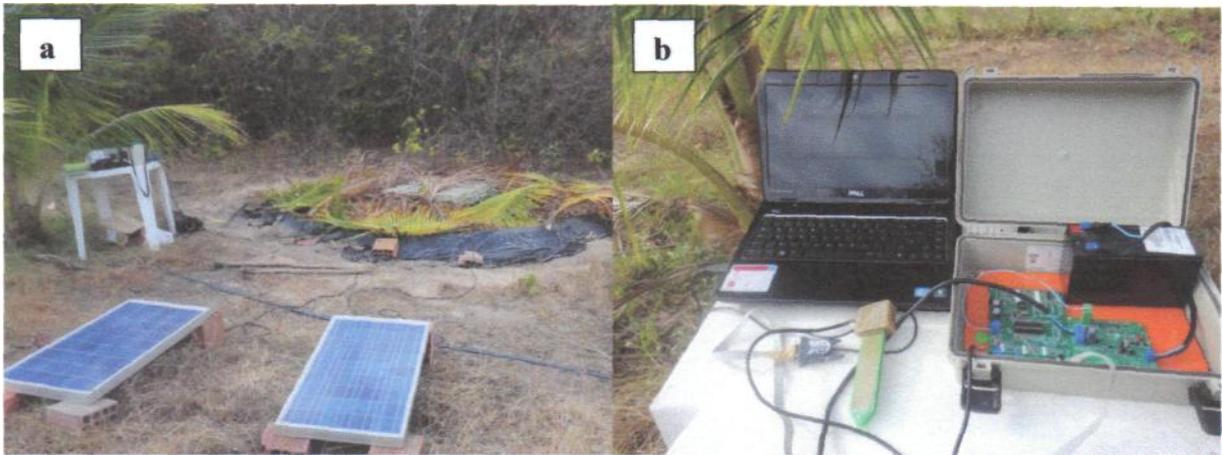


Fonte: Elaborado pela autora

Foram instaladas duas baterias compostas, cada uma, por quatro sensores capacitivos de umidade (Calibração no item 3.1) no centro da área, espaçadas 1,3 m entre baterias. Os sensores foram instalados, com espaçamento de 50 cm, nas profundidades de 0,15 m, 0,30 m, 0,45m, e 0,60 m.

Após instalação dos sensores capacitivos, a área experimental foi inundada de modo a garantir a saturação do perfil a 0,6 m de profundidade, sendo constatada a saturação do solo pela proximidade das leituras dos sensores. Após saturação do solo, a área foi coberta com lona de polietileno para evitar perdas por evaporação ou entrada de água através da superfície, e por fim, foi posta sobre a área uma camada de palha para evitar grandes oscilações na temperatura do solo (Figura 3a).

Figura 3 - a - Área experimental coberta com plásticos e palhada, b - equipamento para aquisição de dados dos sensores capacitivos.



Fonte: Elaborado pela autora

Com o início da drenagem interna, as leituras dos sensores capacitivos foram coletadas a cada 5 minutos e armazenadas na memória da placa de aquisição de dados. De dia, os sensores eram alimentados pelos painéis de energia solar e a noite por bateria (Figura 3). No final de cada dia era feita a coleta dos dados e esvaziada a memória, este processo perdurou por 30 dias.

Os valores de umidade foram calculados utilizando a equação de calibração realizada no campo. Já os valores de potencial matricial (Ψ_m) foram obtidos a partir da curva de retenção de água no solo alcançado pelo método do papel filtro.

O potencial total (Ψ_t) foi calculado considerando como referência gravitacional a superfície do solo, sendo igual à soma do potencial gravitacional (Ψ_g) e potencial matricial (Ψ_m). Assim o Ψ_g foi considerado 15 cm, 30 cm, 45 cm e 60 cm para cada respectiva profundidade.

Com as medidas simultâneas da umidade e potencial total da água no solo ao longo do perfil, foi determinada para cada tempo a condutividade hidráulica K em função do conteúdo volumétrico de água, Θ , pela equação 2.

$$K(\Theta) \Big|_z = \frac{-\int_0^z \frac{\partial \Theta}{\partial t} z}{\frac{\partial \Psi_t}{\partial z} \Big|_z} \quad 2$$

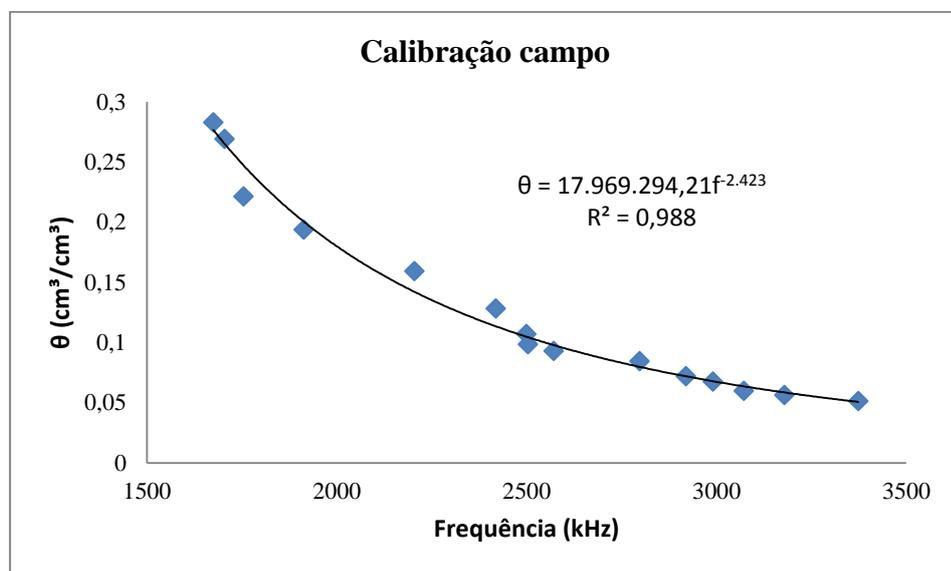
Onde o numerador é a densidade de fluxo e o denominador é o gradiente de potencial total na profundidade do solo Z .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Calibração do sensor capacitivo

Na Figura 4, pode-se observar a relação entre a umidade do solo e as respostas do sensor capacitivo instalado no campo. O teste F realizado pelo IBM SPSS Statistics validou a hipótese de que a regressão é significativa ao nível de significância acima de 99,9%,

Figura 4 - Umidade Volumétrica em função da frequência na calibração em campo



Fonte: Elaborado pela autora

O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o potencial, que apresentou também o melhor coeficiente de determinação. A equação exponencial superestimou os valores de umidade a partir de 10% a até aproximadamente 25% de umidade, O nível de significância e os parâmetros estimados de quatro modelos estudados estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros das curvas de calibração, utilizando o software SPSS, com ensaio realizado no campo.

Equação	R ²	Parâmetros Estimados		
		Constante	b1	b2
Exponencial	0,985	1,417	-0,001	
Logarítmica	0,953	2,651	-0,323	
Potencial	0,988	17969294,21	-2,423	
Quadrática	0,981	0,905	7,678E-08	-0,001

Fonte: Elaborado pela autora

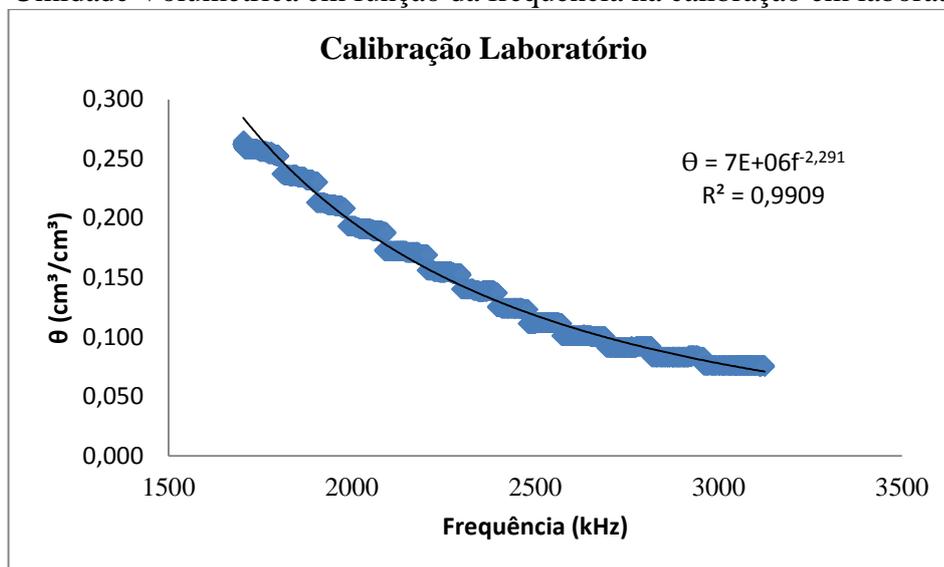
Na calibração do sensor capacitivo em laboratório, o teste F validou a hipótese de que as regressões são significativas ao nível de significância acima de 99,9 %. Na Tabela 2, observa-se que o melhor modelo de ajuste dos dados da calibração em laboratório foi o potencial (Figura 5), apresentando coeficiente de determinação menor que o do modelo quadrático, pois, os dados foram superestimados pelo modelo quadrático, evento semelhante foi encontrado por Cruz (2009), quando a equação polinomial de 2ª ordem superestimou os valores de umidade abaixo de 10% de umidade.

Tabela 2 – Parâmetros das curvas de calibração, utilizando o software SPSS, com ensaio realizado em laboratório,

Equação	R ²	Parâmetros Estimados		
		Constante	b1	b2
Exponencial	0,989	1,433	-0,001	
Logarítmica	0,977	2,806	-0,342	
Potencial	0,991	7185269,62	-2,291	
Quadrática	0,995	0,951	8,37E-08	-0,001

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 5 - Umidade Volumétrica em função da frequência na calibração em laboratório



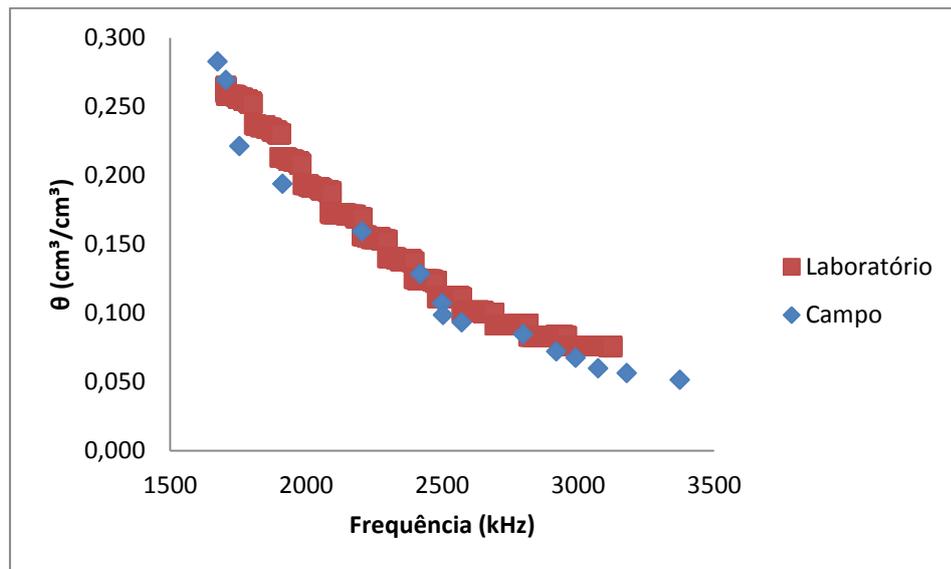
Fonte: Elaborado pela autora

Na análise comparativa da umidade dos dois métodos Figuras 6 e 7, observam-se algumas semelhanças entre os dados e, tendo em vista os resultados de Cruz (2009) e Moreira (2009), uma pequena superestimação dos dados da calibração em laboratório.

Na figura 6, pode-se observar que, no campo, a umidade chegou a valores mais baixos e com isso a maiores frequências.

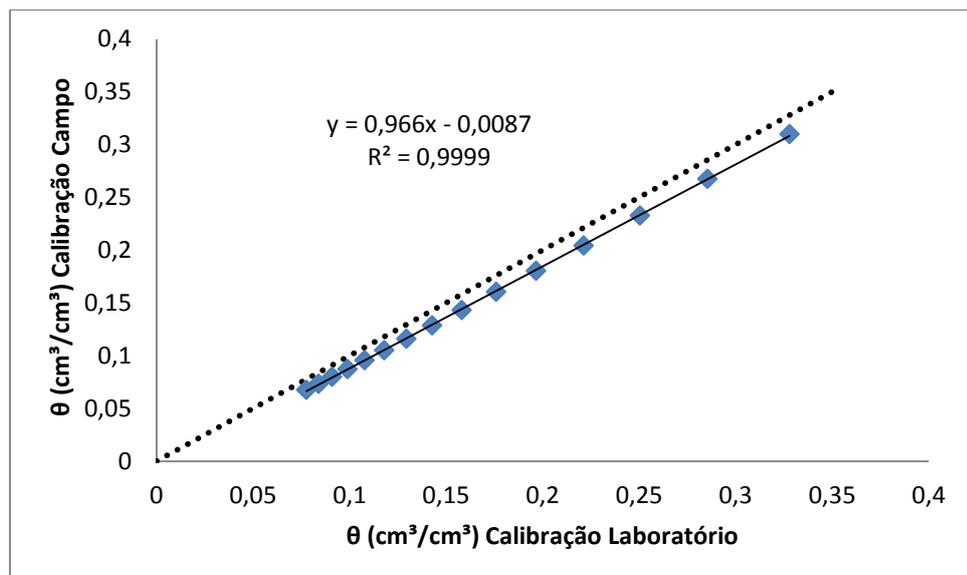
O método gravimétrico para determinação da umidade é o padrão para calibrar métodos indiretos como lembra Andrade Júnior, Silva e Daniel (2007). Além disso, na calibração em laboratório, a estrutura do solo está sujeita a deformação, fato que justifica a superestimação da umidade pela equação em comparação a calibração em campo.

Figura 6 - Umidade volumétrica (θ) em função da frequência na calibração em campo e laboratório



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 7 - Relação entre as duas calibrações



Fonte: Elaborado pela autora

Como a equação de regressão estimada apenas estabelece uma relação funcional entre as variáveis X e Y, mas não esclarece se a variação de X influencia significativamente a

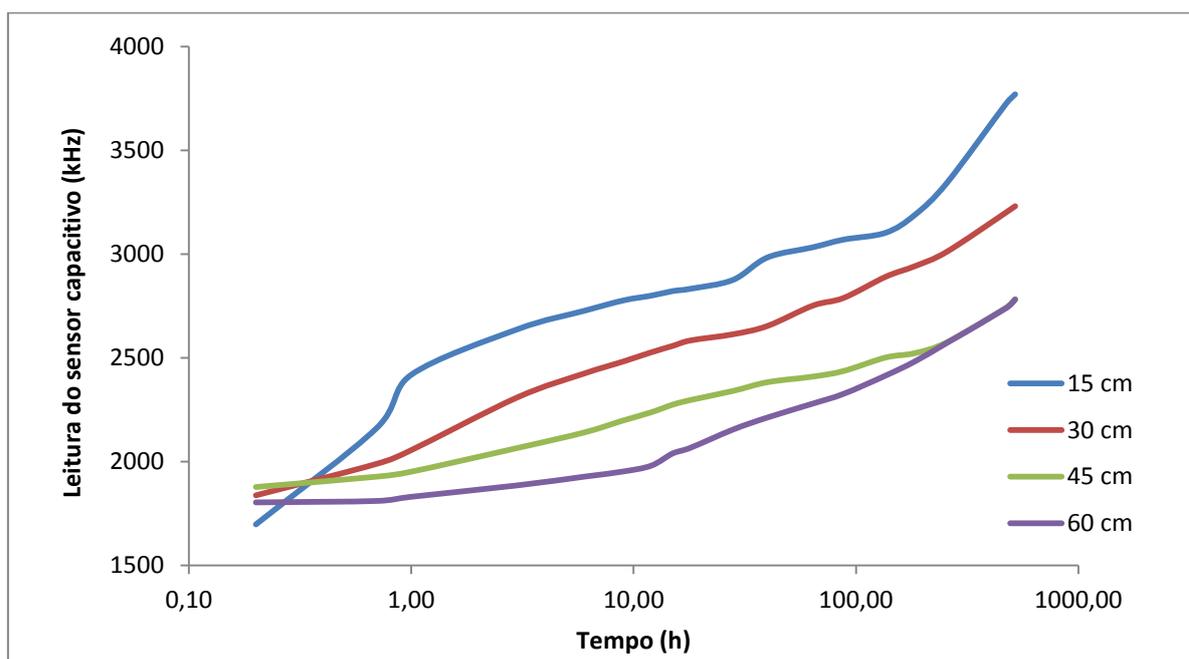
variação de Y (RIBEIRO FILHO, 2004), foi necessário realizar uma análise de variância (ANOVA) da regressão dos resultados da calibração. A análise de regressão do modelo linear da figura 7 está apresentada no apêndice A. A análise regressão ao nível de significância de 95%, conclui que o modelo proposto é adequado para estudar a variável umidade pelo método de laboratório em função da variável umidade obtida pelo método de campo.

5.2 Método do Perfil Instantâneo para determinação do $K(\theta)$

Na Figura 8 podem ser observados os comportamentos das leituras dos sensores (kHz) com o tempo (h) em quatro profundidades 15 cm, 30 cm, 45 cm e 60 cm. No início, as leituras dos sensores são semelhantes, seguindo quase paralelamente até em torno de 200 horas. A partir das 450 horas, os sensores instalados a 45 cm e 60 cm de profundidade tiveram leituras bem parecidas e continuaram secando mais lentamente que as demais camadas, isso foi devido aos maiores valores de argila em profundidade, com isso o solo seca mais rapidamente nas camadas superiores.

O comportamento de ascensão rápida da leitura do sensor capacitivo, posto a 15 cm de profundidade, na primeira hora, foi devido a maiores teores de areia em superfície, justificando assim a maior rapidez em perder água por lixiviação.

Figura 8 - Comportamento das leituras dos sensores capacitivos com o tempo, nas profundidades de 15 cm, 30 cm, 45 cm e 60 cm.



Fonte: Elaborado pela autora

Utilizando a equação de calibração realizada no campo, os valores de θ foram calculados. Com os parâmetros da curva de retenção de água no solo (Tabela 3), obtido pelo método do papel filtro e ajustado conforme van Genuchten (1980), foram calculados os valores de potencial matricial.

Os valores encontrados para umidade saturada, que varia de 0,39 a 0,42 cm^3/cm^3 são mais condizentes com solo arenoso do que os encontrados por Caitano (2009), onde os valores variaram de 0,45 a 0,49 cm^3/cm^3 n.

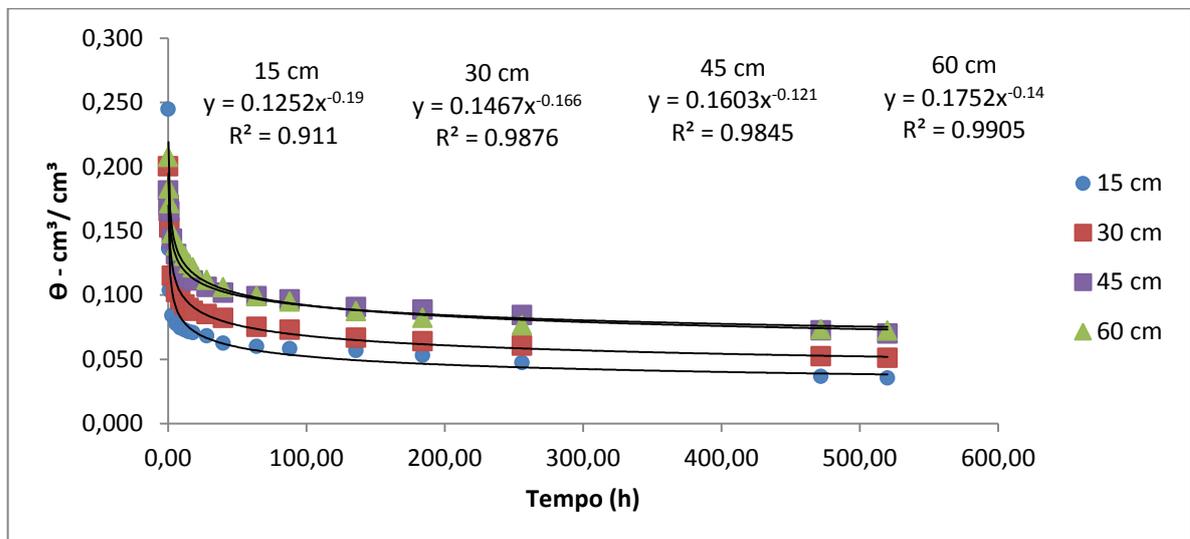
Tabela 3 - Parâmetros da equação de van Genuchten (1980), para quatro profundidades.

Prof (cm)	Parâmetros					ρ_s (g/cm^3)
	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α	n	m	
15	0.039	0.39	0.0480	14.1741	0.0806	1,64
30	0.060	0.40	0.0397	17.7670	0.0590	1,62
45	0.060	0.42	0.0818	6.5408	0.0800	1,55
60	0.010	0.42	0.0984	5.0971	0.0366	1,56

Fonte: Elaborado pela autora; θ_r e θ_s são umidade volumétrica residual e saturada respectivamente, α , m e n são os parâmetros da curva e ρ_s é densidade do solo.

Na Figura 9 observa-se o ajuste potencial da relação umidade versus tempo, com altos coeficientes de determinação para as profundidades de 30, 45 e 60 cm, sendo que na profundidade de 15 cm, o coeficiente de determinação foi baixo quando comparado às outras profundidades, podendo ser justificado pelo efeito de maiores teores de areia em superfície.

Figura 9 - Curvas de ajuste da umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição de água no solo.



Fonte: Elaborado pela autora

Na Tabela 4, apresentam-se os valores calculados de densidade de fluxo de água (q), para cada camada em 12 diferentes tempos de distribuição, sendo dz igual 15 cm, e $\delta\theta/\delta t$ a variação da umidade volumétrica pela variação do tempo.

Tabela 4 - valores de densidade de fluxo de água em cada profundidade para cada tempo

Tempo(h)	Profun. (m)	$\delta\theta/\delta t$ (h^{-1})	$q = (\delta\theta/\delta t)dz(m.h^{-1})$	$q=\Sigma(\delta\theta/\delta t)dz$ ($m.h^{-1}$)
0,5	0,15	-0,054272975	0,008140946	0,008140946
	0,3	-0,054643584	0,008196538	0,016337484
	0,45	-0,042186502	0,006327975	0,022665459
	0,6	-0,054055057	0,008108259	0,030773718
1	0,15	-0,023788	0,0035682	0,0035682
	0,3	-0,0243522	0,00365283	0,00722103
	0,45	-0,0193963	0,002909445	0,010130475
	0,6	-0,024528	0,0036792	0,013809675
7	0,15	-0,002347963	0,000352194	0,000352194
	0,3	-0,002518569	0,000377785	0,00072998
	0,45	-0,002189596	0,000328439	0,001058419
	0,6	-0,002668397	0,000400259	0,001458679
12	0,15	-0,001236324	0,000185449	0,000185449
	0,3	-0,001343423	0,000201513	0,000386962
	0,45	-0,001196621	0,000179493	0,000566455
	0,6	-0,001443429	0,000216514	0,00078297
20	0,15	-0,000673182	0,000100977	0,000100977
	0,3	-0,000740521	0,000111078	0,000212055
	0,45	-0,000674939	0,000101241	0,000313296
	0,6	-0,000806284	0,000120943	0,000434239
33	0,15	-0,000370959	5,56439E05	5,56439E05
	0,3	-0,000413001	6,19501E05	0,000117594
	0,45	-0,000385004	5,77505E05	0,000175345
	0,6	-0,000455571	6,83357E05	0,00024368
55	0,15	-0,000201988	3,02983E05	3,02983E05
	0,3	-0,000227654	3,41481E05	6,44464E05
	0,45	-0,000217156	3,25734E05	9,70198E05
	0,6	-0,000254477	3,81716E05	0,000135191
90	0,15	-0,000112411	1,68617E05	1,68617E05
	0,3	-0,000128201	1,92302E05	3,60918E05
	0,45	-0,00012503	1,87544E05	5,48463E05
	0,6	-0,000145153	2,17729E05	7,66192E05
150	0,15	-6,12082E-05	9,18122E06	9,18122E06
	0,3	-7,06669E-05	1,06E05	1,97813E05
	0,45	-7,05213E-05	1,05782E05	3,03595E05
	0,6	-8,10808E-05	1,21621E05	4,25216E05
250	0,15	-3,3328E-05	4,9992E06	4,9992E06
	0,3	-3,89529E-05	5,84294E06	1,08421E05
	0,45	-3,97766E-05	5,9665E06	1,68086E05
	0,6	-4,52909E-05	6,79363E06	2,36023E05
350	0,15	-2,23315E-05	3,34972E06	3,34972E06
	0,3	-2,63121E-05	3,94681E06	7,29653E06
	0,45	-2,72784E-05	4,09176E06	1,13883E05
	0,6	-3,0862E-05	4,62931E06	1,60176E05

Continua.

				Conclusão.
Tempo(h)	Profun. (m)	$\delta\theta/\delta t$ (h ⁻¹)	$q = (\delta\theta/\delta t)dz$ (m.h ⁻¹)	$q=\Sigma(\delta\theta/\delta t)dz$ (m.h ⁻¹)
450	0,15	-1,6559E-05	2,48386E06	2,48386E06
	0,3	-1,96287E-05	2,94431E06	5,42817E06
	0,45	-2,05811E-05	3,08716E06	8,51532E06
	0,6	-2,31739E-05	3,47609E06	1,19914E05

Fonte: Elaborado pela autora

Partindo-se dos valores de potencial matricial, calculados por meio dos parâmetros da curva característica ajustados pelo modelo de van Genuchten (1980), obtiveram-se os gráficos de potencial matricial em função do tempo t para as quatro profundidades, cujas equações ajustadas pelo modelo potencial com seus respectivos coeficientes de determinação são, $\Psi_m = 72.772t^{0.3119}$ ($R^2 = 0.94869$); $\Psi_m = 87.048t^{0.4485}$ ($R^2 = 0.9274$); $\Psi_m = 143.59t^{0.428}$ ($R^2 = 0.97820$) e $\Psi_m = 751.66t^{0.855}$ ($R^2 = 0.9908$) para as profundidade 15 cm, 30 cm, 45 cm, e 60 cm, respectivamente.

Considerando a superfície do solo como sendo a referência gravitacional, foram calculados os valores de potencial total Ψ_t , sendo ajustados em função da profundidade para os doze tempos de redistribuição avaliados neste estudo. Os gradientes de potencial total em função da distancia z são o resultado da derivação das equações de ajuste das curvas Ψ_t versus z. Os valores de condutividade hidráulica k foram, assim, determinados pela equação de Darcy-Buckingham (Tabela 5)

Tabela 5 - Valores de densidade de fluxo (q), gradiente de potencial total ($\delta\psi/\delta z$) e de Condutividade hidráulica (K) para as profundidades de 15 a 45 cm e de 30 a 60 cm.

Tempo (h)	Profundidade (m)	$q=\Sigma(\delta\theta/\delta t)dz$ (m.h ⁻¹)	$\delta\psi/\delta z$ (m.m ⁻¹)	K(m.h ⁻¹)
0,5	0,15	0,008140946		
	0,3	0,016337484	2,6035	0,0062752
	0,45	0,022665459	22,487	0,00100794
	0,6	0,030773718		
1	0,15	0,0035682		
	0,3	0,00722103	3,3606	0,00214873
	0,45	0,010130475	23,154	0,00043753
	0,6	0,013809675		
7	0,15	0,000352194		
	0,3	0,00072998	7,5572	9,6594E-05
	0,45	0,001058419	23,646	4,4761E-05
	0,6	0,001458679		

Continua.

Tempo (h)	Profundidade (m)	$q=\Sigma(\delta\theta/\delta t)dz$ (m.h ⁻¹)	$\delta\psi/\delta z$ (m.m ⁻¹)	Conclusão
				K(m.h ⁻¹)
12	0,15	0,000185449		
	0,3	0,000386962	9,5986	4,0314E-05
	0,45	0,000566455	23,142	2,4477E-05
	0,6	0,00078297		
20	0,15	0,000100977		
	0,3	0,000212055	12,077	1,7559E-05
	0,45	0,000313296	22,249	1,4081E-05
	0,6	0,000434239		
33	0,15	5,56439E-05		
	0,3	0,000117594	15,157	7,7584E-06
	0,45	0,000175345	20,864	8,4042E-06
	0,6	0,00024368		
55	0,15	3,02983E-05		
	0,3	6,44464E-05	19,134	3,3682E-06
	0,45	9,70198E-05	18,788	5,1639E-06
	0,6	0,000135191		
90	0,15	1,68617E-05		
	0,3	3,60918E-05	23,97	1,5057E-06
	0,45	5,48463E-05	15,979	3,4324E-06
	0,6	7,66192E-05		
150	0,15	9,18122E-06		
	0,3	1,97813E-05	30,291	6,5304E-07
	0,45	3,03595E-05	12,001	2,5297E-06
	0,6	4,25216E-05		
250	0,15	4,9992E-06		
	0,3	1,08421E-05	38,278	2,8325E-07
	0,45	1,68086E-05	6,6486	2,5281E-06
	0,6	2,36023E-05		
350	0,15	3,34972E-06		
	0,3	7,29653E-06	44,653	1,6341E-07
	0,45	1,13883E-05	2,1976	5,1821E-06
	0,6	1,60176E-05		
450	0,15	2,48386E-06		
	0,3	5,42817E-06	50,093	1,0836E-07
	0,45	8,51532E-06	1,6944	5,0256E-06
	0,6	1,19914E-05		

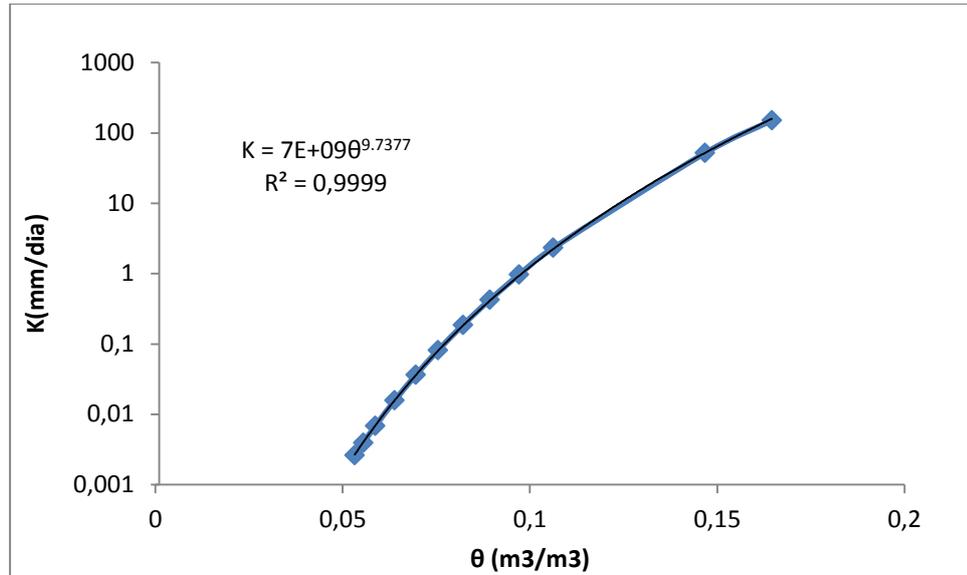
Fonte: Elaborado pela autora

Nas Figuras 10 e 11 são observados os gráficos da função $K(\theta)$ e suas análises de regressão para as profundidades 30 e 45 cm.

Mesmo que a curva da função condutividade hidráulica, determinada em condições de campo pelo método do perfil instantâneo, normalmente apresente comportamento

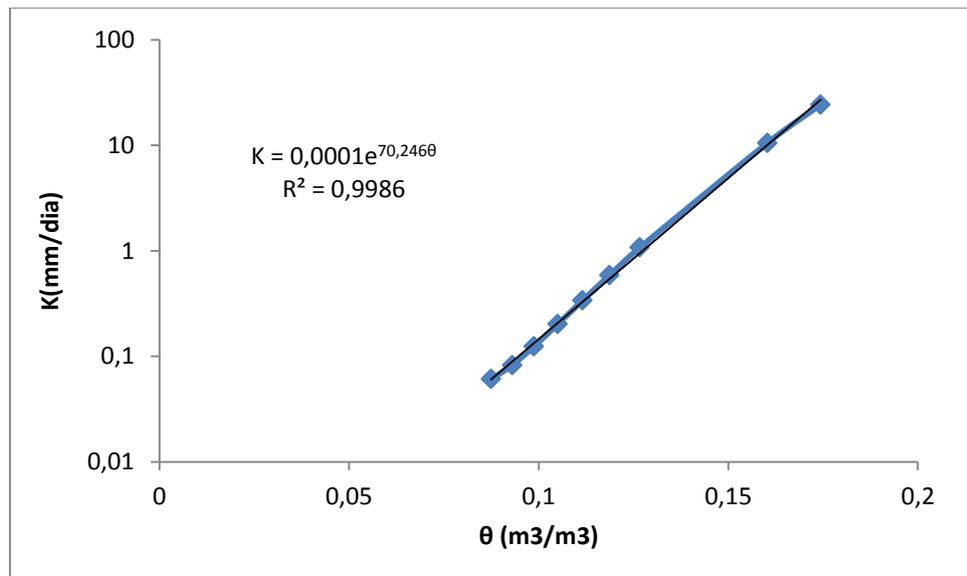
exponencial (HILLEL et al. 1972; LIBARDI et al. 1980), o melhor modelo de ajuste para a profundidade de 30 cm deste estudo foi o potencial, com coeficiente de determinação igual a 0,999. Já para a profundidade de 45 cm o modelo de ajuste foi o exponencial com coeficiente de determinação de 0,998.

Figura 10- Condutividade K em função da umidade θ a 30 cm de profundidade.



Fonte: Elaborado pela autora

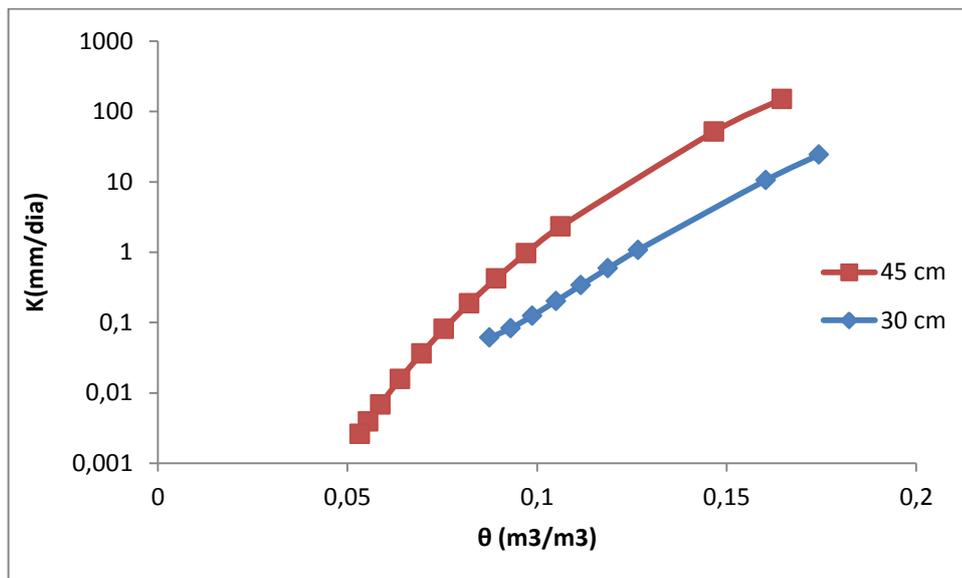
Figura 11- Condutividade K em função da umidade θ a 45 cm de profundidade.



Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se observar pela figura 12 que há uma tendência de a condutividade hidráulica do solo diminuir com a profundidade. Podendo ser explicado pelo aumento do teor de argila em profundidade, 9,6 % e 15,16 % para 15 e 45 cm de profundidade, respectivamente. No experimento de Giacheti (2000) em solos arenosos constatou-se que a condutividade hidráulica determinada em laboratório decresce com a profundidade devido à redução do número de poros desses solos.

Figura 12- Condutividade K em função da umidade θ a 30 e 45 cm de profundidade.



Fonte: Elaborado pela autora

A utilização de sensores capacitivos no método do perfil instantâneo, mostrou-se bastante satisfatória, cujos gráficos condutividade hidráulica versus umidade obtiveram coeficiente de determinação de 0,99, nas profundidades de 30 e 45 cm.

6 CONCLUSÃO

Como os dados apresentados pela calibração dos sensores capacitivos em campo e laboratório foram semelhantes, então se conclui que a umidade pode ser obtida pelo método de laboratório em função da umidade obtida pelo método de campo.

O método do perfil instantâneo utilizando sensores capacitivos se tornou menos trabalhoso, principalmente por não ser preciso ir ao experimento varias vezes ao dia, pois a memória da placa de aquisição de dados suportava até cinco dias de coleta de dados, sem precisar esvaziar.

Foi bastante satisfatória a utilização dos sensores capacitivos no método do perfil instantâneo e constitui uma alternativa ao uso do tensiômetro.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA, C.R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, p. 303-307, 2007
- ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES, E. J. **Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo**. *Pesq. Agropec. Bras.* Brasília, v. 40, n. 8, 2005
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JUNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do Solo: Conceitos e Aplicações**. Imprensa Universitária. Fortaleza. 2008. 289 p.
- BENSON C. H.; TRAST, J. M. Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. **Clays and Clay Minerals**, v. 43, n. 6, p 669 - 681,1995
- BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Washington, USDA; Sols Buletin 38, 1907. 61p.
- CAITANO, R. F. **Comparação entre metodologias de determinação da função condutividade hidráulica não saturada**. 2009. 79f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Ceara, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2009
- CRUZ, T. M. L. *et al.* Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de agua do solo, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 33-45, jan./fev. 2010
- CRUZ, T. M. L. **Estratégia de monitoramento e automação em sistemas de irrigação utilizando dispositivos de comunicação em redes de sensores sem fio**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2009
- DIRKSEN, C.; MATULA, S. Automated atomized water spray system for soil hydraulic conductivity measurements, **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 319-325, 1994
- FREITAS, W. A. *et al.* Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.3, p.268-274, 2012
- GARDNER, C.M.K.; DEAN, T.J.; COOPER, J.D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.71, n.4, p.395-403, 1998
- GIACHETI, H. L. *et al.* A condutividade hidráulica de um solo arenoso determinada a partir de ensaios de campo e de laboratório. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2000. CD-ROM
- HILLEL, D.A.; KRENTOS, V.K.; STILIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, v. 114, p. 395-400, 1972
- HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. Elsevier Academic Press, Amsterdam, 494 p, 2003

JONG van LIER, Q.; LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 23, p. 1005-1014, 1999

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. In: Quirijn de Jong van Lier (Ed). (Org.). Física do Solo. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v. 1, p. 103-152.

LIBARDI, P.L. et al. Simple field methods for estimating hydraulic conductivity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.3-7,1980

MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados**. São Paulo, USP - SP. 200p. 2005.

MARTINS, V.M.; CUNHA, J.E.C.; CASTRO, S.S.C. Diagnóstico do comportamento hídrico em Latossolo vermelho. In: **VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão**. Goiânia - GO, 2001

MOREIRA, L. C. J. **Evapotranspiração da melancia irrigada por meio do SEBAL, balanço hídrico e correlações turbulentas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2009

NAIME, J. M. et al. Propriedades hidráulicas do solo determinadas através da atenuação de raios gama. Embrapa, São Carlos, SP, 2002. ISSN 1517-4786 (Comunicado Técnico n° 48).

NWAIWU C.M.O.; AFOLAYAN J.O.; OSINUBI K.J. Reliability estimates of field hydraulic conductivity of compacted lateritic soils. **Continental J. Engineering Sciences**, v.4, p. 36 - 47, 2009

OLIVEIRA A. D. S. **Avaliação do Sensor de Umidade TOPDEA no manejo da irrigação**. 2008. 68 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

PAIGE, G.B.; HILLEL, D. Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. **Soil Science**, v. 155, p. 175-189,1993

REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. 2ª ed. São Paulo: Editora Manole Ltda, 188p. 1990

RIBEIRO FILHO, J. I. **Analises estatística no Excel: guia prático**. UFV. Viçosa, 2004

RICHARDS, L. A. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. **Soil Science**, v.51, p.377-386, 1941.

SANTOS, R.M.; OLIVEIRA, A.S.; BRANDÃO, F.J.C.; PEREIRA, F.A.C. Calibração em laboratório de sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry) para medição da umidade do solo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 35, 2006, Joao Pessoa. **Anais...** Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2006. 1 CD-ROM

SILVA, O. I. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o Monitoramento de umidade do solo**. 2005. 86f. Dissertação (mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2005

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

ZAZUETA, F.S.; XIN, J. **Soil moisture sensors**. University of Florida, 1994. 12 p. Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/08/07697.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2013. (Bulletin, 292)

CAPÍTULO 2 - CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO UTILIZANDO MÉTODO DO PAPEL FILTRO

RESUMO

As relações entre o solo e a água estão relacionadas com numerosas propriedades do solo e o seu estado de energia é um dos fatores que mais influenciam no comportamento hidráulico do solo. O gráfico que relaciona a umidade do solo com o potencial matricial é denominada curva de retenção de água do solo - CRA. Como no método tradicional para obtenção da CRA, o custo de aquisição é elevado e com longo período de tempo no alcance dos resultados, o objetivo deste capítulo foi avaliar o método do papel filtro na obtenção da curva de retenção de água em comparação com o método tradicional em cinco diferentes solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú. Na realização dos ensaios com papel filtro Whatman nº42 foram coletadas amostras de solo, com estrutura preservada, em cinco diferentes solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, a saber: Argissolo Vermelho Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico, Neossolo Quartzarênico e Planossolo. De cada solo foram coletadas 15 amostras, na profundidade de 20 a 30 cm, em cilindros de PVC com 20 mm de altura 50 mm de diâmetro. Nos mesmos perfis foram coletadas amostras de solos para utilização do método tradicional. Observando os resultados obtidos, verificou-se que o método do papel-filtro pode ser utilizado para obtenção das curvas de retenção de água dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, sendo o seu uso como alternativa ao método tradicional.

CHAPTER 2 - SOIL WATER RETENTION CURVE USING THE FILTER PAPER METHOD

ABSTRACT

The relationships between soil and water are related to many soil properties and their energy state is one of the factors that most influence the hydraulic behavior of the soil. The graph relating soil moisture with the matric potential is called the soil water retention curve. As in the traditional method for obtaining the soil water retention curve, the cost is high and long period of time in achieving results, the objective of this chapter was to evaluate the method of filter paper to obtain the soil water retention curve in comparison with the traditional method in five different soils from irrigated perimeter Baixo Acaraú. In conducting the tests with filter paper Whatman N° 42 soil samples with preserved structure were collected in five different soils of the irrigated perimeter Baixo Acaraú, namely: Argissolo Vermelho Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico, Neossolo Quartzarênico e Planossolo. Of each soil 15 samples were collected at a depth of 20 to 30 cm in PVC cylinders with 20 mm height 50 mm in diameter. In the profiles of soil samples for using the traditional method were collected. Looking at the results, it was found that the filter paper method can be used to obtain the soil water retention curves of the irrigated perimeter Baixo Acaraú, and its use as an alternative to the traditional method.

7 INTRODUÇÃO

As interações entre o solo e a água estão relacionadas com numerosas propriedades do solo. A variabilidade da umidade no solo e o seu estado de energia são fatores que influenciam no comportamento hidráulico do solo.

Como o déficit e o excesso de água disponíveis, em relação às requeridas pelas plantas, podem prejudicar a produção das mesmas, é essencial analisar o comportamento do armazenamento de água do solo, tornando-se possível a maximização da produtividade sem o desperdício de água.

O estado energético da água quando interage com a matriz do solo é expressa como potencial matricial. O gráfico que relaciona a umidade do solo com o potencial matricial é denominada como curva de retenção de água do solo (CRA). Esta relação permite saber a umidade a partir do potencial matricial e vice-versa.

São vários os métodos para a determinação da CRA. No método tradicional para obtenção da curva, é utilizado o funil de Haines para menores tensões e para as maiores tensões a câmara de pressão de Richards. O custo de aquisição elevado e o longo período de tempo, para obtenção da CRA pelo método tradicional, restringem seu uso em centros de pesquisa, por isso faz-se interessante a busca por métodos alternativos.

O método do papel filtro é um método de laboratório que vem se mostrando bastante promissor na determinação do potencial do solo, alcançando faixas bem elevadas de potencial em comparação com outras técnicas, sendo ainda mais rápido na obtenção dos resultados. Este método baseia-se no princípio de absorção de umidade pelo papel filtro até a ocorrência de equilíbrio de potencial entre o papel e o solo.

Diante do exposto o objetivo deste capítulo foi avaliar o método do papel filtro na obtenção da curva de retenção de água do solo em comparação com o método tradicional que utiliza o funil de placa porosa e a câmara de Richards em cinco diferentes solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.

Tendo como hipótese: O método do papel filtro é tão eficiente quanto o método tradicional na obtenção do potencial matricial do solo.

8 REVISÃO DE LITERATURA

8.1 Curva de retenção de água no solo - CRA

O potencial matricial de um solo varia em função do seu teor de água. A descrição dessa variação pode ser feita através de uma curva de retenção de água no solo. A CRA relaciona o potencial matricial com a umidade, gravimétrica ou volumétrica. Com o conhecimento da CRA, pode-se avaliar a capacidade de retenção de água no solo, sendo importante nos estudos da qualidade do solo e na tomada de decisão das práticas de manejo da irrigação, pois é uma das principais propriedades físicas do solo e expressa a relação entre a energia com que a água está retida na matriz do solo e o conteúdo de água no solo (SILVA et al, 2010).

Como o potencial matricial varia com o conteúdo de água no solo, sendo tanto menor quanto mais seco estiver o solo, foram desenvolvidos aparelhos e métodos que buscassem uma correlação entre ele e o conteúdo de água no solo (LIBARDI, 2010).

A CRA pode ser obtida por diferentes métodos diretos ou indiretos, em campo ou em laboratório. A escolha do método a ser empregado depende do tempo e equipamento disponíveis, dos custos envolvidos, da precisão desejada e da complexidade dos equipamentos (VIVIAN, 2008).

8.1.1 Método tradicional

Uma das técnicas tradicionais de laboratório foi proposta por Richards (1965), que determina a umidade do solo correspondente ao dado de tensão aplicada. O sistema é composto de panela de pressão, placa de cerâmica porosa e equipamentos de produção e controle de pressão, podendo usar tanto amostras indeformadas quanto deformadas.

Para as menores tensões é utilizado o funil de Haines (HAINES, 1930), sendo um dos equipamentos de sucção mais utilizados, tem como meio poroso uma placa de cerâmica que entra em contato com a mostra de solo, possuindo várias formas de instalação (HAINES, 1930; TOWNEND *et al.*, 2000). Tem como principal limitação o uso de apenas uma amostra de solo por vez e somente utilizada para baixas tensões.

Na metodologia descrita por Richards (1965) a extração de água ocorre por diferença de potencial entre a placa porosa e a amostra de solo e o fluxo de água é exponencialmente reduzido quando o potencial matricial torna-se mais negativo, especialmente quando se aproxima de -1500 kPa, despendendo de muito tempo para a obtenção da umidade da

amostra nesta tensão.

Moraes *et al.* (1993) estudando os problemas metodológicos na obtenção da CRA, observou a presença de bolhas de ar que foram provenientes do processo de saturação. A observação das bolhas dava-se no momento da transferência das amostras para as placas, podendo interferir nos resultados. Por isso é importante a embebição das amostras de solo por no mínimo 24 horas para a elevação do nível da lâmina de água até a borda superior da amostra, a fim de que bolhas de ar possam ser libertadas (KLUTE, 1986)

8.1.2 Método do papel filtro

O método do papel filtro é empregado para medir o potencial matricial ou total, baseando-se no alcance do equilíbrio do papel filtro com o fluxo de água que ocorre em um solo. Quando o papel filtro não é posto em contato direto com o solo, ocorre apenas o fluxo de vapor d'água e assim mede-se o potencial total do solo. Quando ha contato direto do papel filtro com o solo, mede-se o potencial matricial (GOMES, 2007).

O método do papel filtro e um método de laboratório e que segundo Chandler e Gutierrez (1986), mostrou-se bastante promissor na determinação do potencial do solo, alcançando faixas bem elevadas de potencial em comparação com outras técnicas. Segundo Lu e Likos (2004), os valores máximos de potencial que o método proporciona são de 500 MPa e 150 MPa para método sem contato e com contato com o solo, respectivamente.

Um aspecto importante quanto à aplicação do método do papel filtro, é a sua curva de calibração. Na literatura, verificam-se várias curvas de calibração ligeiramente distintas, propostas por diferentes autores, mas que mostram razoável concordância entre si (MARINHO; OLVEIRA, 2006). No Quadro 1 são apresentadas algumas curvas encontradas na literatura para o papel filtro Whatman n° 42.

No trabalho de Pereira (2004), o ensaio do papel filtro apresentou uma melhor sequência de dados, evidenciado pelo menor erro de estimativa em relação à câmara de pressão, e adicionalmente se observou no procedimento melhor versatilidade do ensaio devido ao menor tempo de sua execução.

Os dados de Almeida *et al.* (2011), se mantiveram consistentes com o método tradicional em que a sucção é imposta. Ou seja, mesmo sendo um método indireto, os resultados são bastante concordantes com os resultados dos métodos em que se impõe a sucção.

Quadro 1 – Equações das curvas de calibração do papel filtro Whatman N° 42

Referência	Medida	Equação de calibração
Hamblin (1981)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10^{(8,022-3,683.\log(u))}$
Chandler et al.(1992)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10^{(4,84-0,0622u)}$ para $u \leq 47\%$
	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10^{(6,05-2,48.\log(u))}$ para $u > 47\%$
Fredlund e Xing (1994)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 0,23. \left[e^{(268/u)^{0,629}} - e \right]^{2,101}$
	Potencial total	$\Psi[kPa] = 18500. \left[e^{(37/u)^{0,242}} - e \right]^{2,248}$
Leong et al. (2002)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10^{(2,909-0,0229u)}$ para $u \geq 47\%$
	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10^{(4,945-0,0673u)}$ para $u < 47\%$
	Potencial total	$\Psi[kPa] = 10^{(8,778-0,222u)}$ para $u \geq 26\%$
	Potencial total	$\Psi[kPa] = 10^{(5,31-0,0879u)}$ para $u < 26\%$
Lucas et al. (2011)	Potencial matricial	$\log\Psi[kPa] = 4,9322 - 0,0836.u$

Fonte: Elaborado pela autora; u – umidade gravimétrica do papel filtro, Ψ - potencial.

No trabalho de Pereira (2004), o ensaio do papel filtro apresentou uma melhor sequência de dados, evidenciado pelo menor erro de estimativa em relação à câmara de pressão, e adicionalmente se observou no procedimento melhor versatilidade do ensaio devido ao menor tempo de sua execução. Os dados de Almeida et al. (2011), se mantiveram consistentes com o método tradicional em que a sucção é imposta. Ou seja, mesmo sendo um método indireto, os resultados são bastante concordantes com os resultados dos métodos em que se impõe a sucção.

Em Bicalho et al. (2007), os valores de potenciais matriciais inferidos obtidos a partir de medições com papel de filtro dependem da calibragem entre a umidade do tipo de papel usado e do potencial. Os resultados do autor mostraram que os valores de potencial matricial baseados nas equações de calibração de Chandler et al. (1992) e Oliveira e Marinho (2006) concordaram com os resultados obtidos pelo tensiômetro.

9. MATERIAL E MÉTODOS

9.1 Curva de Retenção da Água no Solo

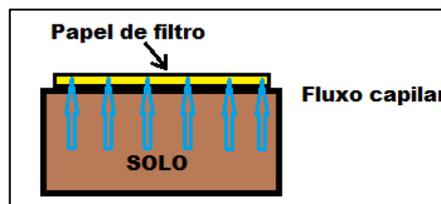
9.1.1 Método do papel filtro

Na realização dos ensaios com papel filtro Whatman n°42, cuja rotina se encontra no apêndice B, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, em cinco diferentes solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú a saber: Argissolo Vermelho Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico, Neossolo Quartzarênico e Planossolo (Apêndice C). De cada solo foram coletadas 15 amostras indeformado, na profundidade de 20 a 30 cm, em cilindros de PVC com 20 mm de altura 50 mm de diâmetro.

Para potencial matricial igual a zero foi utilizada a umidade saturada calculada pelo método indireto da porosidade.

O procedimento consiste em colocar em contato com uma amostra de solo uma fração de papel filtro com geometria e área igual ao topo do anel, de tal forma que seja estabelecido o equilíbrio de sucção entre eles (Figura 13). Nesta situação, o papel e o solo estarão com diferentes umidades, mas submetidos ao mesmo potencial mátrico.

Figura 13 - Técnica do papel filtro na medida do potencial matricial



Fonte: Elaborado pela autora

O papel filtro utilizado foi o Whatman n° 42, cujas equações de calibração (Equações 6 e 7) foram obtidas por Chandler, Crilly e Montgomery (1992), onde o potencial matricial (ψ) em kPa é estimado por uma correlação com a umidade gravimétrica do papel filtro (u).

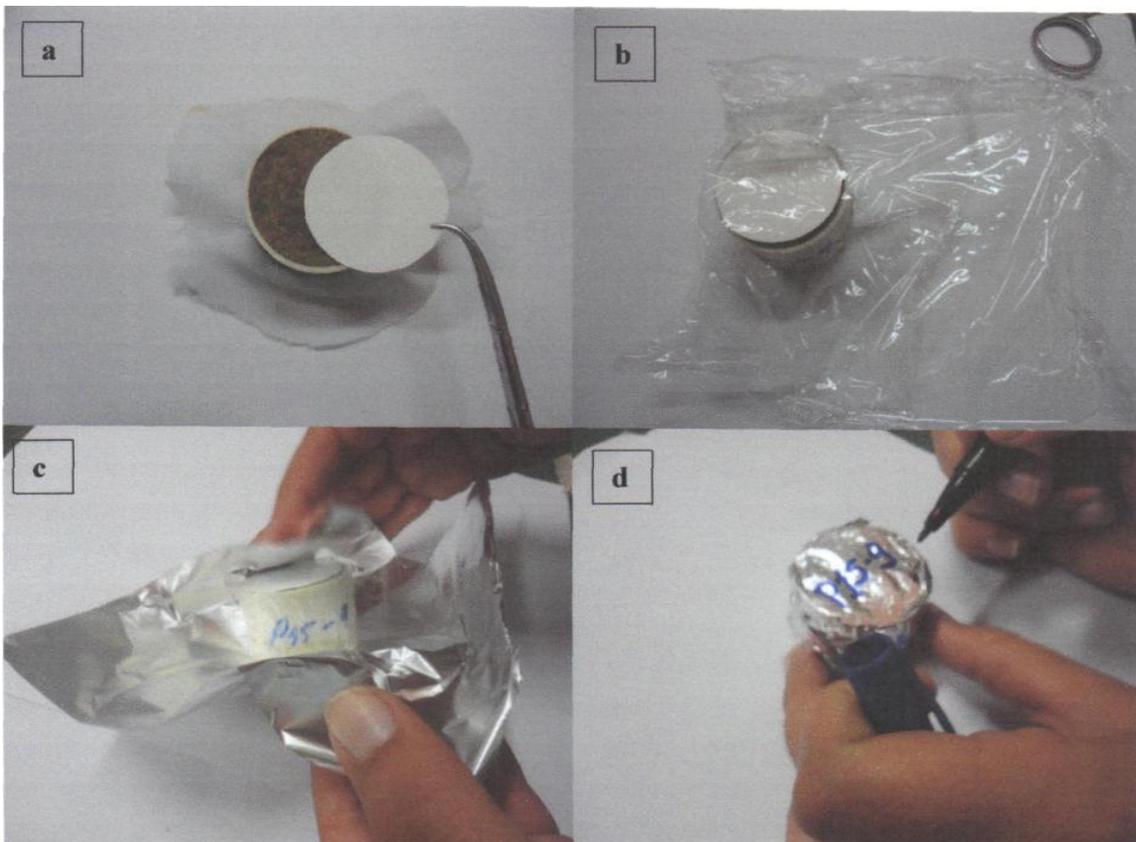
$$\text{Para } u > 47\% \quad \Psi = 10^{(6,05-2,48 \text{ Log}(u))} \quad (6)$$

$$\text{Para } u < 47\% \quad \Psi = 10^{(4,84-0,0622u)} \quad (7)$$

No Laboratório de Mecânica e Eletrônica Agrícola -LEMA, após saturação por capilaridade, todas as amostras foram expostas ao ar e com a perda de água por drenagem e evaporação, constatada por diferença gravimétrica, foi possível iniciar o ensaio do método do papel filtro, onde em cada amostra, extraída de cada solo, foi sobreposto o papel filtro Whatman n°42 com mesma medida da área transversal do cilindro.

Logo após o contato do papel filtro com o solo, as amostras foram envolvidas com filme plástico de PVC e em seguida com papel alumínio, procedimento este destinado a evitar perda ou ganho de umidade (Figura 14).

Figura 14 - Método do Papel Filtro: a - colocando o papel filtro em contato com o solo, b - envolvendo a amostra com filme plástico, c - e papel alumínio, d - identificando a amostra.



Fonte: Elaborado pela autora

O tempo adotado para deixar as amostras envolvidas pelo filme plástico de PVC e papel alumínio foi baseado nas normas da ASTM-D 5298-93, que estabelece o tempo mínimo de 07 dias requerido durante o acondicionamento, sendo o tempo para remoção do papel da amostra de solo e sua pesagem, com balança analítica de compartimento fechado com 04 casas decimais, entre 3 e 5 segundos (ASTM, 2003).

9.1.2 Método convencional

As curvas de retenção da água no solo, obtido pelo Funil de Haines e câmara de pressão de Richard (método convencional), foram determinadas também nos cinco diferentes solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, cujo mapa de solos (Apêndice C) foi citado por Alves (2006): Argissolo Vermelho Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico, Neossolo Quartzarênico e Planossolo. As coletas das amostras indeformadas foram realizadas com um amostrador do tipo Uhland, na profundidade de 20 a 30 cm.

No Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciências do Solo, as amostras foram saturadas por capilaridade e levadas ao funil de Haines onde foram determinadas as umidades para tensões menores: 0, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa. A Câmara de Pressão de Richards foi utilizada para determinar o conteúdo de água nas maiores tensões (33, 100, 300, 700 e 1500 kPa) (KLUTE, 1986).

A partir dos dados experimentais de potencial matricial e umidade, pode-se utilizar um modelo para melhor ajuste da curva e discussão de seu comportamento. O ajuste das curvas foi realizado pelo modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), utilizando o software SWRC (Soil Water Retention Curve) da ESALQ (Equação 5).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \Psi_m|^n)^m} \quad (5)$$

θ_r e θ_s são os conteúdos de água residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente, Ψ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa), α (escalonador do Ψ_m), m e n (relacionados ao formato da curva).

Para potencial matricial igual a zero foi utilizada a umidade saturada calculada pelo método indireto da porosidade.

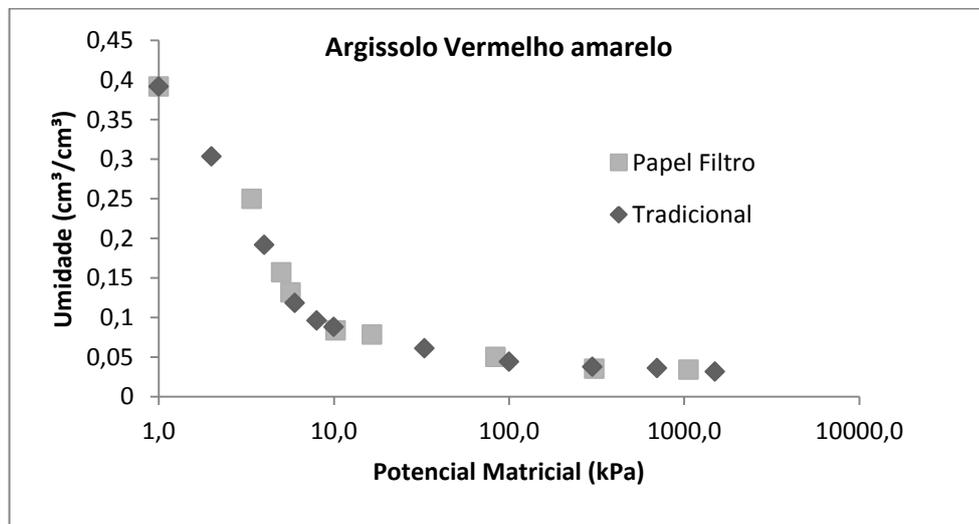
10 RESULTADOS E DISCUSSÃO

10.1 Curva de retenção de água no solo

Nas Figuras 15 a 19 são apresentados os valores da umidade volumétrica e do potencial matricial, obtidos nos ensaios com o papel filtro e com o método tradicional (câmara de Richards), de cinco diferentes solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú. Pode-se observar que os valores de potencial matricial em função de θ para os dois métodos seguiram uma mesma tendência, diferenciando apenas nas umidades mais altas.

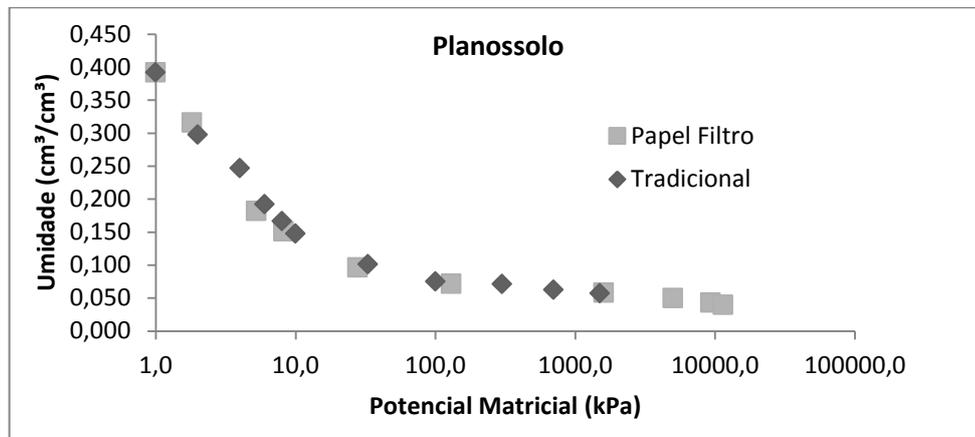
O Método do papel filtro, para todos os solos, chegou a potenciais mais altos, com exceção do Argissolo Vermelho Amarelo, isso foi devido ao ensaio do método do papel filtro não ter sido realizado em amostras mais secas neste solo, pois algumas amostras foram deformadas e apresentaram erros nos dados, assim estes dados foram retirados do ajuste.

Figura 15 – Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Argissolo Vermelho Amarelo.



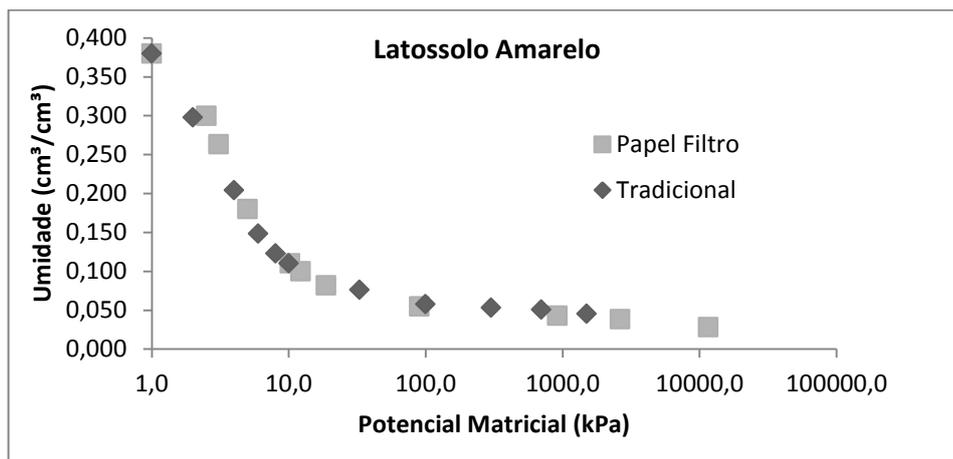
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 16 – Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Planossolo.



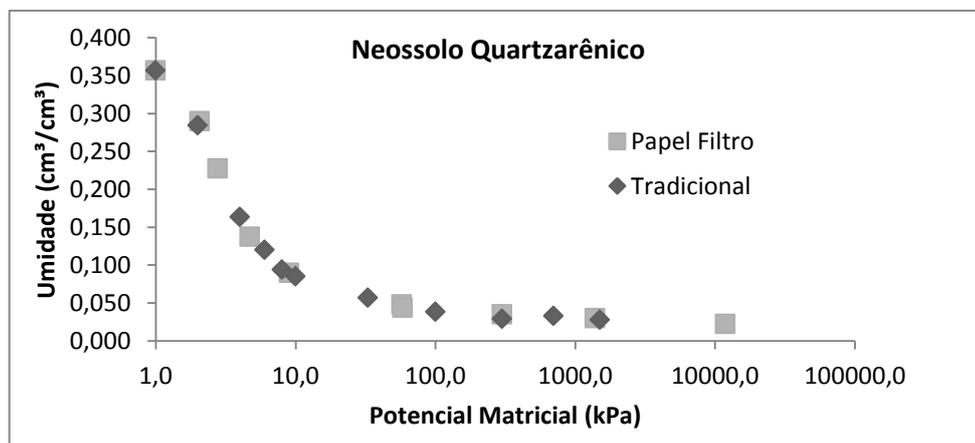
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 17 – Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Latossolo Amarelo.



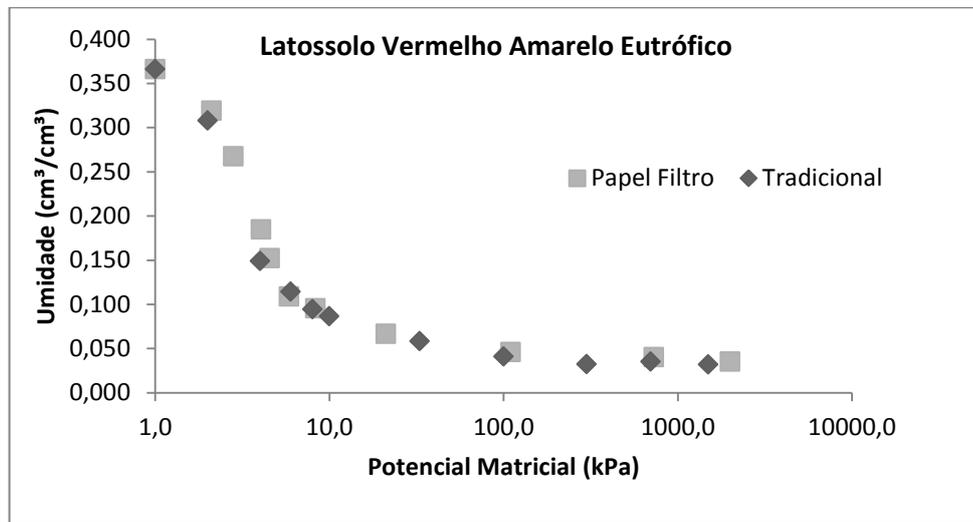
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 18 – Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Neossolo Quartzarênico.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 19 – Valores de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos pelo método tradicional e papel filtro para o solo Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico.



Fonte: Elaborado pela autora

Na Tabela 6, podem-se visualizar os parâmetros das curvas características de retenção de água no solo ajustadas pelo software SWRC utilizando o modelo de van Genuchten (1980). Todas as curvas apresentaram coeficientes de determinação maiores que 0,99, indicando correspondência entre os valores obtidos e estimados pelo ajuste. Observa-se ainda que os parâmetros de ajuste encontrados para o Neossolo Quartzarênico foram os mais próximos, podendo o método do papel filtro ser melhor indicado para este tipo de solo.

Tabela 6 - Parâmetros de ajuste das curvas características de retenção de água no solo pelo método convencional e método do papel filtro em solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú

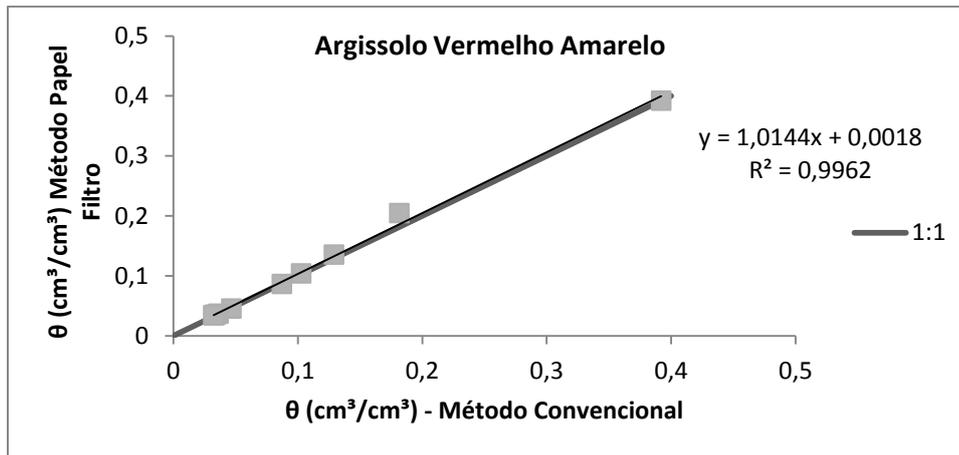
	PVA	S	LA	RQo	LVAe	PVA	S	LA	RQo	LVAe
Parâmetros	Método convencional					Papel filtro				
α	0.0537	0.05	0.0608	0.0648	0.0602	0.0444	0.085	0.0521	0.0592	0.0458
m	0.34	0.4388	0.2554	0.1016	0.0723	0.1311	0.075	0.1439	0.0983	0.2373
n	3.2785	1.6772	3.4123	9.1374	14.9684	9.8263	7.872	5.9388	10.3682	5.366
θ_r (cm³/cm³)	0.032	0.054	0.044	0.027	0.032	0.034	0.041	0.028	0.03	0.035
θ_s (cm³/cm³)	0.392	0.39	0.38	0.357	0.366	0.392	0.392	0.38	0.357	0.366
r^2	0.996	0.997	0.998	0.999	0.997	0.997	0.999	0.999	0.999	0.995

Fonte: Elaborado pela autora; Argissolo Vermelho Amarelo (PVA), Planossolo (S), Latossolo Amarelo (LA), Neossolo Quartzarênico (RQo) e Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico (LVAe). Onde θ_r e θ_s são umidade residual e umidade saturada, respectivamente, α , m e n são os parâmetros empíricos e r^2 é o coeficiente de determinação da curva.

Verifica-se que os valores de θ (cm^3/cm^3) estimados para os dois métodos, nos cinco diferentes solos, foram semelhantes (Figuras 20 a 24), principalmente para o Neossolo quartzarênico. Lucas et al. (2011) também encontraram resultados bastante semelhante entre os dois métodos para um Latossolo.

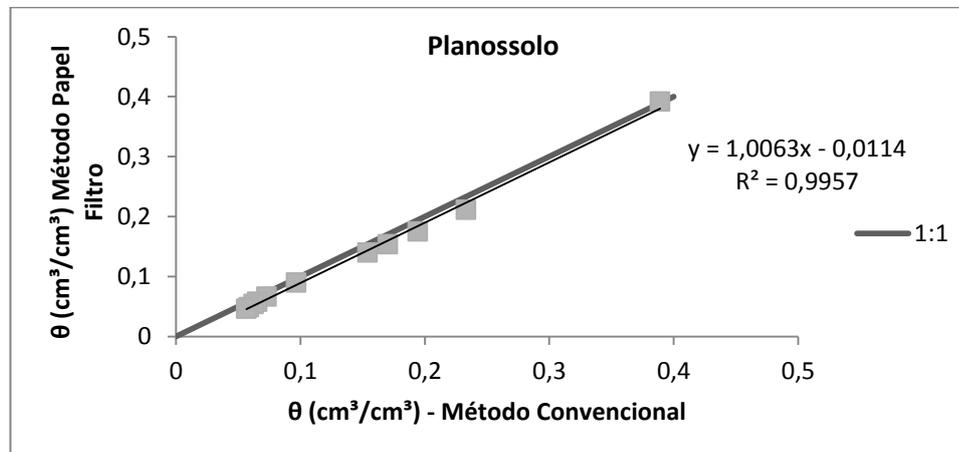
Pode-se observar nas figuras 20 a 24, que houve uma pequena superestimação dos valores de umidade para o papel filtro para os teores de água mais elevados para os Argissolo Vermelho Amarelo, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico. No Planossolo houve uma pequena subestimação dos valores de umidade. Já no Neossolo Quartzarênico houve ajuste quase perfeito.

Figura 20 – Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Argissolo Vermelho Amarelo.



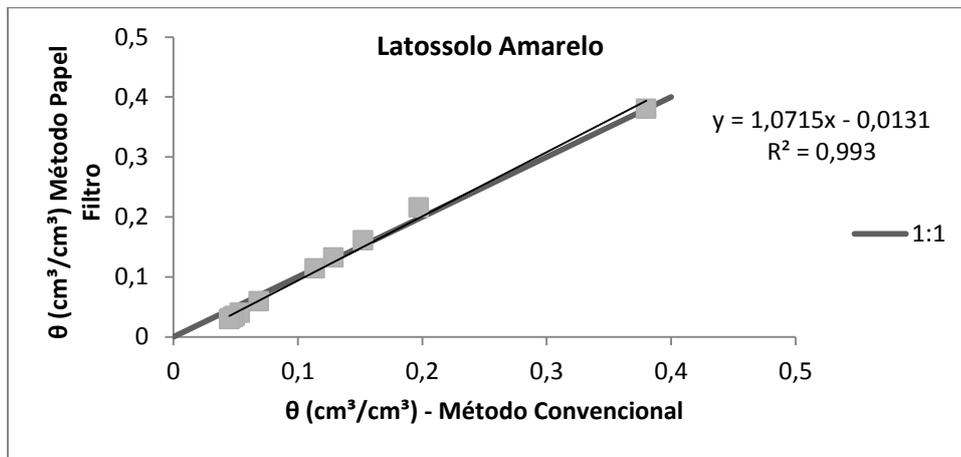
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 21 – Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Planossolo.



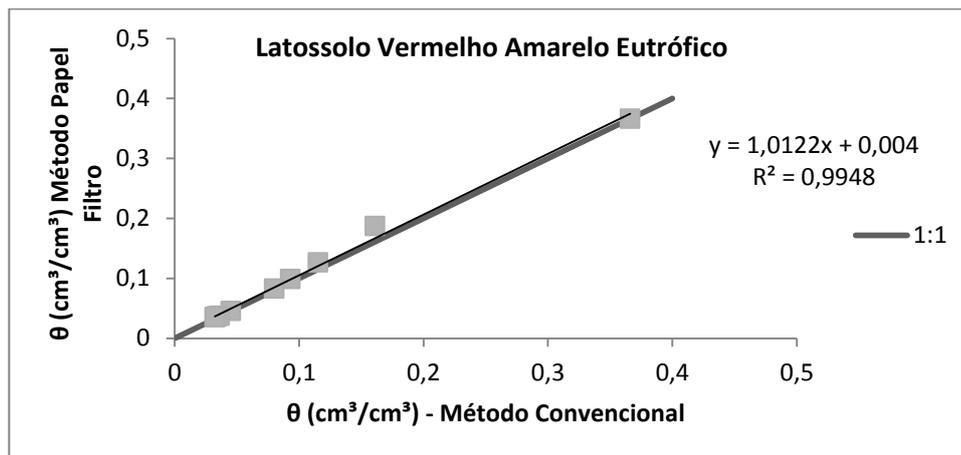
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 22 – Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Latossolo Amarelo



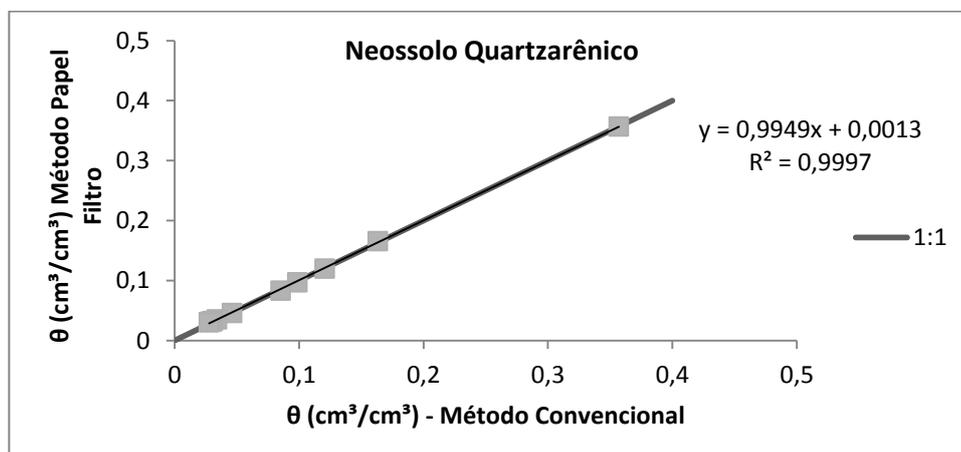
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 23 – Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 24 – Umidades volumétricas estimadas pelo método tradicional e o papel filtro, para um Neossolo Quartzarênico



Fonte: Elaborado pela autora

Como a equação de regressão estimada apenas estabelece uma relação funcional entre as variáveis X e Y , mas não esclarece se a variação de X influencia significativamente a variação de Y (RIBEIRO FILHO, 2004), foi necessário realizar uma análise de variância (ANOVA) da regressão para os cinco diferentes solos. As tabelas da ANOVA encontram-se no Apêndice A. Para os cinco solos a ANOVA de regressão, ao nível de significância de 95%, inferiu que os modelos propostos justificam 95% da variação da umidade obtida do método do papel filtro pela variação da umidade obtida pelo método convencional.

11 CONCLUSÕES

Observando os resultados obtidos, verificou-se que o método do papel-filtro pode ser utilizado para obtenção das curvas de retenção de água dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, sendo o seu uso como alternativa metodológica ao método tradicional.

O método do papel filtro mostrou-se eficiente principalmente no Neossolo Quartzarênico, constituindo seu uso uma alternativa viável especialmente neste solo do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. L.; et al. Obtenção de curvas características de retenção de água no solo obtidas por diferentes métodos. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Associação Brasileira de Ciências do Solo, 2011
- ALVES, N. N. L. **Proposta de elaboração de um sistema de informação geográfica para programação da irrigação parcelar do perímetro irrigado do Baixo Acaraú.** 2006. 72 f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2006
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.** 2003, 6p. ASTM-D 5298-03
- BICALHO, K.V.; CORREIA, A.G.; FERREIRA, S.; FLEUREAU, J.M.; MARINHO, F.A.M. The use of filter paper method for matric suction measurement of an unsaturated compacted silty sand. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SOLOS NAO SATURADOS, Salvador, 2007. **Anais...** Salvador, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2007. p.215-219
- CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise-buildings. **Proceeding of the Institute of Civil Engineering**, v. 92, n. 2, p. 82-89, 1992
- CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Geotechnique**, v. 36, p. 265-268, 1986
- FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-Water characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p.521-532
- GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental.** Piracicaba: Ed. Centro Acadêmico Luiz de Queiroz, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1976. 250p
- GOMES, J. E. S. **Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007
- HAINES, W.B. Studies in the physical properties of soil. **J. Agric. Sci.**, 20:97-116, 1930.
- HAMBLIN, A. P. Filter paper method for routine measurement of field water potential. **Journal of Hydrology**, v. 53, n. 3-4, p. 355-360,1981
- KLUTE, A. **Water retention: laboratory methods.** In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil analysis. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p.635-662, 1986
- LEONG, E. C; HE, L.; RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v.25, n.3, p. 322-333, 2002
- LIBARDI, P. L. **Água no solo.** In: Quirijn de Jong van Lier (Ed). (Org.). Física do Solo. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v. 1, p. 103-152

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; CÁSSARO, F. A. M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro, **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p.1957-1973, 2011

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated soil mechanics**. New Jersey: John Wiley e Sons, Inc., 2004, 556 p

MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The filter paper method revisited. **Geotechnical testins Journal**, West Conshohocken, v. 29, n. 3, p. 1-9, 2006

MORAES, S. O. ; LIBARDI, P. L. ; DOURADO NETO, D. . Problemas Metodológicas na Obtenção da Curva de Retenção da Agua pelo Solo. **Scientia Agricola**, v. 50, n. 3, p. 383-392, 1993

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. Evaluation of filter paper calibration. **UNSAT**, 2006

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. Tese (doutorado em Engenharia Geotécnica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004

RIBEIRO FILHO, J. I. Análises estatística no Excel: guia prático. UFV. Viçosa, 2004

RICHARDS, L. A. **Physical conditions of water in soil**. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGE, L. E.; CLARK, F. E., ed. *Methods of soil analysis – Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. Madison, ASA-SSSA, 1965. p.128-152

SHAPIRO, S. S; WILK, M. B. An analysis of variance for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. **Indicadores da qualidade física do solo**. In: Quirijn de Jong van Lier (Ed). (Org.). *Física do Solo*. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v. 1, p. 241-281

TOWNEND, J.; REEVE, M.J.; CARTER, A. **Water release characteristic** In: SMITH, K.A., ed. *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York, Marcel Dekker Incorporated, 2000. p.95-140.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VIVIAN, J. B. **A curva de retenção de água pode ser obtida por diferentes métodos diretos ou indiretos, em campo ou em laboratório**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2008

CAPITULO 3 – AVALIAÇÃO DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS DO PERÍMETRO IRIGADO BAIXO ACARAÚ.

RESUMO

A caracterização e estudo de solos são a base para determinação do uso da terra. O conhecimento da dependência espacial dos atributos físico-hídricos do solo é importante, visto que é fundamental para o entendimento do comportamento desses atributos no espaço e assim permite realizar práticas de manejo diferenciado. O objetivo deste capítulo é aplicar geoestatística na elaboração de mapas de atributos físico-hídricos dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú. Para a caracterização físico-hídrica dos solos do Perímetro, foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e indeformada na profundidade de 20-30 cm, em uma malha irregular de 34 pontos amostrais distribuídos por toda a área de estudo. Foram feitas as seguintes análises laboratoriais: granulometria, densidade do solo e partículas e porosidade total, foram também obtidas curva de retenção de água no solo pelo método do papel filtro e condutividade hidráulica pelo permeâmetro de carga constante e infiltrômetro de tensão. Com os dados obtidos foram realizada a análise estatística descritiva e análise geoestatística com avaliação da dependência espacial. Por meio da Krigagem foram obtidos os mapas dos atributos avaliados. Os mapas de areia, argila, densidade das partículas e umidade na capacidade de campo apresentarem as melhores validações cruzadas, podendo estes ser usados como base de dados na elaboração dos projetos e manejo da irrigação no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.

CHAPTER 3 - SPATIAL DEPENDENCY OF PHYSICAL AND HYDRAULIC PROPERTIES OF SOILS PERIMETER IRIGADO BAIXO ACARAÚ

ABSTRACT

The characterization and study of soils are the basis for determining land use. Knowledge of the spatial dependency of physical and hydraulic properties of the soil is important, since it is fundamental to understanding the behavior of these attributes in space and thus allows performing different management practices. The purpose of this chapter is to apply geostatistics in mapping physical -hydric soil attributes of Irrigated perimeter Baixo Acaraú. For physico-hydraulic characterization of soils Perimeter, soil samples were collected deformed and structure in undisturbed depth of 20-30 cm, in an irregular grid of 34 sampling points across the study area. The following laboratory tests were performed: particle size, bulk density and particle and porosity were also obtained from water retention curves in the soil by the filter paper method and hydraulic conductivity at constant head permeameter and infiltrometer tension. With the data obtained descriptive statistical analysis and geostatistical analysis to evaluate the spatial dependence were performed. Through Kriging maps of attributes evaluated were obtained. The maps of sand, clay, particle density and moisture at field capacity presenting the best cross-validations, and these may be used as a database in the preparation of projects and irrigation management in the Irrigated Perimeter Baixo Acaraú

12 INTRODUÇÃO

Assim como o ar e a água, o solo possui grande importância na vida de todos os seres vivos. A caracterização e estudo de solos são a base para determinação do uso da terra, pois se inadequado provoca a degradação com consequências na capacidade produtiva e na qualidade de vida das populações dependentes destes solos.

Os atributos físicos dos solos influenciam diretamente o fluxo superficial e o movimento da água no solo, sendo fundamentais para o manejo da irrigação. A variação desses atributos é o produto da ação dos fatores de formação do solo interagindo com o espaço em diferentes escalas de tempo.

A geoestatística é priorizada quando um determinado atributo do solo varia de um local para outro com certa continuidade, que é expressa através da dependência espacial.

O conhecimento da dependência espacial dos atributos físico-hídricos do solo é importante, visto que é fundamental para o entendimento do comportamento desses atributos no espaço e assim permite realizar o zoneamento da área em glebas que receberão práticas de manejo diferenciado. A construção de mapas com a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos possibilita a visualização espacial, permitindo determinar áreas que requerem maiores cuidados de conservação do solo.

Diversos são os trabalhos que abordam a dependência espacial de propriedades hidráulicas do solo (WARRICK e NIELSEN, 1980; JONG VAN LIER e LIBARDI, 1999; CAMPOS et al., 2007), pois como o solo é o principal reservatório de água para as plantas, fica evidente a essencialidade da determinação de suas propriedades hidráulicas como condutividade hidráulica, $K(\theta)$ e a curva de retenção de água no solo, $h(\theta)$, já que condicionam a dinâmica da água e são necessárias para compreender parte dos processos de transferência no sistema solo-água-planta-atmosfera.

Tendo em vista o exposto, o objetivo deste capítulo é aplicar geoestatística na elaboração de mapas de atributos físico-hídricos dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú

Sendo a hipótese: Os atributos físicos dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú possuem dependência espacial e essas podem ser estimadas por semivariogramas, possibilitando a elaboração de mapas e visualização de áreas que merecem manejo diferenciado.

13 REVISÃO DE LITERATURA

13.1 Importância de atributos físicos do solo

O solo é considerado como um conjunto de partículas sólidas de diversas formas e tamanhos, entremeadas por poros interconectadas (LIBARDI, 2010). O solo é constituído de um sistema composto por três fases: sólida, líquida e gasosa. A sólida é formada por material orgânico e inorgânico. A fase líquida é constituída pela solução do solo ou água do solo e compõe-se de água, sais dissolvidos e material coloidal em suspensão. A fase gasosa é o ar do solo.

É importante caracterizar os atributos físicos do solo, pois são empregados no equacionamento de problemas gerados pela utilização do solo, seja para as áreas da ciência do solo, bem como de outros ramos da ciência (FERREIRA, 2010). A análise dos atributos físicos do solo é importante na tomada de decisão na implantação do sistema de irrigação, como também na escolha da cultura a ser implantada e no manejo do solo.

13.1.1 Densidade e porosidade

Dentre as propriedades físicas do solo, uma das mais sensíveis ao manejo é a estrutura, cuja qualidade pode ser analisada segundo variáveis relacionadas com sua geometria porosa (ALBUQUERQUE et al., 1995) e estabilidade (CAMPOS et al., 1995).

Para Silveira Neto (2006), quando se trata de solos argilosos, um aspecto a ser estudado é a estrutura do solo, cuja importância, tendo em vista o desenvolvimento radicular das plantas, associa-se à porosidade total e à distribuição dos poros por tamanho.

Por definição, a densidade do solo é a razão de sua massa de sólidos por seu volume total. Normalmente as determinações de densidade e de porosidade do solo são as avaliações mais comuns e difundidas para identificar camadas compactadas no solo (LANZANOVA, 2007). A porosidade de aeração e a fração do volume do solo que é ocupado por ar, ou seja, e a fração entre o volume de ar e o volume de solo. A porosidade de aeração e, portanto, função da umidade do solo (LIBARDI, 2000).

13.1.2 Textura do solo

A textura do solo é uma das características físicas mais estáveis e representa a

distribuição quantitativa das partículas sólidas quanta ao tamanho (FERREIRA, 2010). Cada tipo de partícula presente contribui para a natureza do solo como um todo. As partículas maiores funcionam como o esqueleto do solo e ajudam a tornar o solo permeável e bem areado (THOMPSON; TROEH, 2007). A argila juntamente com matéria orgânica armazena água e nutrientes vegetais.

13.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica mede a habilidade do solo em conduzir água e é uma das propriedades físicas do solo mais importantes no movimento de água no solo e no dimensionamento de sistemas de drenagem. A sua determinação pode ser feita utilizando-se método de campo e laboratório como o infiltrômetro de tensão e o permeâmetro de carga constante, respectivamente.

13.2.1 Infiltrômetro de tensão

É desejável que os métodos e as técnicas utilizadas para quantificar as propriedades hídricas não provoquem perturbações adicionais no solo e que forneçam valores representativos, com precisão e exatidão (SILVA E LIBARDI, 2000). Então visando suprir estas exigências, pesquisadores desenvolveram vários aparelhos e técnicas de medidas, dentre as quais se destaca o infiltrômetro de tensão ou permeâmetro de disco (PERROUX E WHITE, 1988), que permite a estimativa, no campo, da condutividade hidráulica próxima à saturação.

Silva e Libardi (2000) comprovaram a eficácia do infiltrômetro na determinação das propriedades hidráulicas. No estudo dos autores foi possível detectar variações nos valores do fluxo e da sorvidade, como também as variações decorrentes da própria estrutura do solo (menos ou mais compactado).

Wang et al. (1998), utilizaram o infiltrômetro de tensão com diferentes diâmetros de disco, verificando que os macroporos do solo podem desempenhar um papel mais importante na variabilidade espacial do solo, do que o tamanho físico do disco na determinação das propriedades hidráulicas do solo. Já Antonino et al. (2001), verificou com o infiltrômetro de tensão que a condutividade hidráulica do solo, em condição de umidade próxima a saturação foi maior para a camada arenosa que para a camada argilosa de um Neossolo flúvico.

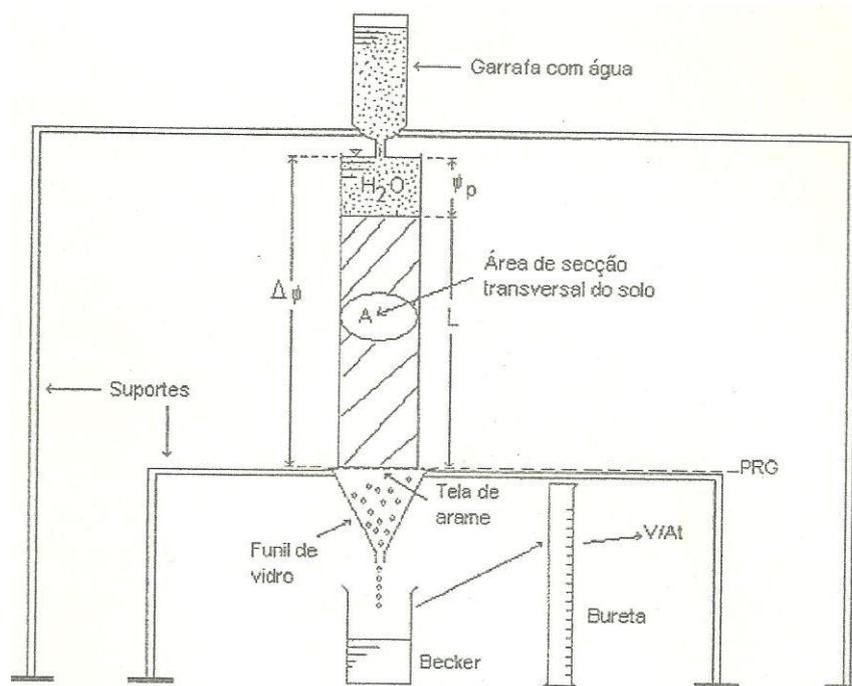
Já no trabalho de Hu et al, (2008) as propriedades hídricas foram determinadas com um infiltrômetro de disco com diferentes cargas hidráulicas (-15, -9, -6, -3, 0 cm). Os

resultados mostraram que a variação das condutividades hidráulicas em todas as cargas aplicadas foi moderada e que a heterogeneidade das condutividades hidráulicas aumentou à medida que a carga hidráulica aumentava.

13.2.2 Permeâmetro de carga constante

O permeâmetro de carga constante é um dos métodos de laboratório mais utilizados na obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado (KLUTE E DIRKSEN, 1986). O método consiste em manter uma lâmina constante de água sobre uma amostra de solo indeformada, coletando-se o volume de água drenado em intervalos de tempo conhecidos (AMARO FILHO, ASSIS JUNIOR, MOTA, 2008). Na Figura 25, pode-se verificar o esquema de um permeâmetro de carga constante utilizando uma garrafa com água para manter a lâmina constante.

Figura 25 - Esquema de um permeâmetro de carga constante



Fonte: Amaro Filho, Assis Junior, Mota (2008)

Quando a condição de regime estacionário é atingida, a equação de Darcy é aplicada, sendo V o volume de água que passou pela amostra no tempo t , A a área da seção transversal da amostra, L o comprimento da amostra e $\Delta\Psi$ a diferença de potencial total nos pontos considerados (equação 1).

$$K_o = \frac{V.L}{A.t.(\Delta\Psi)} \quad (1)$$

Marques et al. (2008), utilizando o permeâmetro de carga constante e permeâmetro de carga decrescente na obtenção da condutividade hidráulica saturada, constataram que método do permeâmetro de carga constante foi o mais apropriado para a classe dos Latossolos estudados, apresentando os menores coeficientes de variação e desvio padrão ao longo de uma topossequência.

13.3 Dependência espacial

O solo é formado por processos resultantes da interação dos seus fatores de formação (material de origem, clima, organismos, relevo e tempo). A interação e a intensidade desses fatores dão origem a solos com diferentes características químicas, físicas e biológicas (PEDROTTI; MELLO JUNIOR, 2009)

O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas do solo podem auxiliar nas escolhas das melhores estratégias para o manejo do solo e da irrigação (SOUSA; QUEIROZ; GHEYI, 1999). Para Grego e Vieira (2005), o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, atualmente e considerado o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, em qualquer escala.

Dentre as propriedades do solo, o que apresenta maior variabilidade e a condutividade hidráulica, por ser influenciada por todas as propriedades que afetam a distribuição, o tamanho e a forma dos poros, como por exemplo a textura, estrutura, densidade e matéria orgânica. Marques et al. (2008) mostraram que mudanças na condutividade hidráulica saturada estiveram mais relacionadas a alterações nas propriedades físicas do solo e posição no relevo do que nas alterações das coberturas vegetais ao longo da topossequência. Em Brito (2010) verifica-se que os valores mais elevados de condutividade hidráulica do solo saturado corresponderam aos locais mais baixos da área experimental.

Dalbiano (2009) constatou que elevada condutividade hidráulica saturada tem correspondência com áreas de relevo forte ondulado, com alta pedregosidade e perfil raso, em que predomina a mata nativa como cobertura vegetal. Em áreas com prática do manejo convencional do solo, onde o relevo é mais plano, também foram encontradas áreas com elevada condutividade hidráulica saturada.

No trabalho de Cavalcante et al. (2011), os diferentes usos e manejo do solo

influenciaram no teor de água no solo, com dependência espacial forte e moderada, indicando que os atributos físicos não são aleatórios no espaço. Os maiores alcances foram observados no plantio direto, pois o sistema de manejo conservacionista cria, ao longo do tempo, uma estabilidade maior quando comparado com o preparo convencional. Já Carvalho et al. (1998) somente com o sistema de rotação utilizando diferentes culturas verificou correlação espacial para o conteúdo de matéria orgânica em diferentes sistemas.

Silva et al. (1986) utilizando amostras compactadas artificialmente, mostraram a influencia do aumento da densidade nas propriedades físicas de dois latossolos, ocorrendo uma acentuada queda nos valores, por consequência da diminuição do espaço poroso.

Em Grego e Vieira (2005) a densidade do solo aumentou na direção do declive, que apresentou maior densidade do solo, maior resistência à penetração e uma maior retenção de água no solo.

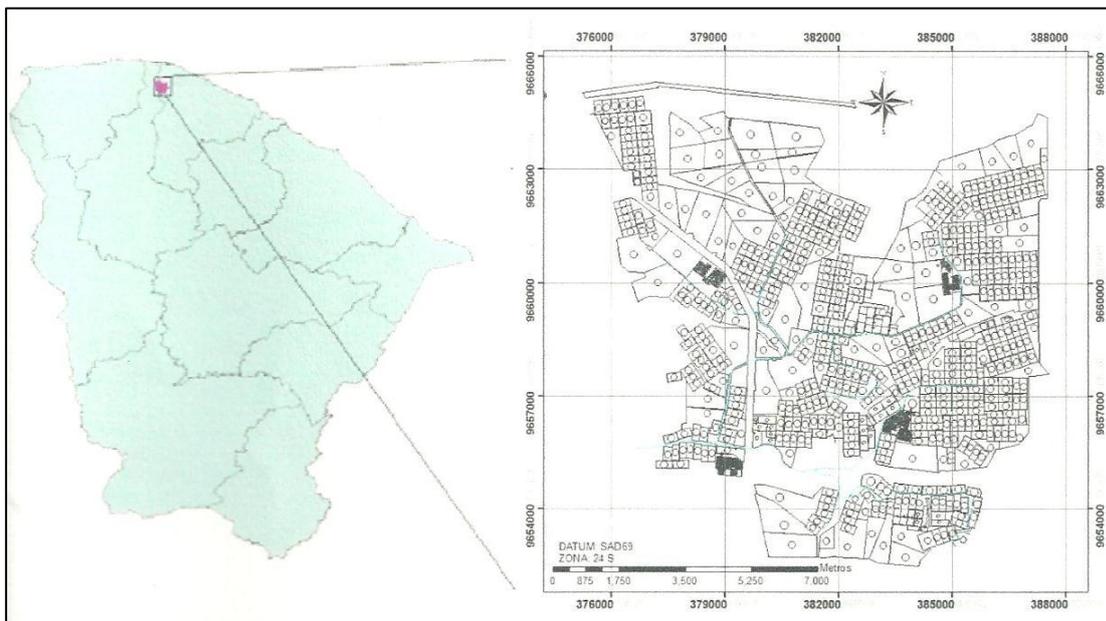
Para as porcentagens de areia, silte e argila, Sousa et al. (1999) observou que todas as variáveis estudadas apresentaram estrutura de dependência espacial, sendo porcentagem de silte a que apresentou o menor alcance (25m) para profundidade de 0 - 0,20 m e maior alcance (60 m) para a profundidade 0,20 - 0,40 m de dependência espacial. Na profundidade de 0 - 0,20 m predominou dependência espacial moderada e na camada de 0,20 - 0,40 cm, uma forte dependência espacial.

14 MATERIAL E MÉTODOS

14.1 Descrição da área

O Perímetro Irrigado Baixo Acaraú esta inserido no divisor topográfico de duas bacias hidrográficas, na parte baixa da Bacia Hidrográfica do rio Acaraú e na Bacia Litorânea; localizado na região setentrional do Estado do Ceará (Figura 26). Os municípios abrangentes são: Acaraú, Marco e Bela Cruz. O Perímetro ocupa uma área de aproximadamente 10 mil hectares, 8335 ha irrigados.

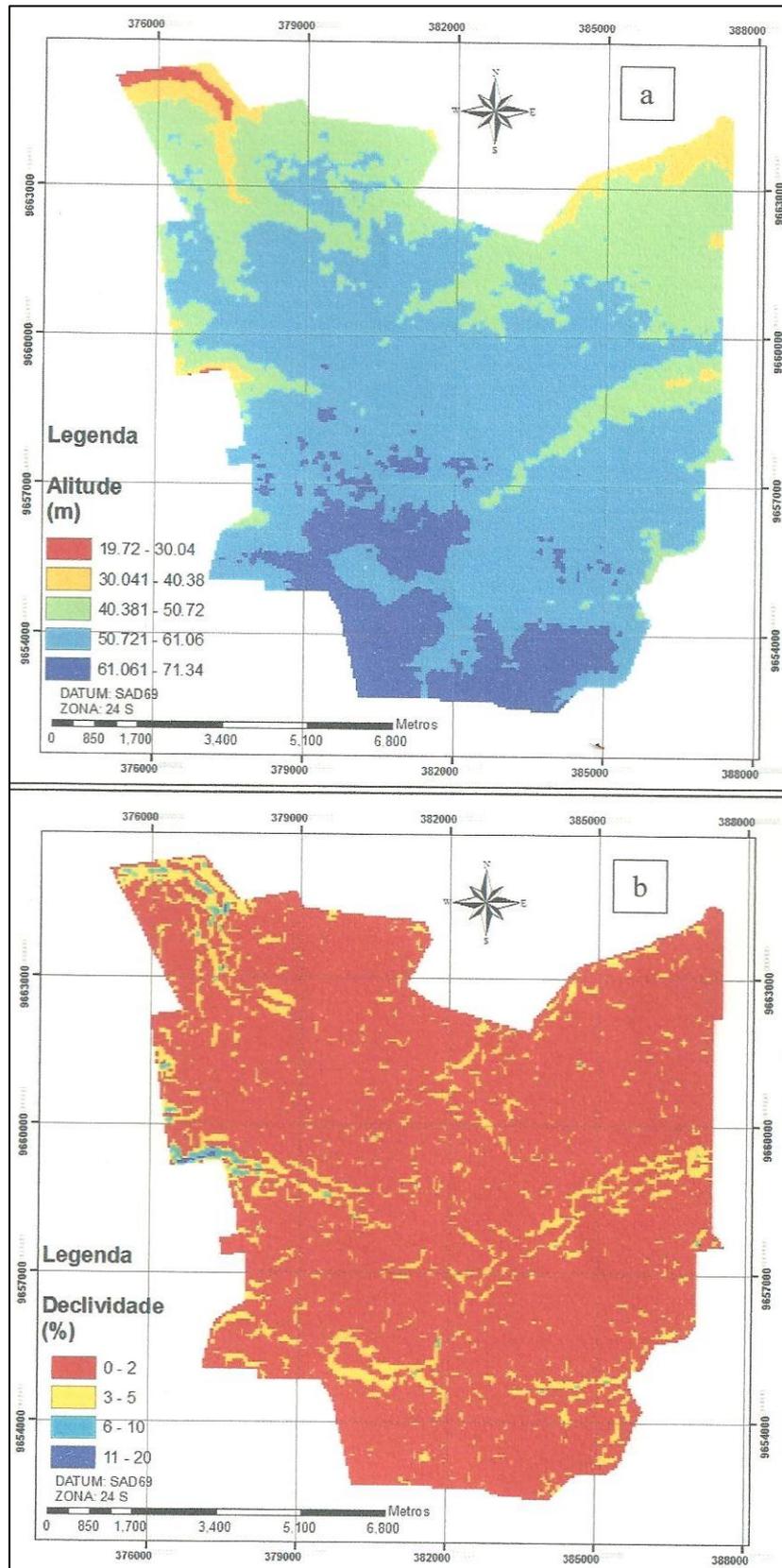
Figura 26 - Localização do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú



Fonte: Elaborado pela autora

Quanto ao relevo, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), proveniente dos dados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), o Perímetro apresenta gradiente altimétrico de 51,62 m, distribuído entre as cotas de 19,72 a 71,34, conforme visualizado na Figura 27a. Já na Figura 27b, pode-se observar que a área do Perímetro apresenta predominância de declividade plana (0 a 2 %).

Figura 27 - Mapas de altitude (a) e declividade (b) do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, obtidas com imagem SRTM

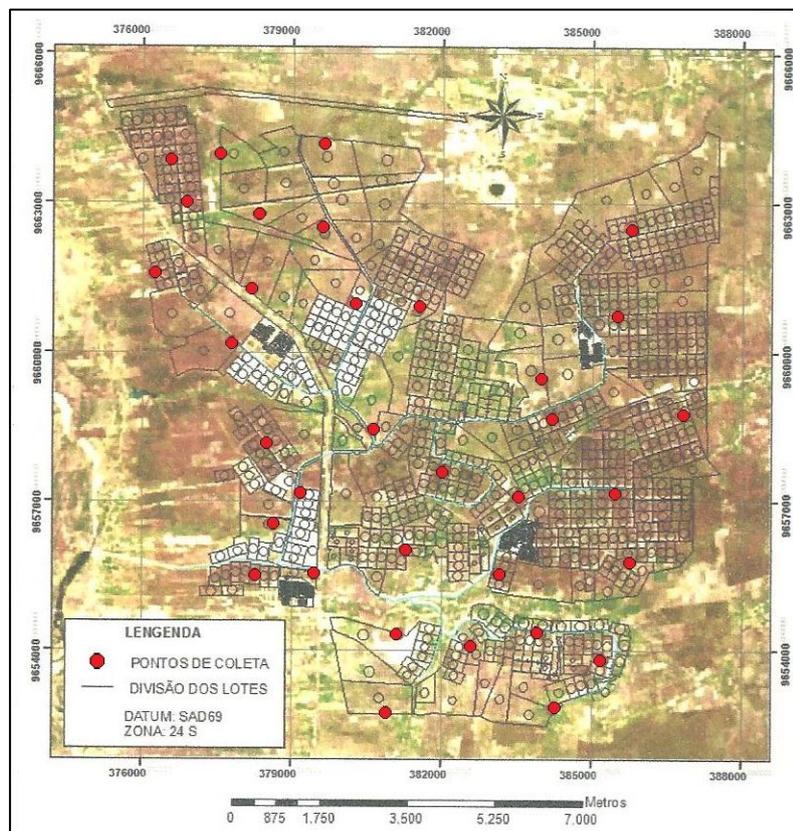


Fonte: Elaborado pela autora

14.2 Coleta de solo

Para a caracterização físico-hídrica dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e indeformada na profundidade de 20-30 cm, em uma malha irregular de 34 pontos amostrais distribuídos por toda a área de estudo (Figura 28). As amostras foram devidamente identificadas e encaminhadas para os laboratórios de Física do Solo do Departamento de Ciências do Solo e de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Figura 28 - Pontos de coleta no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.



Fonte: Elaborado pela autora

14.3 Análises laboratoriais

14.3.1 Granulometria

As amostras deformadas foram secas ao ar e passadas em peneiras de 2,0 mm, obtendo assim terra fina seca ao ar (TFSA).

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta, com dispersão de 20 g de TFSA com hidróxido de sódio 1 mol.L⁻¹. As areias foram separadas em peneira de malha 0,053

mm de diâmetro. O silte e argila foram separados por sedimentação, conforme a Lei de Stokes. A distribuição das partículas por tamanho (Tabela 7) foi classificada de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Tabela 7 - Distribuição das partículas por tamanho

CASCALHO	AREIA MUITO GROSSA	AREIA GROSSA	AREIA MÉDIA	AREIA FINA	AREIA MUITO FINA	SILTE	ARGILA
2,00mm	1,00mm	0,5mm	0,25mm	0,1mm	0,05mm	0,002mm	

Fonte: Citada por Amaro Filho, Assis Junior e Mota (2008)

14.3.2 Densidade

Para densidade do solo (Equação 3) foram utilizadas amostras de solo indeformado, coletadas com amostrador tipo Uhland e secas a 105 °C até massa constante.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad 3$$

ρ_s - densidade do solo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); m_s - massa do solo seco (kg); V_s - volume do solo (m^3)

Para determinação da densidade de partículas foi utilizado o método do balão volumétrico, que consiste em colocar 20g de terra fina seca em estufa em um balão volumétrico de 50 mL, completando seu volume com álcool. Na equação 8 e mostrado o calculo para obtenção da densidade das partículas.

$$\rho_p = \frac{m_s}{50 - \text{volume de álcool gasto}} \quad (8)$$

ρ_p - densidade das partículas ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); m_s - massa do solo seco (kg)

14.3.3 Porosidade Total

A porosidade total será determinada pelo método indireto, utilizando a Equação 9.

$$Porosidade (\%) = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

ρ_s - densidade do solo (kg.m^{-3}) ρ_p - densidade das partículas (kg.m^{-3})

14.4 Curva de retenção de água no solo

Para obtenção da curva de retenção de água no solo, nos 34 pontos (Figura 28), foi utilizado o método do papel filtro, onde sua eficácia nos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú foi comprovada no capítulo 2 e a rotina do método do papel filtro está contida no apêndice B.

14.5 Condutividade hidráulica

14.5.1 Permeâmetro de carga constante

Para medir a condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante, foram coletadas duas amostras de solo indeformadas com 7,17 cm de altura por 7,05 cm de diâmetro, utilizando amostrador do tipo Uhland, em cada um dos 34 pontos amostrais no Perímetro.

O método consiste em manter uma lamina constante de água e coleta do volume de água drenado em conhecidos intervalos de tempo (Figura 29). Outras informações sobre o método estão contidas em Amaro Filho, Assis Junior e Mota (2008)

A condutividade hidráulica saturada foi determinada pela lei de Darcy (Equação 10)

$$q = -K \frac{\Delta\Psi}{Z} \quad (10)$$

q é a densidade de fluxo em mm/h, K é a condutividade hidráulica em mm/h e $\Delta\Psi/Z$ é o gradiente de potencial em mm/mm.

Figura 29 - Método do permeâmetro de carga constante



Fonte: Elaborado pela autora

14.5.2 Infiltrômetro de tensão

O modelo de infiltrômetro de tensão desenvolvido por Perroux e White (1988) foi utilizado para obter a condutividade hidráulica do solo saturado e próximo a saturação. O infiltrômetro tinha área da base de 123 cm^2 (Figura 30). As amostras foram tomadas em 30 pontos amostrais no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, a 30 cm de profundidade, nas tensões de 0 e 0,5 kPa. Para perfeito contato, a superfície do solo foi aplainada e depositada uma camada de areia menor que 0,5 cm. O ensaio de infiltração só foi concluído quando quatro leituras consecutivas apresentarem resultados similares, assim o processo de infiltração da água no solo atingiu o regime estacionário.

Figura 30 - Infiltrômetro de tensão



Fonte: Elaborado pela autora

Com as medidas do fluxo para duas tensões, é possível determinar a condutividade hidráulica para cada tensão aplicada, segundo as equações 11, 12 e 13, baseado no método de Ankeny et al. (1991).

$$K_1 = \frac{q_1}{1 + \frac{4}{\pi r \alpha}} \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{q_2}{1 + \frac{4}{\pi r \alpha}} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{2(q_1 - q_2)}{\Delta\tau(q_1 + q_2)} \quad (13)$$

K_1 e K_2 são as condutividades hidráulicas para as tensões 1 e 2, respectivamente, q_1 e q_2 são os fluxos para as tensões 1 e 2, respectivamente, r é o raio da base do infiltrômetro, $\Delta\tau$ é a diferença absoluta entre as tensões.

14.6 Análise estatística

Foi realizada análise descritiva dos dados para cada atributo estudado, utilizando a estatística clássica por intermédio do software IBM SPSS Statistics 19, tendo sido calculadas a média, mediana, moda, erro padrão da média, valores mínimo e máximo, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, curtose e assimetria.

Foi efetuada também a análise da distribuição de frequência dos atributos e teste de hipótese de normalidade, onde foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965), teste W, a 5%. Nele a hipótese nula, julga ser a amostra vinda de uma população normal. Estes procedimentos foram realizados sem a retirada de nenhum ponto amostral discrepante (outlier).

A correção dos outlier foi efetuada para cada atributo, através do cálculo da média aritmética dos valores dos vizinhos ao ponto aberrante.

14.7 Análise geoestatística

Inicialmente foi efetuado a análise da dependência espacial, sendo avaliada com

base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca, pela análise do semivariograma (Equação 14), para cada atributo da pesquisa, ajustado pelo software GS+ (ROBERTSON, 1998). Foram testados os semivariogramas do tipo esférico, exponencial, linear e gaussiano. Para avaliar o melhor modelo do semivariograma ajustado, foi utilizada a validação cruzada, gerando uma estimativa do atributo em cada ponto amostral. Assim, o modelo escolhido foi o que apresentou o maior coeficiente de determinação entre os valores observados e estimados.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (14)$$

$N(h)$ - o numero de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados pelo valor h .

Em cada atributo foi alistado o patamar (C_0+C), alcance (a) e o efeito pepita (C_0). Para avaliar a dependência espacial (ADE) foi utilizada a equação (15), seguindo sugestões de Robertson (1998), que considerou fraca dependência espacial para valores de $ADE < 25\%$; dependência espacial media para $25\% < ADE < 75\%$ e forte dependência espacial para $ADE > 75\%$.

$$ADE = \left(\frac{c}{(c + c_0)} \right) \cdot 100 \quad (15)$$

ADE - avaliador da dependência espacial (%); C - variância e $C+C_0$ - o patamar.

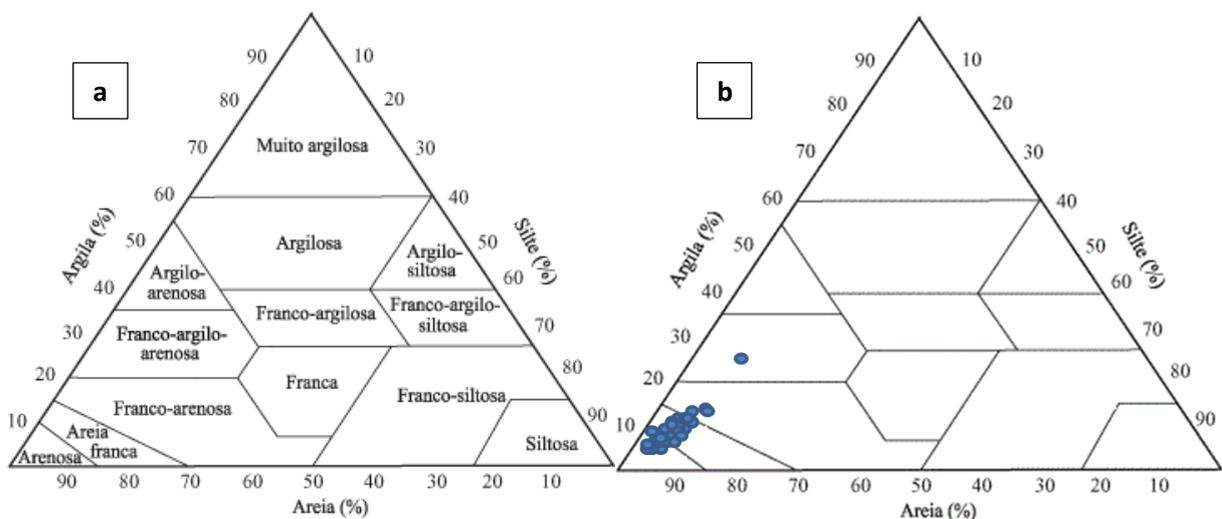
Por meio da interpolação por Krigagem, foram obtidos os mapas dos atributos avaliados, utilizando o software GS+.

15. RESULTADOS E DISCUSSÃO

15.1 Granulometria

Foram utilizados resultados de análises granulométricas de 34 pontos, que se encontram apresentados no triângulo textual da Figura 31b. As amostras se enquadraram nas classes texturais areia franca, franco-arenosa, arenosa e uma amostra na franco-argilo-arenosa.

Figura 31 - Triângulo de classificação textura de solos (a) com os dados da pesquisa (b)



Fonte: a – Citado por Santos et al. (2005), b - Elaborado pela autora

15.1.1 Estatística descritiva

As análises estatísticas descritiva dos dados de granulometria estão apresentadas na Tabela 8. Os valores de areia grossa, média e fina, a média e mediana estão próximos, mostrando distribuição simétrica, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos a zero.

Os valores elevados de coeficiente de variação (CV), podem ser considerados como indicadores da existência de heterogeneidade nos dados, como lembra Campos et al. (2007). Com base nos limites proposto por Gomes (1976), a areia total apresentou baixa variação ($CV < 10\%$), os teores de areia média e fina apresentaram variação média ($10\% < CV < 20\%$), o grau de variação alto foi encontrado na areia grossa, areia muito fina e silte ($20\% < CV < 30\%$) e grau de variação muito alto na areia muito grossa e argila ($CV > 30\%$). Segundo Isaaks e Srivastava (1989), o coeficiente de assimetria e curtose é mais sensível a valores extremos do que a média e o desvio padrão, pois um único valor pode influenciar

fortemente estes coeficientes, uma vez que os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência.

Tabela 8 - Medidas estatísticas descritivas e distribuição de frequência da granulometria

	Areia ¹						Silte	Argila
	Total	MG	G	M	F	MF		
	----- g.kg ⁻¹ -----							
Amplitude	251.7	94.008	162.514	229.428	175.686	62.009	58.699	203.761
Mínimo	670.74	17.076	69.495	296.220	254.139	38.073	20.958	45.838
Máximo	922.44	111.084	232.009	525.647	429.825	100.082	79.658	249.599
Moda	670.74	17.076	69.495	296.220	254.139	38.073	20.958	45.838
Mediana	873.7	47.555	126.232	387.908	354.652	60.640	39.264	91.327
Média	862.69	52.504	125.008	398.982	356.546	65.095	41.781	95.532
Erro padrão da média	0.848	4.909	6.387	11.046	7.824	2.596	2.083	6.734
Desvio padrão	49.45	28.622	37.245	64.406	45.620	15.135	12.144	39.264
Variância	2445.7	819.217	1387.185	4148.190	2081.211	229.063	147.475	1541.627
Assimetria	-1.884	0.662	0.593	0.158	-0.170	0.609	0.893	1.921
Curtose	5.707	-0.587	0.537	-0.840	-0.529	-0.179	1.549	6.056
Coefficiente de Variação	57.33	54.514	29.794	16.143	12.795	23.250	29.066	41.100
Grau de variação	Baixo	Muito alto	Alto	Médio	Médio	Alto	Alto	Muito alto
W ²	0.853	0.915	0.954	0.961	0.966	0.953	0.957	0.852
Distribuição ³	-	-	N	N	N	N	N	-

1 - MG = Muito Grossa (2,00-1,00 mm); G = Grossa (1,00-0,50mm); M= Média (0,50-0,25 mm); F = Fina (0,25-0,10); MF = Muito Fina (> 0,10mm); 2 - W = Coeficiente de Shapiro e Wilk, (1965); 3 - N = Distribuição Normal. Fonte: Elaborado pela autora

A medida de assimetria de uma distribuição pode ser realizada pelo coeficiente de assimetria de Pearson. Para os dados de granulometria, obteve-se distribuição assimétrica forte ($|AS| \geq 1,0$) para a areia total e argila, assimétrica moderada ($0,15 \leq |AS| < 1,0$) para os demais atributos e nenhum atributo com distribuição simétrica ($|AS| < 0,15$).

Para testar a hipótese de normalidade foi usado o teste W (SHAPIRO E WILK, 1965) a 5% de probabilidade. Os atributos do solo que não tiveram distribuição normal foram areia total, areia muito grossa e a argila. A maior parte dos atributos seguiu uma distribuição normal.

15.1.2 Dependência espacial

Na Tabela 9 são encontrados os valores dos parâmetros do semivariograma para os atributos areia e argila. A dependência espacial foi forte para todos os atributos, evidenciando assim a não aleatoriedade dos atributos no espaço, uma vez que os valores da Avaliação da Dependência Espacial - ADE foram altos ($ADE > 75\%$), indicada pela relação entre o efeito pepita e o patamar.

Tabela 9 - Parâmetros dos semivariogramas para os atributos do solo: areia e argila,

Parâmetros ^(a)	Areia (g/kg)	Argila (g/kg)
Modelo	Gaussiano	Exponencial
Efeito pepita (Co)	65	40.07518
Patamar (Co + C)	807.8	575.4
Variância Estrutural (C)	742.28	535.32482
Alcance (a)	1510	1930
r ²	0.763	0.847
SQR	29364	10380
ADE (%)	92	93
Classe de dependência espacial	Forte	Forte
VC	0,329	0,340

Fonte: Elaborado pela autora; ^a r² = Coeficiente de determinação, SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; ADE = Avaliação da Dependência Espacial e VC = Coeficiente de determinação para Validação Cruzada.

O software GS+ ajustou os modelos gaussiano e exponencial, com alcance da dependência espacial de 1510 m e 1930 m para os valores de areia e argila, respectivamente, sendo assim as medições realizadas a distâncias maiores que o alcance, tem distribuição espacial aleatória e, portanto são independentes entre si. Assim, todas as amostras situadas nesta distância são utilizadas para estimar valores em locais não amostrados.

No teste da validação cruzada (relação 1:1), cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado através da krigagem como se ele não existisse. Permitindo assim a visualização da eficiência das estimativas dos dados. Pode-se observar na Tabela 9 que as melhores estimativas foram para areia e argila, cujos valores do coeficiente de determinação (VC) foram 0,329 e 0,340, respectivamente.

Os mapas gerados pela krigagem para os teores de areia e argila se encontram nas Figuras 32 e 33, respectivamente. Na Figura 34 está disposto o mapa dos teores de silte obtido pela diferença.

Como esperado, os mapas das variáveis argila e areia apresentam comportamento inverso, ou seja, onde ocorrem os maiores teores de areia, observam-se os menores teores de argila. Ocorreu semelhante resultado em Campos et al. (2007).

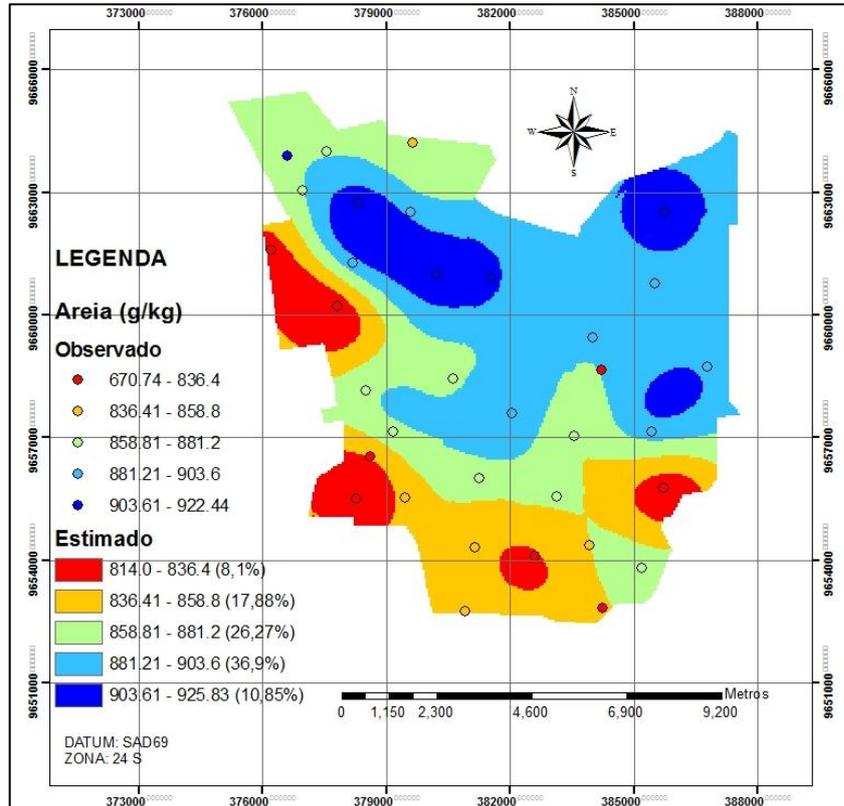
Na Figura 32 os teores de areia variaram de 670,74 a 922,44 g.kg⁻¹ e 814,0 a 925,3 g.kg⁻¹, para valores observados e estimados, respectivamente. Nota-se que os teores de areia decrescem na direção nordeste a sudoeste, que estão localizadas nas maiores altitudes, sendo justificado pela presença dos solos mais argilosos, podendo ser observado no mapa de solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú contido no apêndice C. Já na Figura 33, os valores observados de argila variaram de 45,84 a 249,60 g.kg⁻¹ e os valores de estimados foram de 49,2 a 139,1, decrescendo no sentido sudoeste a nordeste, onde se apresenta os solos mais arenosos (apêndice C).

Nota-se que o valor mínimo da areia e máximo da argila, estimado e observado, tiveram diferença de mais de 100 g/kg, podendo ser explicado por um ponto discrepante. Para análise do semivariograma este *outlier* foi corrigido pela média aritmética utilizando os valores dos pontos de seus vizinhos.

O mapa da fração Silte, obtida pela ferramenta “álgebra de mapas” do software Arc Map 9.3 da plataforma ArcGIS, onde foi construído um raster com valor 1000 e subtraído os mapas de areia e argila. Os valores de silte para os dados observados variaram de 20,96 a 70,66 g/kg e os valores estimados variaram de 5,32 a 65,85.

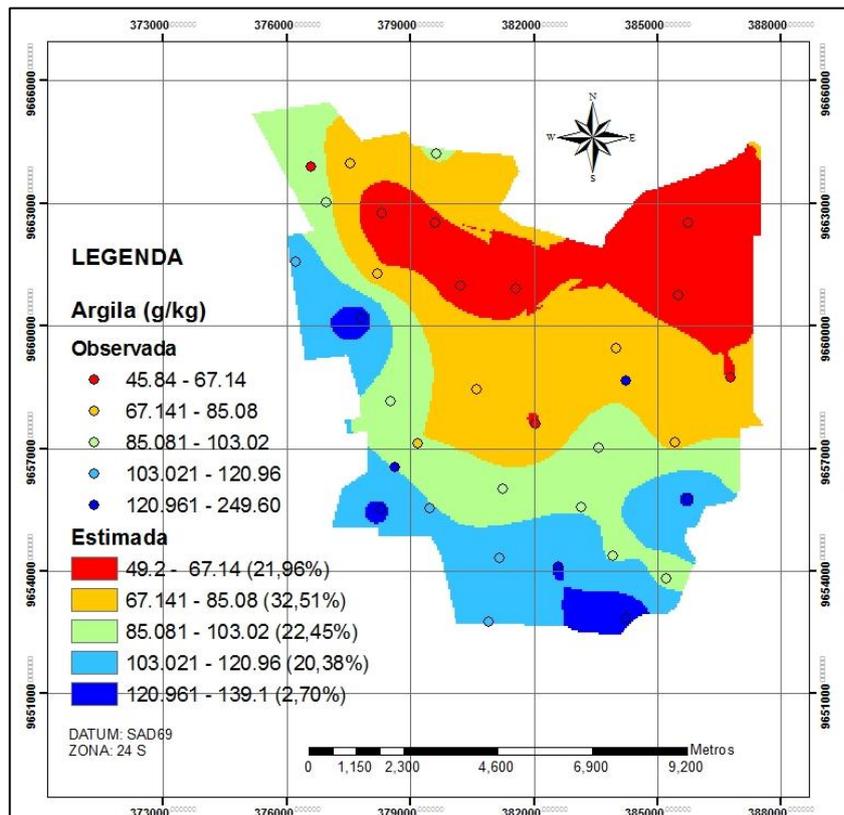
Na área total do mapa da fração areia, 36,9% da área ficaram entre os teores 831,21 a 903,6 g/kg. No mapa de argila 32,51% da área ficaram entre os teores de 67,141 a 85,08 g/kg. Já no mapa de silte, 48,17% ficaram entre os valores de 29,521 a 41,62 g/kg.

Figura 32 – Mapa de Krigagem da fração areia do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú



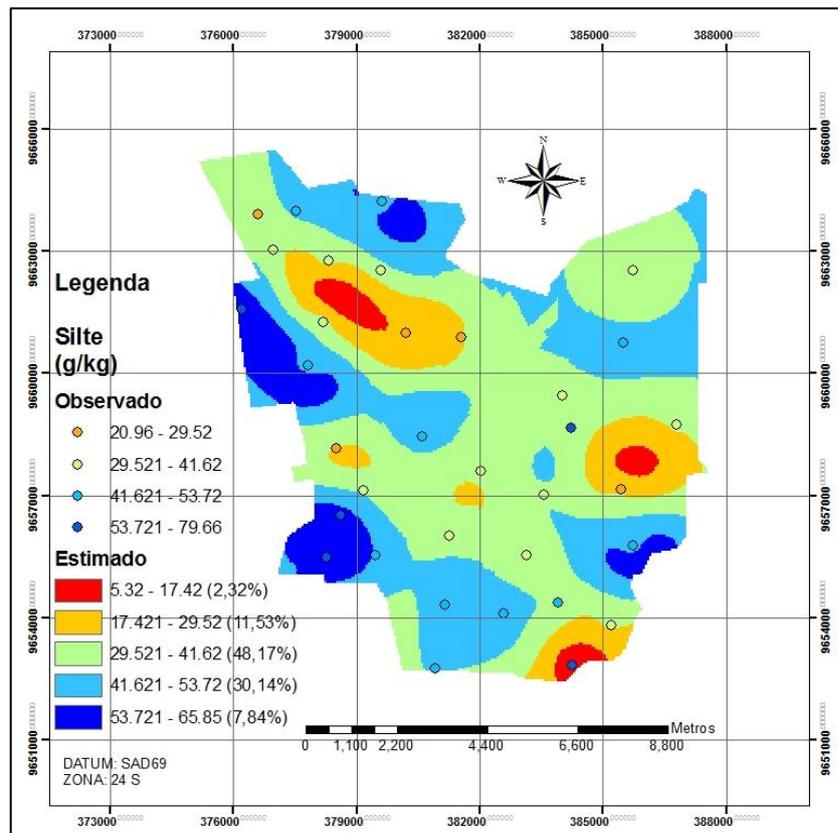
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 33 – Mapa de Krigagem da fração argila do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 34 – Mapa da fração silte, obtido por diferença, do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú



Fonte: Elaborado pela autora

15.2 Densidade do solo, densidade das partículas e porosidade total

15.2.1 Estatística descritiva

Na Tabela 10 estão dispostas as análises estatísticas descritivas de densidade do solo (ρ_s), densidade das partículas (ρ_p) e porosidade total. Pode-se observar que os valores de média e mediana estão próximos, indicando distribuição simétrica. Em relação ao coeficiente de variação, os atributos apresentaram baixa variação ($CV < 10\%$), fato encontrado também por Rabah (2002) na densidade do solo em uma profundidade de 0 a 20 cm nos solos: Latossolo Vermelho Amarelo; Latossolo Vermelho; Cambissolo; Neossolo Quartzarênico e Gleissolos.

Tabela 10 – Medidas estatísticas descritivas de densidade e porosidade

	ρ_s	ρ_p	Porosidade
	----- g/cm ³ -----		----- % -----
Amplitude	0.368	0.170	14.984
Mínimo	1.483	2.563	29.417
Máximo	1.851	2.733	44.401
Moda	1.483	2.668	29.417
Mediana	1.630	2.649	38.237
Média	1.631	2.646	38.353
Erro padrão da média	0.012	0.007	0.424
Desvio padrão	0.068	0.038	2.471
Variância	0.005	0.001	6.108
Assimetria	0.616	-0.091	-0.940
Curtose	2.544	0.012	5.112
Variação	4.167	1.453	6.444
Grau de variação	BAIXO	BAIXO	BAIXO
W	0.949	0.992	0.882
Distribuição	N	N	-

Fonte: Elaborado pela autora;

Para a densidade das partículas, os dados apresentam distribuição simétrica ($|AS| < 0,15$). Já nos dados de densidade do solo e porosidade houve distribuição assimétrica moderada ($0,15 \leq |AS| < 1,0$).

No teste de hipótese de normalidade, o teste W (SHAPIRO; WILK, 1965), somente a densidade do solo e densidade das partículas tiveram distribuição normal.

15.2.2 Dependência espacial

Os valores dos parâmetros dos semivariogramas estão dispostos na Tabela 11, onde se pode observar que a dependência espacial foi forte para densidade das partículas.

No ajuste dos semivariogramas, o modelo que melhor ajustou a densidade do solo e das partículas foi o gaussiano.

Tabela 11 – Parâmetros dos semivariogramas para densidade do solo e partículas.

Parâmetros ^a	ρ solo (g/cm ³)	ρ partículas (g/cm ³)
Modelo	Gaussiano	Gaussiano
Efeito pepita (Co)	0.001237	0.00058
Patamar (Co + C)	0.002484	0.00296
Variância Estrutural (C)	0.001247	0.00238
Alcance (a)	5144.1909	7920
r ²	0.67	0.937
SQR	3.69E-07	5.71E-08
ADE (%)	50.2	80.4
Classe de dependência espacial	Média	Forte
VC	0,081	0,439

Fonte: Elaborado pela autora; ^a r² = Coeficiente de determinação, SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; ADE = Avaliação da Dependência Espacial e VC = Coeficiente de determinação para Validação Cruzada.

Nas análises espaciais apresentadas na Tabela 11, verifica-se que o alcance foi de 5144 m e 7920 m para os valores de densidade do solo e densidade das partículas, respectivamente, obtendo alcances maiores que os da granulometria, mostrando neste caso que a densidade do solo independe da granulometria.

O melhor coeficiente de determinação da validação cruzada foi encontrado para densidade das partículas com valor de 0,439. Já os baixos valores de coeficiente de determinação para densidade do solo e porosidade podem ter sido devido a maiores valores de coeficiente de determinação.

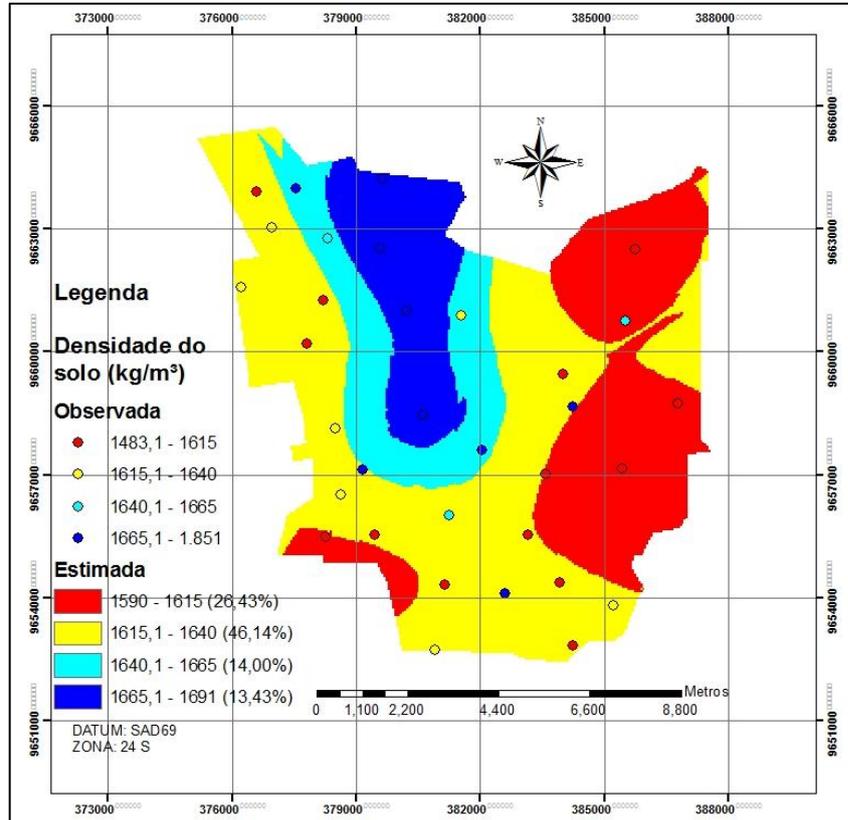
Nas Figuras 35 a 37 estão apresentados os mapas de Krigagem para densidade do solo e densidade das partículas. O mapa de porosidade (Figura 37) foi calculado pela equação: 09, utilizado a ferramenta “Álgebra de Mapas” do software Arc Map 9.3.

Os maiores valores de densidade do solo e partículas (Figuras 35 e 36) se encontram mais ao norte e noroeste do mapa, diminuindo seus valores em direção ao leste. Já as maiores porosidades estão a nordeste, onde a densidade do solo é menor, sendo justificado pelos maiores teores de areia encontrados nesta área. As menores porcentagens de porosidade estão mais ao norte e noroeste, onde se encontra os maiores teores de densidade do solo.

A faixa de densidade do solo que ocupa a maior área do perímetro é de 1615,1 a 1640 kg/m³, com 46 % da área total. Para os valores densidade das partículas e porosidade são de 2643,1 a 2671 kg/m³ e 37,81 a 38,5 %, com abrangência da área total de 34,9% e 38,63%, respectivamente.

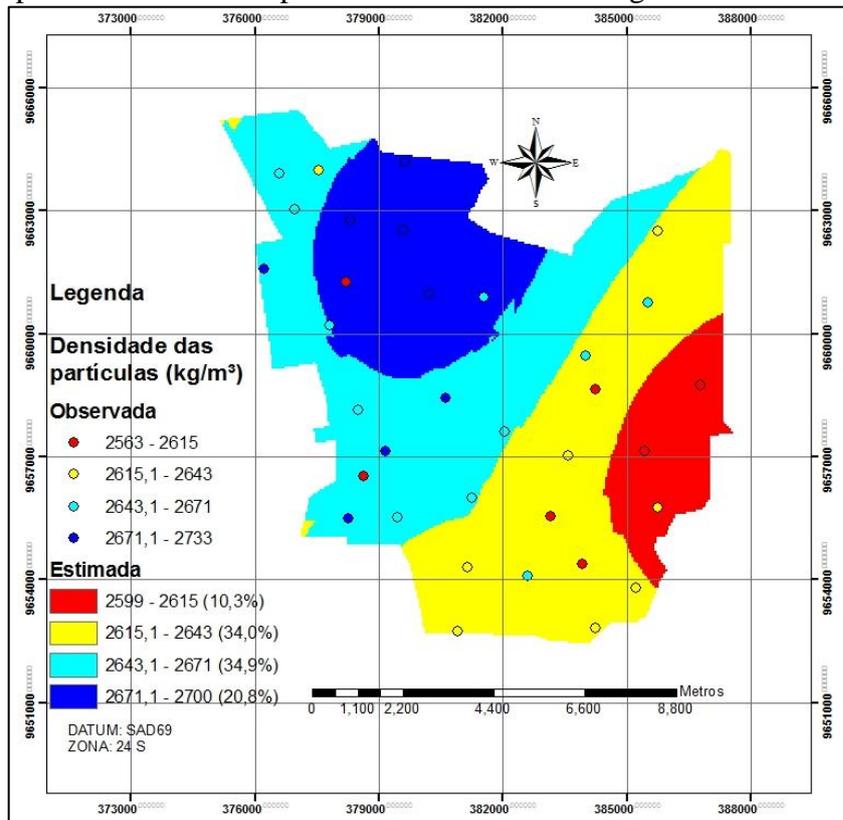
No mapa dos teores de densidade do solo são encontradas variações dos valores estimados e observados, de 1590 a 1691 kg/m^3 e de 1483,1 a 1851 kg/m^3 , respectivamente, indicando uma superestimação dos menores valores e uma subestimação dos maiores valores.

Figura 35 – Mapa de Krigagem da densidade do solo do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú



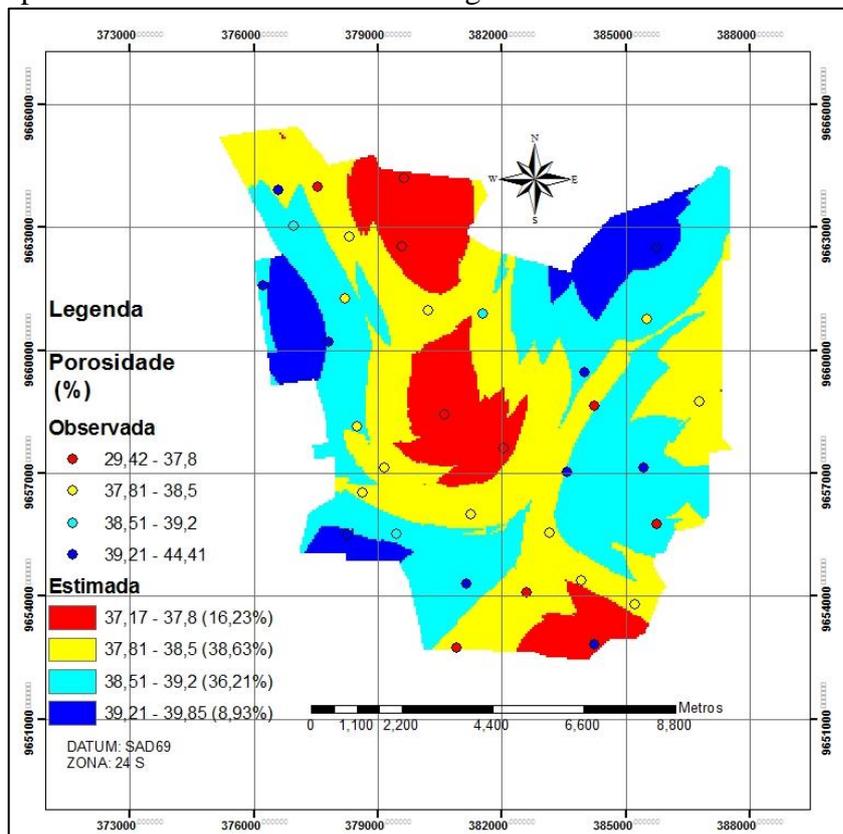
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 36 - Mapa da densidade das partículas do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 37 – Mapa da Porosidade do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú



Fonte: Elaborado pela autora

15.3 Parâmetros da curva de retenção de água no solo

15.3.1 Estatística descritiva

A estatística descritiva dos parâmetros da curva característica de retenção de água no solo está disposta na Tabela 12. Onde a distribuição simétrica pode ser constatada pela proximidade entre os valores da média e da mediana e a assimetria próxima à zero, com exceção do parâmetro m .

Baseando-se nos limites impostos por Gomes (1976), todos os parâmetros da curva característica tiveram grau de variação muito alto ($CV > 30\%$) e distribuição assimétrica, onde os parâmetros α e m obtiveram assimetria forte ($|AS| \geq 1,0$) e n e θ_r tiveram assimetria moderada ($0,15 \leq |AS| < 1,0$).

No teste de hipótese de normalidade (SHAPIRO E WILK, 1965), até mesmo com a transformação dos dados, nenhum dos atributos teve distribuição normal, podendo ser explicado pelo alto grau de variação.

Tabela 12 – Estatística descritiva e distribuição de frequência para os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo por van Genuchten.

	α	m	n	θ_r (cm ³ /cm ³)
Amplitude	0,07	2,46	24,95	0,06
Mínimo	0,02	0,05	3,41	0,02
Máximo	0,09	2,51	28,36	0,08
Moda	0,03	0,05	3,41	0,03
Mediana	0,04	0,12	12,37	0,04
Média	0,04	0,23	13,55	0,04
Erro padrão da média	0,00	0,07	1,28	0,00
Desvio Padrão	0,01	0,43	7,45	0,01
Variância	0,00	0,18	55,47	0,00
Assimetria	1,22	4,93	0,51	0,74
Curtose	2,58	26,06	-0,89	0,06
Coefficiente de Variação	32,91	189,98	54,96	35,68
Grau de variação	MUITO ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO
w	0,88	0,37	0,92	0,94
Distribuição	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora;

15.3.2 Dependência espacial

Devido à alta variabilidade e a não normalidade dos valores dos parâmetros das curvas de retenção de água no solo, o ajuste do semivariograma foi realizado para a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), já que nestes a distribuição foi normal.

Os parâmetros dos semivariogramas para a umidade na capacidade de campo e umidade no ponto de murcha permanente são encontrados na Tabela 13. A dependência espacial forte foi atribuída para todas as umidades, como também os valores da Avaliação da dependência Espacial – ADE foram altos, evidenciando assim, a não aleatoriedade dos parâmetros no espaço.

Tabela 13 - parâmetros dos semivariogramas para os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo.

Parâmetros^(a)	θ_{cc} (cm/cm³)	θ_{pmp} (cm/cm³)
Modelo	Esférico	Gaussiano
Efeito pepita (Co)	0,00014	0,0
Patamar (Co + C)	0,00097	0,000218
Variância Estrutural (C)	0,00083	0,000218
Alcance (a)	5010	1410
r ²	0,937	0,735
SQR	1,554E-08	2,80E-09
ADE (%)	85,2	99,7
Classe de dependência espacial	Forte	Forte
VC	0,413	0,030

Fonte: Elaborado pela autora; ^a r² = Coeficiente de determinação, SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; ADE = Avaliação da Dependência Espacial e VC = Coeficiente de determinação para Validação Cruzada.

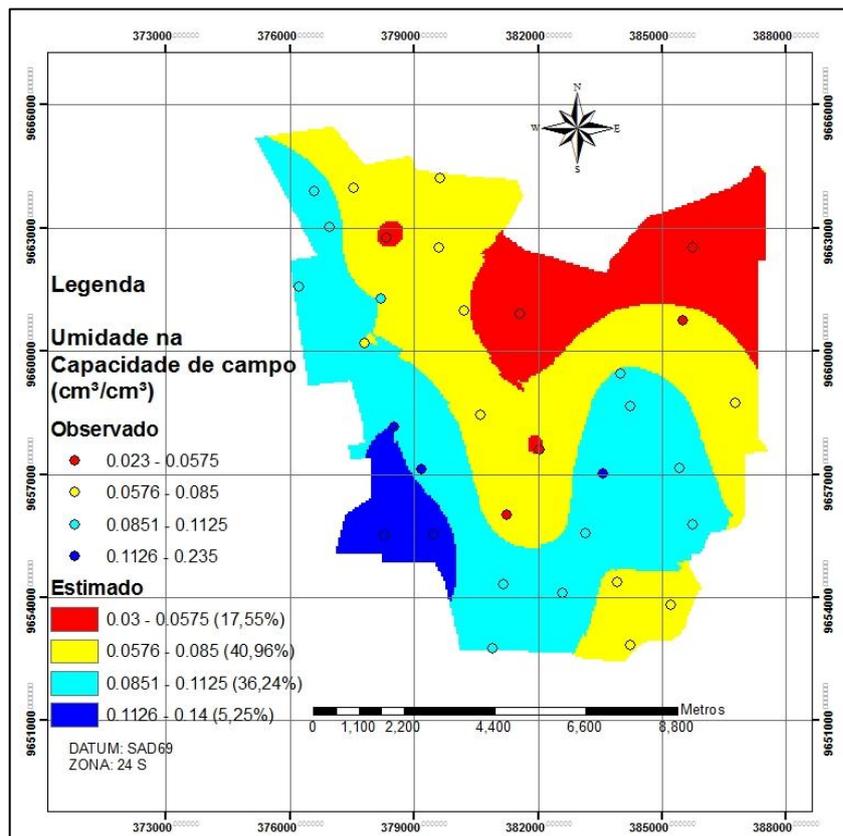
Os Semivariogramas foram ajustados ao modelo esférico e gaussiano para θ_{cc} e θ_{pmp} , respectivamente. O alcance para θ_{cc} foi bem mais elevado que para θ_{pmp} , conforme tabela 13. O coeficiente de determinação para validação cruzada mostrou que o melhor ajuste foi para umidade da capacidade de campo.

Os mapas gerados pela krigagem para a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) estão expostos nas Figuras 38 e 39.

Pode-se observar que a θ_{cc} aumenta seus valores no sentido nordeste sudoeste (Figura 38), podendo ser explicado pelos maiores teores de argila a sudoeste, pois num mesmo potencial matricial, os solos mais argilosos retém mais água. Esta mesma tendência ocorre nos valores de θ_{pmp} (Figura 39).

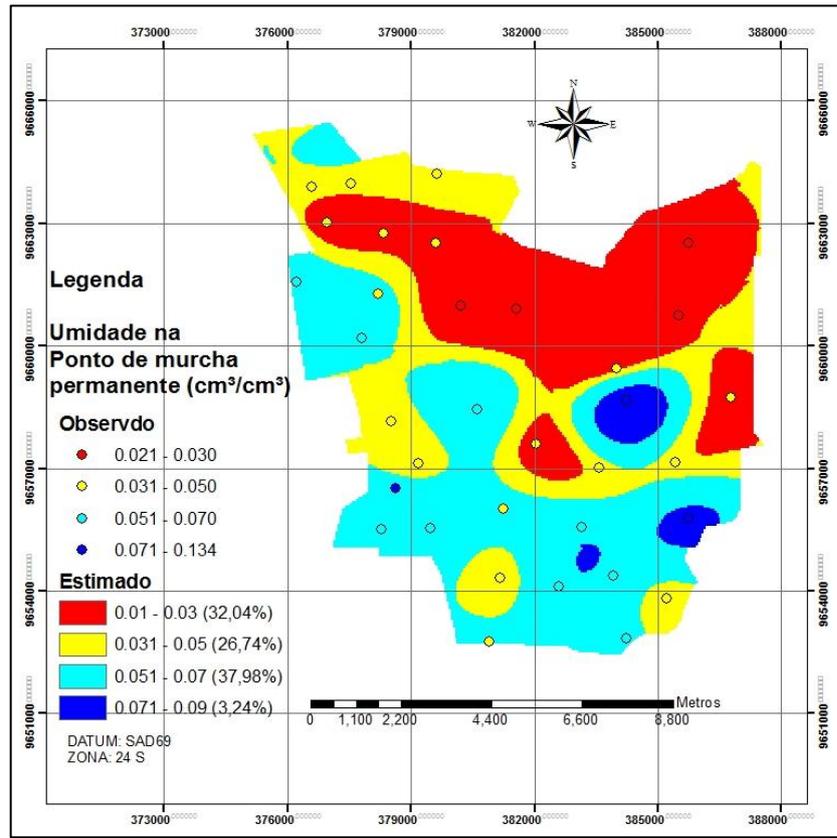
Os valores estimados e observados de θ_{cc} variaram de 0,023 a 0,255 e 0,03 a 0,14, respectivamente. A variação dos valores estimados para θ_{pmp} foram de 0,021 a 0,09 e os observados variaram de 0,01 a 0,134. A diferença entre o maior valor, estimado e observado para as duas umidades, se deu pela presença de um ponto discrepante nos valores observados que foi substituído pela média aritmética dos valores de seus vizinhos.

Figura 38 – Mapa de Krigagem do parâmetro θ_{cc} para os solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 39 – Mapa de Krigagem da θ_{pmp} para os solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.



15.4 Condutividade Hidráulica

Na comparação dos dados de condutividade hidráulica saturada, obtidos pelos métodos do permeâmetro de carga constante ($K_{o(perm)}$) e infiltrômetro de tensão ($k_{o(tensi)}$), pode-se observar a diferença entre os dados com correlação de Pearson de $-0,101$. O fato pode ser justificado pela continuidade no perfil do solo pelo método do infiltrômetro de tensão, podendo o fluxo caminhar para camadas mais argilosas e assim uma velocidade de infiltração ser menor. Além do mais, segundo Espírito Santo (2011), o método do permeâmetro de carga constante eleva relativamente os valores de condutividade hidráulica.

15.4.1 Estatística descritiva

Os dados da análise estatística descritiva estão na Tabela 14, onde se pode observar que os valores de média e mediana estão próximos, indicando distribuição simétrica, podendo ser confirmado pelos valores de assimetria próximos a zero. Os três atributos obtiveram distribuição assimétrica moderada ($0,15 \leq |AS| < 1,0$).

Os valores elevados do coeficiente de variação indicam a heterogeneidade nos dados. Segundo Warrick e Nielsen (1980), são esperados altos coeficientes de variação para essa propriedade do solo.

O teste da hipótese de normalidade de Shapiro-Wilk (W) indica distribuição normal, mas com tendência a distribuição não-normal para condutividade saturada nos dois métodos, tendências semelhantes foram encontrado por Dalbianco (2009).

Tabela 14 - Medidas de estatística descritiva para condutividade hidráulica

	$k_{o(\text{tensi})}$ (mm/h)	$k_{0,5 \text{ kPa}}$ (mm/h)	$K_{o(\text{perm})}$ (mm/h)
	-----mm/h-----		
Amplitude	39,975	19,544	1112,18
Mínimo	9,125	3,042	29,00
Máximo	49,100	22,586	1141,18
Moda	24,964	9,985	29,00
Mediana	24,964	8,546	403,55
Média	23,962	9,229	439,19
Erro padrão da média	2,002	0,918	45,12
Desvio Padrão	10,967	5,027	263,11
Variância	120,264	25,274	69224,5
Assimetria	0,409	0,942	0,579
Curtose	-0,684	0,501	-0,017
Coefficiente de Variação	45,767	54,472	59,908
Grau de variação	Muito alto	Muito alto	Muito alto
w	0,950	0,916	0,965
Distribuição	N	-	N

Fonte: Elaborado pela autora

15.4.2 Dependência espacial

Na Tabela 15, podem ser observados os parâmetros dos semivariogramas da condutividade saturada por dois métodos e condutividade saturada a 0,5 kPa pelo infiltrômetro de tensão. O programa GS+ ajustou o modelo gaussiano para a estimativa dos dados de condutividade hidráulica saturada e a 0,5 kPa para o método utilizando o infiltrômetro de tensão com alcance de 1720 e 1180, respectivamente, e exponencial para K_o pelo método do permeâmetro de carga constante.

Mesmo com a construção da dependência espacial elevada, o coeficiente de determinação chegou próximo a zero e alta SQR para K_o pelo método do permeâmetro, podendo ter sido provocado pela alta variabilidade dos dados.

Tabela 15 - Parâmetros dos semivariogramas para condutividade hidráulica saturada ($k_{o(\text{tensi})}$) e com tensão de 0,5 kPa ($k_{0,5 \text{ kPa}}$) pelo infiltrômetro de tensão condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante ($K_{o(\text{perm})}$).

Parâmetros	$k_{o(\text{tensi})}$ (mm/h)	$k_{0,5 \text{ kPa}}$ (mm/h)	$K_{o(\text{perm})}$ (mm/h)
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Exponencial
Efeito pepita (C_o)	53,7	0,76	6000
Patamar ($C_o + C$)	127,4	20,49	56650
Variância Estrutural (C)	73,7	19,73	50650
Alcance (a)	1720	1180	750
r^2	0,589	0,398	0,002
SQR	1042	46,1	7,29E+07
ADE (%)	57,8	96,3	89,4
Classe de dependência espacial	Média	Forte	Forte
VC	0,023	0,026	0,183

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 38 estão apresentados os mapas de Krigagem de K_o (mm/h) pelo método do infiltrômetro de tensão, K na tensão de 0,5 kPa (mm/h) pelo método do infiltrômetro de tensão e K_o (mm/h) pelo método do permeâmetro de carga constante.

Pela relação 1:1 (VC), pode-se visualizar a eficiência da estimativa dos dados, notando-se que a estimativa não é boa, superestimando os valores baixos e subestimando os valores altos de condutividade hidráulica pelo método do infiltrômetro de tensão, ocorrendo o oposto no método do permeâmetro de carga constante.

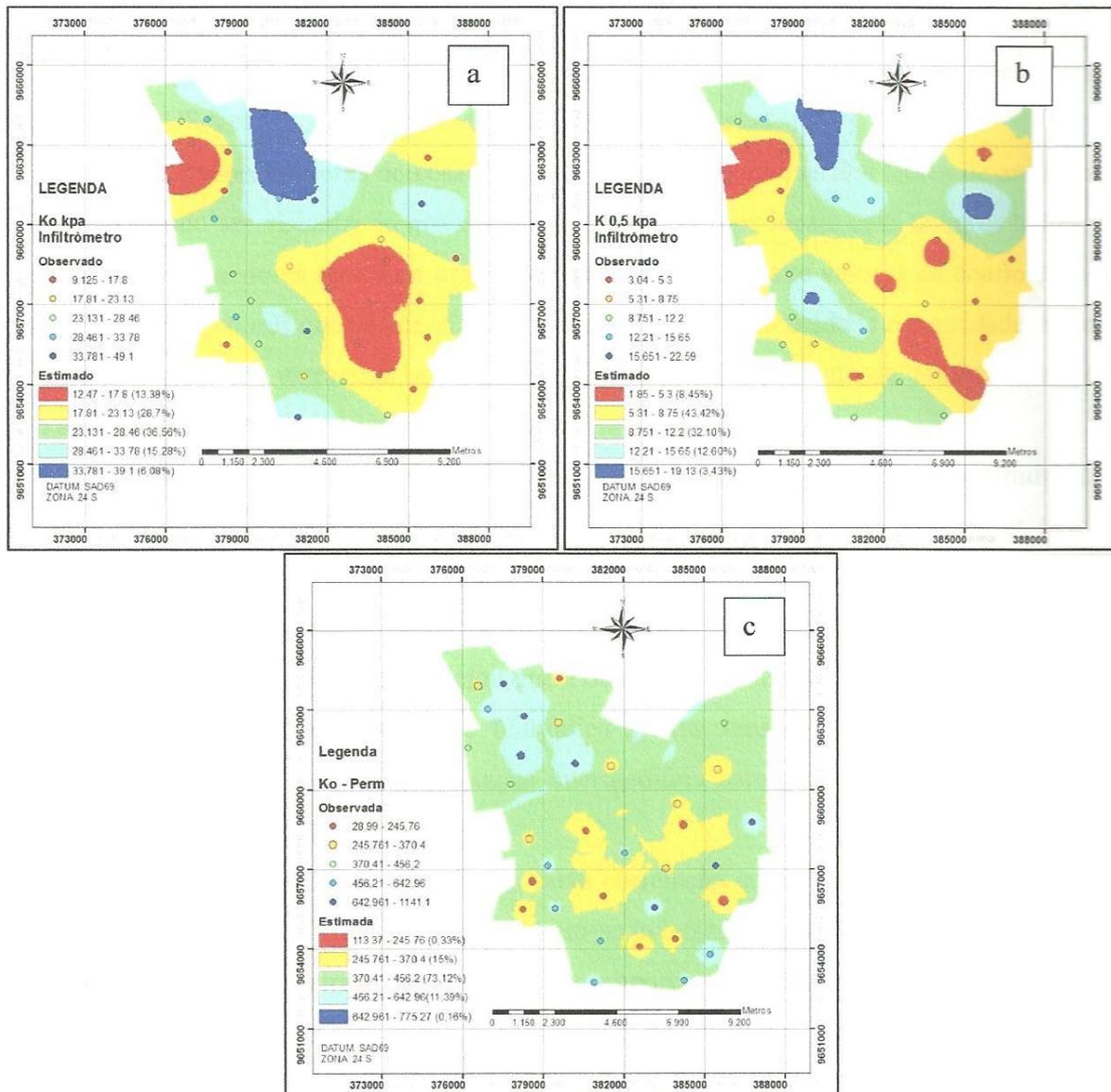
Pode-se observar que nas Figuras 40a e 40b, condutividade hidráulica saturada e na tensão de 0,5 kPa tiveram tendências semelhantes, onde os menores valores de condutividade hidráulica se encontram a sudeste em direção ao noroeste. Os maiores valores estão ao norte da área.

Na Figura 40c, nota-se que os maiores valores de condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante, tendem a aparecer na parte mais sudeste e no centro do mapa, diminuindo seus valores na direção noroeste. A Figura 40c mostra ainda que 73,12% da área do Perímetro obteve valores de condutividade hidráulica saturada entre 370,41 a

456,2 mm/h.

O comportamento estranho do mapa (Figura 40c), cuja maioria dos pontos possuem valores isolados ou muito diferente de seus vizinhos, este efeito é devido a grande variabilidade espacial dos dados, conforme mostrada na estatística descritiva (Tabela 14), onde a amplitude, a variância e o coeficiente de variação são os maiores para este método, como também foi encontrado o menor alcance (Tabela 15), em comparação com os dados obtidos pelo infiltrômetro de tensão.

Figura 40 – Mapas de Krigagem do parâmetro: Ko (mm/h) pelo método do Infiltrômetro de tensão, b – K na tensão de 0,5 kPa (mm/h) pelo método do Infiltrômetro de tensão e c - Ko (mm/h) pelo método do permeâmetro de carga constante.



Fonte: Elaborado pela autora

15.5 Correlação linear entre os atributos do solo

A matriz de correlação linear entre os atributos físico-hídricos dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú estão apresentados na Tabela 16. No meio ambiente uma perfeita correlação (igual a 1 ou -1) entre dois atributos raramente acontece. Assim, os valores dos coeficientes seguiram classificação conforme Sharp (s/d), citado por Kitamura (2004), a seguir: correlação extra-alta se $+0,80 < r \leq +1,00$ ou $-0,8 > r \geq -1,00$; alto se $+0,60 < r \leq +0,80$ ou $-0,60 > r \geq -0,80$; moderado se $+0,40 < r \leq +0,60$ ou $-0,40 > r \geq -0,60$; baixo se $+0,20 < r \leq +0,40$ ou $-0,20 > r \geq -0,40$ e nulo se zero.

Pode-se verificar que a maioria dos atributos físicos e hídricos dos solos apresentam coeficientes de correlação baixos, sendo uma tendência observada por diversos trabalhos (SOUZA et al., 2008; KITAMURA, 2004; MATA et al, 1999)

Os maiores valores do coeficiente de correlação foram as dos teores de areia, silte e argila, podendo ser visualizado nos mapas de Krig, onde nos locais com maiores teores de areia existem os menores teores de argila. Kitamura (2004) obteve valores de coeficiente de correlação bem menores que os encontrados neste trabalho. A porosidade e densidade do solo produziram correlação extra alta, onde, como esperado, com o aumento da densidade do solo há o aumento da porosidade.

Para os valores moderados de correlação, destacou-se a condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante sendo esta proporcional ao teor de areia e inversamente proporcional aos teores de silte e argila. Obteve-se também baixa correlação entre a densidade do solo e a umidade residual, sendo inversamente proporcional. Marques et al. (2008), também evidenciou que a densidade e o teor de argila são inversamente proporcionais a K_0 . A condutividade hidráulica a uma tensão de 0,5 kPa, obtida pelo infiltrômetro de tensão, produziu correlação intermediária com a densidade do solo e baixa correlação com a densidade das partículas.

A umidade residual apresentou baixa correlação com a granulometria, densidade do solo e porosidade, cujos valores apresentaram-se inversamente proporcional com os teores areia e a porosidade e mostraram-se diretamente proporcionais com a argila, silte e densidade do solo. O parâmetro α da curva característica de retenção mostrou-se inversamente proporcional ao parâmetro m .

Já a altitude apresentou baixa correlação positiva com os teores de argila, pois os solos mais argilosos estão nas áreas mais altas e são mais próximas ao Rio Acaraú, podendo ser visualizados nos mapas de altitude (Figura 27) e de teores de argila na Figura 33. A

declividade mostrou baixa correlação, consistindo em positiva proporcionalidade com a densidade do solo e das partículas.

Tabela 16 - Matriz de correlação dos atributos dos solos do Perímetro Irrigado baixo Acaraú. Correlação é significativa ao nível de 0,05

Atributo	Areia	Argila	Silte	ρ_s	ρ_p	Porosidade	Parâmetros da curva de retenção de água do solo				$k_{o(tensi)}$	$k_{0,5 \text{ kPa}}$	K perm	Altitude	Declividade
							α	m	n	θ_r					
Areia total	1,000														
Argila	-0,989**	1,000													
Silte	-0,875**	0,793**	1,000												
ρ solo	0,056	-0,072	0,004	1,000											
ρ partículas	0,259	-0,295*	-0,104	0,291*	1,000										
Porosidade	0,039	-0,036	-0,044	-0,936**	0,063	1,000									
α	-0,283	0,280	0,250	0,014	-0,057	-0,032	1,000								
m	0,108	-0,091	-0,148	0,045	0,086	-0,017	-0,449*	1,000							
n	0,162	-0,172	-0,105	0,022	-0,023	-0,028	-0,066	-0,377*	1,000						
θ_r	-0,367*	0,358*	0,337*	0,292*	-0,219	-0,389*	-0,218	-0,110	0,168	1,000					
$k_{o(tensi)}$	0,065	-0,077	-0,012	0,261	0,278	-0,171	0,122	0,184	-0,101	-0,274	1,000				
$k_{0,5 \text{ kPa}}$	0,110	-0,134	-0,010	0,406*	0,397*	-0,281	0,094	0,166	-0,215	-0,232	0,891	1,000			
k perm,	0,457**	-0,428**	-0,475**	-0,328*	-0,225	0,263	0,042	-0,165	0,171	-0,319*	-0,101	-0,191	1,000		
Altitude	-0,276	0,312*	0,117	-0,100	-0,207	0,029	-0,028	-0,132	-0,055	0,224	0,040	-0,121	-0,051	1,000	
Declividade	0,073	-0,073	-0,064	0,366*	0,314*	-0,269	-0,128	0,137	0,004	0,154	-0,209	-0,120	-0,130	-0,220	1,000

Fonte: Elaborado pela autora; ** Correlação é significativa ao nível de 0,01, * Correlação é significativa ao nível de 0,05

16 CONCLUSÃO

As propriedades físico-hídricas dos solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú apresentaram dependência espacial e puderam ser estimadas por semivariograma, que possibilitou a elaboração de mapas e visualização de áreas que merecem manejo diferenciado na irrigação.

Por apresentarem as melhores validações cruzadas, os dados dos mapas de areia, argila, densidade das partículas e umidade na capacidade de campo, podem ser aproveitados na elaboração dos projetos e manejo da irrigação no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú.

Devido ao grau de variação muito alto dos atributos dos solos do perímetro Irrigado Baixo Acaraú: Condutividade hidráulica, densidade do solo e porosidade, os mapas de Krigagem obtiveram as piores validações cruzadas.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J.A. *et al.* Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 19, p. 115-119, 1995.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JUNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do Solo: Conceitos e Aplicações**. Imprensa Universitária. Fortaleza. 2008. 289 p.
- ANKENY, M. D. *et al.* Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 55, p. 467-470, 1991.
- ANTONINO, A. C. D. *et al.* Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo com infiltrômetro a disco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p. 247-253, 2001.
- BRITO, A. S. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências) -Universidade de São Paulo, Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz, 2010.
- CAMPOS, C. C. M.; FERRAZ, F. B.; FREITAS, E. V. S.; SOUZA, Z. M. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um espodossolo da zona da mata de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 07, n. 1, 2007
- CAMPOS, R.C. *et al.* Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 19, p. 121-126, 1995.
- CARVALHO, O. S.; GASCÓ, J. M.; LOPÉZ, F. G.; REQUEJO, A. S. Variabilidade espacial de algumas propriedades químicas e físicas de um solo submetido a diferentes sucessões de cultivo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, p. 497-503, 1998
- CAVALCANTE, E. G. S. Variabilidade especial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, n. 3, p. 237-243, 2011
- DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e Caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009
- ESPIRITO SANTO, A. F. **Condutividade hidráulica saturada em função do tipo e uso do solo e método de determinação**. 2011. Dissertação (Mestrado em Produção Sustentável) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2011
- FERREIRA, M. F. **Caracterização Física do Solo**. In: Quirijn de Jong van Lier (Ed). (Org.). Física do Solo. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-27, 2010.
- GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Ed. Centro Acadêmico Luiz de Queiroz, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1976. 250p

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p. 169-177, 2005

HU, W. *et al.* Spatial variability of soil hydraulic properties on a steep slope in the Loess Plateau of China. **Sci. agric.**, Piracicaba, v.65, n.3, 2008

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 561p, 1989

KITAMURA, A. E. **Inter-relações da variabilidade espacial da granulometria do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto**, Ilha Solteira, 2004, 109 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004

KLUTE, A; DIRKSEN, C. **Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods**. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Science Society of America, 1986. p.697-734

LANZANOVA, M. E. *et al.* Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.31, p. 1131-1140, 2007.

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. In: Quirijn de Jong van Lier (Ed). (Org.). *Física do Solo*. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v. 1, p. 103-152.

LIBARDI, P. L. **Propriedades físico-hídricas do solo no estudo do manejo e da conservação do solo e da água**. In: Oliveira T. S. (Org.) *Agricultura, sustentabilidade e o semiárido*. Fortaleza, CE. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p 214-223, 2000.

MARQUES, J. D. O. *et al.* Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 38, p. 193 - 206, 2008

MATA, J.D.V.; GOLCALVES, A.C.A.; VIEIRA, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Relação entre produtividade e resistência a penetração em área irrigada por pivô central, sob dois sistemas de preparo. **Acta Scientiarum**, Maringa, v.21, n.3, p.519-525, 1999

ROBERTSON, G.P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: **Gamma Design Software**, 1998. 152 p.

PEDROTTI, A; MELLO JÚNIOR, A.V. **Avanços em Ciência do solo: A Física do Solo na Produção Agrícola e Qualidade Ambiental**. Editora da UFS, FAPITEC-SE e SBCS. São Cristóvão, 2009.93p

PERROUX, K. M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 52: 1205-1215, 1988.

RABAH, F. A. **Dependência espacial de atributos do solo obtidos por meio de semivariogramas e autocorrelogramas**. 2002. 90 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, São Paulo, 2002

RECKZIEGEL, N. L., et al. Parâmetros de ajuste da equação de van genuchten e sua variabilidade espacial em um neossolo quartzarenico em Petrolina - PE. In: XVI Congresso de Iniciação Científica, 2007, **Anais...** Pelotas: Faculdade de agronomia Eliseu Maciel, 2007

SHAPIRO, S. S; WILK, M. B. An analysis of variance for normality (complete samples).

SHARP. **Instructor manual. Scientific computer.** Model EL-5500II. Sharp Eletronics Corporation. Japan. 196p

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 5.ed. Viçosa, MG, SBCS/SNLCS, 2005. 100 p **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O.A. Influencia da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, v. 10, p. 91-95, 1986

SILVA, E. B.; LIBARDI, P. L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Sci. Agric**, Piracicaba, v.57, n.3,2000.

SILVEIRA NETO, A. N. *et al.* Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.36, p 29-35, 2006.

SOUSA J. R., QUEIROZ, J. E.; GHEYI, H. R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo aluvial no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p. 140-144, 1999.

SOUZA, Z. M.; et al. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 2, 2008

THOMPSON, L. M.; TROEH, F. **Solos e fertilidade do solo.** São Paulo. Andrei Editora LTD A. 6^aed. 718 p., 2007.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

WANG, D. *et al.* Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrometers with varying disk diameters. **Soil Science**, v. 163, n. 5, 1998.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field.** In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, p.319-344. 1980.

APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO

Estatística de regressão para os dados de calibração do sensor capacitivo.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,99994
R-Quadrado	0,999879
R-quadrado ajustado	0,99987
Erro padrão	0,000853
Observações	15

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,07831891	0,078319	107692	7,37E-27
Resíduo	13	9,45424E-06	7,27E-07		
Total	14	0,078328364			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,00871	0,00053153	-16,386	4,62E-10	-0,00986	-0,00756	-0,00986	-0,00756
Variável X 1	0,965957	0,00294351	328,165	7,37E-27	0,959598	0,972316	0,959598	0,972316

Estatística de regressão para os dados de θ (cm^3/cm^3) pelo método do papel filtro e método tradicional.
Para Argissolo Vermelho Amarelo

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,998122867
R-Quadrado	0,996249258
R-quadrado ajustado	0,995832509
Erro padrão	0,007120861
Observações	11

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,121215556	0,121215556	2390,525502	3,14032E-12
Resíduo	9	0,00045636	5,07067E-05		
Total	10	0,121671916			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,00176	0,002995	0,58910	0,57028	-0,005011	0,00854	-0,005	0,00853973
Variável X 1	1,01442	0,020748	48,893	3,14032E-12	0,96748874	1,061358438	0,9675	1,06135844

Para Planossolo

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,997837919
R-Quadrado	0,995680512
R-quadrado ajustado	0,995200569
Erro padrão	0,007203925
Observações	11

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,107663523	0,107663523	2074,580128	5,92917E-12
Resíduo	9	0,000467069	5,18965E-05		
Total	10	0,108130592			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,011424015	0,003800644	-3,00580994	0,01481614	-0,02002167	-0,00282636	-0,02	-0,00282636
Variável X 1	1,006320536	0,022093841	45,54755897	5,92917E-12	0,956340795	1,056300278	0,9563	1,05630028

Para Latossolo Amarelo

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,996487124
R-Quadrado	0,992986588
R-quadrado ajustado	0,99220732
Erro padrão	0,009635941
Observações	11

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,11831635	0,11831635	1274,255582	5,25668E-11
Resíduo	9	0,000835662	9,285 13E-05		
Total	10	0,119152012			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,0131305	0,004545148	-2,88890476	0,017916204	-0,02341234	-0,002848661	-0,0234	-0,00284866
Variável X 1	1,071452418	0,030015433	35,69671669	5,25668E-11	1,003552791	1,139352046	1,0036	1,13935205

Para Neossolo Quartzarênico

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,999855461
R-Quadrado	0,999710942
R-quadrado ajustado	0,999678825
Erro padrão	0,001761702
Observações	11

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,096604548	0,096604548	31126,66018	3,07087E-17
Resíduo	9	2,79324E-05	3,1036E-06		
Total	10	0,09663248			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,001258093	0,000745571	1,687423403	0,125794881	-0,0004285	0,002944691	-0,0004	0,00294469
Variável X 1	0,994919348	0,005639253	176,4274927	3,07087E-17	0,98216247	1,007676226	0,9822	1,00767623

Para Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico

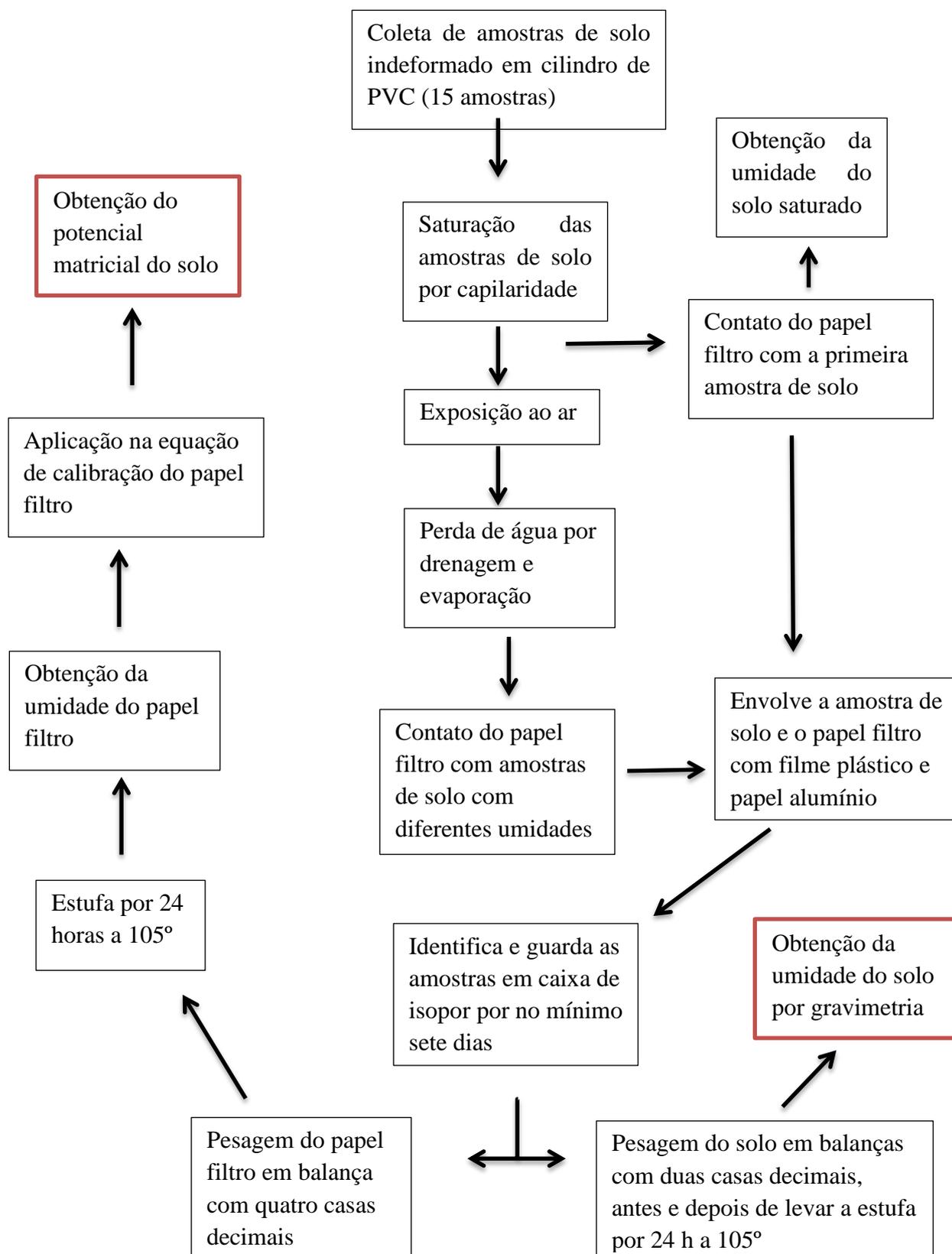
Estatística de regressão	
R múltiplo	0,997375901
R-Quadrado	0,994758688
R-quadrado ajustado	0,99417632
Erro padrão	0,007736565
Observações	11

ANOVA

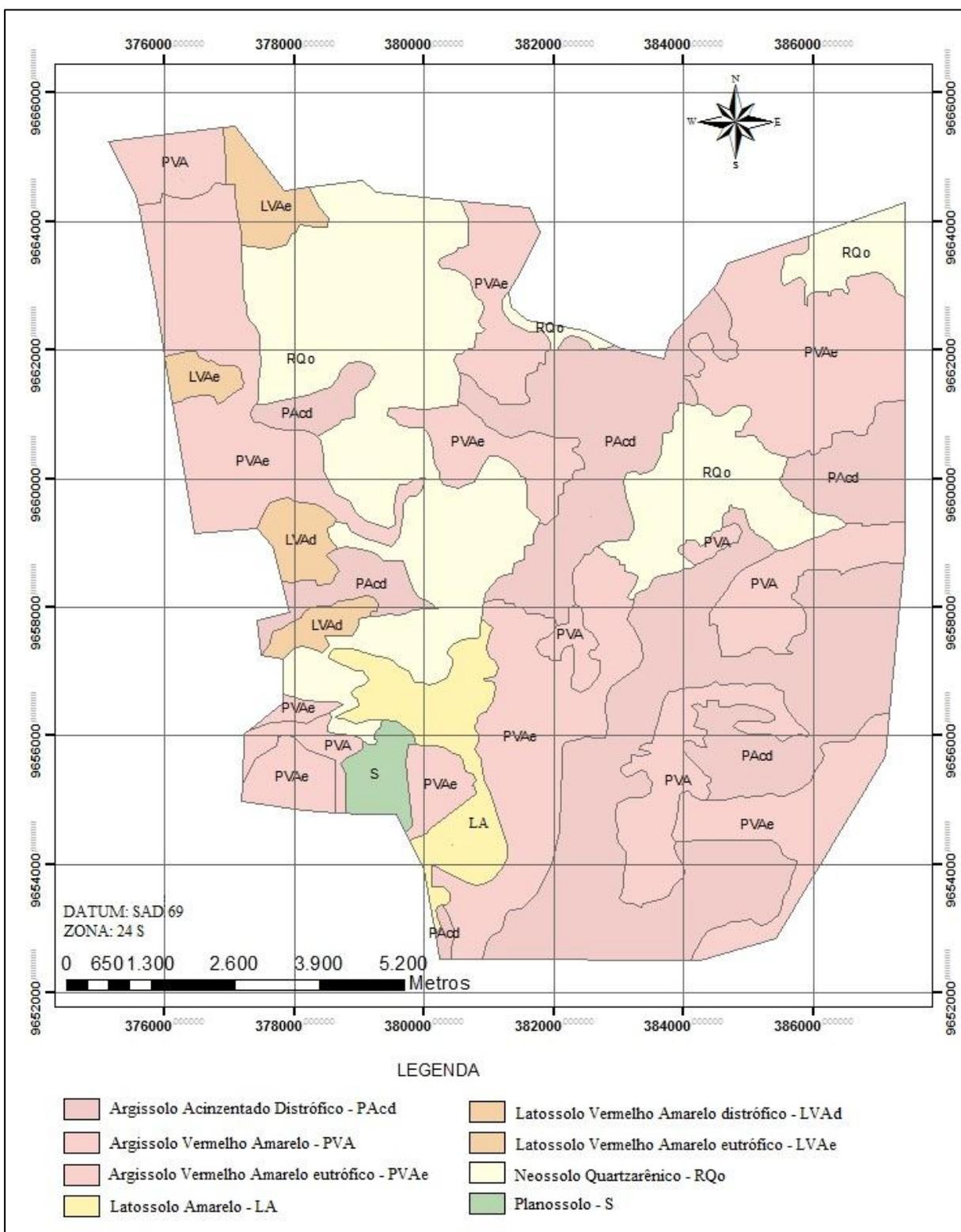
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,102239015	0,102239015	1708,127405	1,41642E-11
Resíduo	9	0,00053869	5,98544E-05		
Total	10	0,102777705			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	95% Inferiores	95% Superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,004045951	0,003267876	1,238098125	0,247002101	-0,0033465	0,011438401	-0,0033	0,0114384
Variável X 1	1,012179178	0,024490478	41,32949801	1,41642E-11	0,956777867	1,067580489	0,9568	1,06758049

APÊNDICE B – ROTINA DO MÉTODO DO PAPEL FILTRO



APÊNDICE C – MAPA DE SOLOS DO PERÍMETRO IRRIGADO BAIXO ACARA²



² Adaptado de: ALVES, N. N. L. **Proposta de elaboração de um sistema de informações geográficas para programação da irrigação parcelar do perímetro irrigado Baixo Acaraú.** 2006. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Curso de Agronomia, Fortaleza, 72 f, 2006.