

DIÊGO CÉZAR DOS SANTOS ARAÚJO

**DINÂMICA DA UMIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM UMA BACIA EXPERIMENTAL DO
SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

RECIFE

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DINÂMICA DA UMIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM UMA BACIA EXPERIMENTAL DO
SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

DIÊGO CÉZAR DOS SANTOS ARAÚJO

ORIENTADORA:

PROF.^a. DR.^a. SUZANA MARIA GICO LIMA MONTENEGRO

CO-ORIENTADORA

PROF.^a DR.^a SYLVANA MELO DOS SANTOS

Dissertação apresentada à
Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como parte dos requisitos
do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção do
título de *Mestre*.

RECIFE

2016

Ficha catalográfica

A663d Araújo, Diego César dos Santos
Dinâmica da umidade e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano / Diego César dos Santos Araújo. – Recife, 2016.
111 f. : il.

Orientadora: Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Engenharia Agrícola, Recife, 2016.
Referências.

1. Interpolação 2. Geoestatística 3. Caatinga 4. Bacia experimental I. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima, orientadora
II. Título

CDD 631

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DINÂMICA DA UMIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICO E QUÍMICOS DO SOLO EM UMA BACIA EXPERIMENTAL DO
SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

DIÊGO CÉZAR DOS SANTOS ARAÚJO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como parte dos requisitos
do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção do
título de *Mestre*.

Data da aprovação: ___/___/_____

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro (DEAGRI/UFRPE)

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza (DEAGRI/UFRPE)

Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida (UFPB)

Prof^ª. Dr^ª. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (DEAGRI/UFRPE)
(Orientadora)

*“N3o vale a pena mergulhar nos sonhos
e esquecer de viver.”*

Albus Dumbledore

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu a vida e me permitiu chegar até aqui.

À minha mãe e meus irmãos, que sempre estiveram presentes em todas as etapas da minha vida.

Aos demais familiares, por torcerem constantemente pelo meu sucesso e vitória.

Aos amigos de turma, pelo companheirismo nos momentos de descontração e nas horas de dificuldade, especialmente Francisco (Pacho), Carol, Denize e Eulâmpio.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Suzana Montenegro, pela orientação e compartilhamento de conhecimentos ao longo desses dois anos.

Ao co-orientador, Prof. Dr. Abelardo Montenegro, por estar sempre presente ao longo da execução dos trabalhos, auxiliando e acompanhando todas as etapas de desenvolvimento das atividades.

À equipe de pesquisa do Laboratório de Hidrologia e Laboratório de Água e Solo, que sempre me auxiliou no laboratório e fora dele.

Ao Dr. Valdemir Junior, um dos grandes responsáveis pela finalização desse trabalho.

A Roberta Queiróz, Tiago, Edivaldo, Thayná Almeida, Daniella Pereira, Célia Santos, Renato Augusto e ao Sr. Malaquias, pela disponibilidade e contribuição.

À FACEPE e CNPq pelo apoio financeiro e concessão da bolsa de mestrado.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a obtenção do título de Mestre.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	11
GENERAL ABSTRACT.....	13
CAPÍTULO I	15
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Ciclo hidrológico.....	18
2.3. Bacias hidrográficas experimentais e representativas	20
2.4. Processos hidrológicos em regiões semiáridas.....	22
2.5. Dinâmica espaço-temporal da umidade do solo.....	23
2.6. Estabilidade temporal da umidade do solo.....	26
2.7. Métodos de determinação da umidade	27
2.8. Modelos de interpolação espacial de dados	30
2.8.1. Interpolação geoestatística: a krigagem	31
3. REFERÊNCIAS	35
CAPÍTULO II: Variabilidade espacial da umidade e atributos físicos e químicos do solo em uma bacia experimental do semiárido Pernambucano	45
RESUMO	45
ABSTRACT	46
1. INTRODUÇÃO.....	47
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	49
2.1. Caracterização da bacia hidrográfica do Riacho Jatobá.....	49
2.2. Monitoramento da umidade do solo.....	52
2.3. Calibração da sonda de capacitância Diviner 2000®	53
2.4. Amostragem e análises físicas e químicas de solo	54
2.5. Estatística descritiva e análise exploratória de dados.....	56
2.6. Estudo variográfico e krigagem	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
3.1. Calibração da sonda capacitiva Diviner 2000®	60
3.2. Análise exploratória dos dados de umidade do solo	63
3.3. Variação temporal da umidade do solo	66
3.4. Variabilidade espacial da umidade por classe de solo e cobertura.....	68

3.5. Análise exploratória e geoestatística de atributos físicos e químicos de solo	71
3.6. Relação entre umidade e propriedades físicas e químicas de solo	83
4. CONCLUSÕES	84
5. REFERÊNCIAS	85

CAPÍTULO III: Estabilidade temporal da umidade do solo em cultivo de banana no semiárido Pernambucano 90

RESUMO	90
ABSTRACT	91
1. INTRODUÇÃO.....	92
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	95
2.1. Caracterização da área de estudo	95
2.2. Monitoramento da umidade do solo.....	96
2.3. Análises estatísticas.....	97
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4. CONCLUSÕES	107
5. REFERÊNCIAS	109
CONSIDERAÇÕES FINAIS	112

Lista de Tabelas

Tabela 1. Equações obtidas para calibração da sonda Diviner 2000 [®] na estação seca, para as diferentes profundidades estudadas, em Argissolo Amarelo. -----	60
Tabela 3. Equações obtidas para calibração da sonda Diviner 2000 [®] na estação seca, para as diferentes profundidades estudadas, em Neossolo Litólico. -----	62
Tabela 4. Estatística descritiva dos dados de umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para os quatro meses do monitoramento na bacia do Riacho Jatobá. -----	64
Tabela 5. Estatística descritiva para o logaritmo da umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), durante os quatro meses de monitoramento, na bacia do Riacho Jatobá. -----	65
Tabela 6. Estatística descritiva dos dados de propriedades físicas e químicas do solo na bacia do Jatobá. D.S. = densidade do solo; C.O. = carbono orgânico; M.O. = matéria orgânica; C.E. = condutividade elétrica. -----	72
Tabela 7. Parâmetros de ajuste e validação dos semivariogramas teóricos de propriedades de solo. C0 = efeito pepita; C1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial (%); EMpad = erro médio padrão; RQMP = raiz quadrada média padronizada e EPP = efeito pepita puro. -----	75
Tabela 8. Valores médios de atributos físico-hidráulicos do solo da área em estudo, em Pesqueira-PE. -----	95
Tabela 9. Estatística descritiva dos dados espaciais de umidade coletados no município de Pesqueira, em cultivo de banana com e sem cobertura morta. -----	99
Tabela 10. Coeficientes de correlação da umidade do solo entre os horários de monitoramento para o setor sem cobertura morta. -----	104
Tabela 11. Coeficientes de correlação da umidade do solo entre os horários de monitoramento para o setor com cobertura morta. -----	105

Lista de Figuras

Figura 1. Parâmetros do semivariograma experimental. Fonte: Camargo et al. (2015).	33
Figura 2. Localização da Bacia Experimental do Riacho Jatobá, no município de Pesqueira-PE.....	49
Figura 3. Distribuição das unidades de solo e pontos de monitoramento e amostragem ao longo da bacia do Riacho Jatobá. Fonte: Melo et al. (2013).	50
Figura 4. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Experimental do Riacho Jatobá. .	51
Figura 5. Monitoramento de umidade do solo. (A) amostra sendo pesada para determinação de umidade por gravimetria; (B) leitura em campo com a utilização da sonda de capacitância Diviner 2000®.....	52
Figura 6. Etapas de amostragem de solo na bacia do Jatobá. (A) coleta de amostra indeformada; (B) cilindro no amostrador após a coleta; (C) amostra indeformada pronta para ser embalada; (D) amostras indeformadas e deformadas, devidamente protegidas.	55
Figura 7. Correlação entre as leituras de umidade volumétrica e suas correspondentes frequências relativas (A) e comparação da curva de calibração local com a encontrada por outros autores (B).	61
Figura 8. Correlação entre as leituras de umidade volumétrica e suas correspondentes frequências relativas (A) e comparação da curva de calibração local com a encontrada por outros autores (B).	63
Figura 9. Gráficos Q-Q Plot para umidade do solo (A) e seu logaritmo (B) a 0,0 – 0,1 m de profundidade, no mês de setembro.	66
Figura 10. Variação temporal média da umidade do solo durante o período avaliado, nas profundidades de 0,0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m; P_T = Precipitação total.	67
Figura 11. Umidade volumétrica média por classe de solo e tipo de cobertura vegetal. (A) e (B) - classes de solo; (C) e (D) - tipo de vegetação. AA - Argissolo Amarelo; NL – Neossolo Litólico; NR – Neossolo Regolítico; P – Pastagem; CAF – Caatinga arbóreo-arbustiva fechada; CAA – Caatinga arbustiva aberta.....	69
Figura 12. Box plot e histogramas com dados originais de frações granulométricas do solo com outlier, para a profundidade de 0,0-0,1 m (A e C), e sem outlier, para a profundidade de 0,1-0,2 m (B e D).....	73
Figura 13. Gráficos de superfície de tendência de primeira e segunda ordem para os atributos areia (A), argila (B), densidade do solo (C) e carbono orgânico (D), apenas para a profundidade de 0,0-0,1 m.....	74
Figura 14. Semivariogramas teóricos escolhidos para mapeamento da variabilidade espacial de propriedades de solo; C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; A = alcance. ..	77
Figura 15. Distribuição espacial de atributos físicos de solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE; D.S. = densidade do solo.	79
Figura 16. Distribuição espacial de atributos físicos de solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE.	80
Figura 17. Distribuição espacial de atributos físicos e químicos de solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE.....	81
Figura 18. Distribuição espacial da matéria orgânica (MO) do solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE.	82
Figura 19. Localização da área de estudo, em Pesqueira – PE.....	95

Figura 20. Esquema da área de estudo no município de Pesqueira, com localização dos pontos de amostragem.	96
Figura 21. Componentes do Sensor Falker HidroFarm. (Imagem: Fabricante/Falker). 97	
Figura 22. Box-plots para a umidade volumétrica do solo, nos setores com e sem cobertura morta. A; C – com cobertura; B; D – sem cobertura.	100
Figura 23. Comparação entre a umidade volumétrica média (%) no solo nos setores com cobertura e sem cobertura morta, em todos os horários de monitoramento.	101
Figura 24. Comparação entre a umidade no solo nos setores com cobertura (A) e sem cobertura morta (B), nos diferentes pontos (sensores) e instantes de medição.	102
Figura 25. Relação linear entre coeficiente de variação (CV) e umidade do solo, no setor com cobertura, temporalmente (A) e espacialmente (B), e no setor sem cobertura, temporalmente (C) e espacialmente (D).	103
Figura 26. Diferença relativa média e desvio-padrão para a umidade do solo nos setores com (A) e sem cobertura morta (B). Valores em destaque indicam os pontos que mais se aproximaram e se afastaram da média em qualquer tempo.	106
Figura 27. Comparação entre os teores médios de umidade no solo e os teores de umidade nas posições com estabilidade temporal nos horários de amostragem, nos setores com (A) e sem cobertura (B).	107

RESUMO GERAL

A variabilidade espacial e temporal da umidade do solo é amplamente conhecida e há muito tempo se tornou objeto de estudo da Hidrologia. Conhecer o comportamento dessa variável e compreender a sua sensível relação com os diversos fatores pedológicos e meteorológicos é essencial para auxiliar o manejo agrícola e promover a sua utilização de forma adequada. É necessário considerar que o conteúdo de água no solo está sujeito a processos diversos, como a evaporação, absorção pelas plantas, redistribuição, percolação e drenagem. Em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água torna-se limitada em virtude da irregularidade na distribuição das precipitações, o conhecimento da dinâmica espaço-temporal desse recurso é ainda mais importante. Com base nisso, o objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento espacial e temporal da umidade do solo em escala de bacia hidrográfica e em pequena área de 6.720 m² cultivada com banana, na cidade de Pesqueira-PE, situada no semiárido da região Nordeste. O segundo capítulo descreve os dados de umidade do solo para a bacia experimental do Riacho Jatobá, realizado durante quatro meses com escassez de chuvas e em 32 pontos ao longo da bacia, abrangendo três tipos de solo (Argissolo Amarelo, Neossolo Regolítico e Neossolo Litólico) e vegetação (pastagem, caatinga natural adensada e caatinga natural esparsa) com características representativas de sistemas típicos de regiões semiáridas. Os monitoramentos foram realizados mensalmente e possibilitaram identificar que as áreas com Argissolo Amarelo apresentaram maior conteúdo de água, assim como aquelas com predominância de caatinga. Adicionalmente, foram mapeadas propriedades físicas e químicas de solo. Os mapas de textura corroboraram a distribuição espacial da umidade, com maior conteúdo da fração argila nas áreas que apresentam maior umidade no solo. No terceiro capítulo, estão representados os dados de umidade do solo em uma pequena área cultivada com banana, a partir de 13 monitoramentos realizados no intervalo de dois dias. A umidade foi monitorada em 22 pontos, 11 com a utilização de cobertura morta e 11 sem a utilização da cobertura. Além da avaliação espacial da distribuição da umidade em função da cobertura, foram aplicadas, nos dados, as técnicas das diferenças relativas médias e desvios padrão com a finalidade de encontrar pontos que fossem capazes de representar o comportamento temporal da média dos demais locais de monitoramento, sob as mesmas condições avaliadas. Foi possível identificar que os pontos localizados no setor sem cobertura morta apresentaram maior conteúdo de água e que a técnica da estabilidade temporal mostra-se promissora na detecção de locações de monitoramento

estáveis ao longo do tempo, sendo recomendada a continuidade da coleta de dados para aprimorar o entendimento da dinâmica da umidade do solo na região estudada.

GENERAL ABSTRACT

The spatial and temporal variability of soil moisture is widely known and long ago became an object of study on Hydrology. To know the behavior of this variable and to understand its relation with the various pedological and meteorological factors is essential to assist the agricultural management and to promote its best beneficial use. It is necessary to consider that the water content in the soil is subject to various processes such as evaporation, plant water uptake, redistribution, percolation and drainage. In semi-arid regions where water availability becomes limited due to the irregularity in the distribution of rainfall, knowledge of the spatial-temporal dynamics of this feature is even more important. Based on this, the objective of this study was to evaluate the spatial and temporal behavior of soil moisture in a small watershed scale and on a small area of 6,720 m² cultivated with banana, in the city of Pesqueira, Pernambuco, located in Brazilian Northeast. The second chapter describes the soil moisture data for the experimental basin of Riacho Jatobá, held for four months with low rainfall at 32 locations along the basin, covering three types of soils (Yellow Argisol, Regolithic Neosol and Litholic Neosol) and vegetation (pasture, natural dense caatinga and natural sparse caatinga), with representative characteristics of typical systems of semi-arid regions. The monitoring was performed monthly and allowed identifying that the areas with Yellow Argisol showed higher water content, as well as those with a predominance of caatinga. In addition, physical and chemical properties of soil were mapped. Texture maps confirmed the spatial distribution of moisture, with higher content of clay fraction in areas with higher soils moisture. In the third chapter, soil moisture data in a small area cultivated with banana are presented, with 13 monitoring conducted in a two-day interval. The soil moisture was monitored at 22 locations, 11 with the use of mulch and 11 without using the cover. In addition to the spatial evaluation of soil moisture distribution for the different soil coverage the technique of mean relative differences and standard deviations was applied aiming to find points that could be able to represent the mean temporal behavior of the remaining monitoring locations under the same evaluated conditions. It was possible to identify that the points located in the no mulch sector showed more soil water content and the technique of temporal stability it was showed to be adequate in detecting stable monitoring points over time, being recommended the continuity of data collection to improve the understanding of the dynamics of soil moisture in the region studied.

- CAPÍTULO I -

1. INTRODUÇÃO GERAL

Na última década, o Brasil vem ampliando a discussão sobre o gerenciamento dos recursos hídricos, especialmente devido à crise mundial de abastecimento. Os Municípios, Estados e União criaram Leis com o sentido de promover o melhor gerenciamento desses recursos, como a Lei Federal nº 9.433/97, que tem como um dos seus objetivos “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”.

O estudo das disponibilidades hídricas de uma bacia hidrográfica é elemento fundamental para apoiar e orientar melhor o aproveitamento dos seus recursos. O conhecimento da disponibilidade hídrica, da demanda e dos fatores que influenciam o ciclo hidrológico são imprescindíveis para subsidiar os estudos de planejamento sócio-econômico-ambiental por meio de informações e dados básicos, necessários para melhor direcionar as tomadas de decisões.

De acordo com Monte-Mor (2012), a gestão e o planejamento dos recursos hídricos dependem de uma adequada mensuração da disponibilidade hídrica. A gestão racional da água deve ser fundamentada sobre uma profunda compreensão da disponibilidade hídrica, a qual é uma questão complexa e crucial para o desenvolvimento de uma região. O conhecimento detalhado das variáveis que compõem o ciclo hidrológico é o subsídio para uma gestão eficiente.

Devido à importância da pesquisa hidrológica no Nordeste brasileiro e com o objetivo de desenvolver pesquisas conjuntas e manter atualizado e ordenado o conhecimento científico e tecnológico da hidrologia do semiárido nordestino, em maio de 2001, foi criada a Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA), composta por pesquisadores das Universidades da Região Nordeste, ou seja, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Em seguida criou-se o Projeto de Implantação de Bacias Experimentais do Semiárido (IBESA) e o projeto Bacias Experimentais e Representativas

da Rede de Hidrologia do Semiárido (BEER) que, de forma integrada, desenvolveram atividades de pesquisa comuns, caracterizando as ações de grupos de pesquisadores através do engajamento com os propósitos do REHISA, implantando e desenvolvendo bacias experimentais e representativas na região semiárida do Nordeste brasileiro e aplicando metodologias unificadas.

A bacia do Riacho Jatobá, localizada no Estado do Pernambuco, foi uma das contempladas com o projeto. Inserida dentro da bacia Representativa do Riacho Mimoso, pertencente ao Rio Ipanema, essa bacia apresenta distribuição bem especializada, com poucos aglomerados habitacionais, podendo ser considerada tipicamente rural. Mudanças nos padrões de uso e ocupação, no entanto, vêm aos poucos alterando a paisagem, com a redução da vegetação natural (MELO, 2013).

Atualmente a Rede Cooperativa de Engenharia e Gestão de Recursos Hídricos (REHIDRO), inserida na REHISA, está atuando de modo conjunto e buscando compartilhamento de metodologias, sendo composta pelas universidades: UFPE, UFRPE, UFAL, Universidade de Brasília (UnB) e Universidade Federal de Sergipe (UFS). Esta rede tem buscado o desenvolvimento de estudos conjuntos, e fortalecer parcerias científicas e tecnológicas com apoio da FINEP, com o intuito de buscar o desenvolvimento, o aprimoramento e a difusão de técnicas para a manutenção dos ambientes e melhor aproveitamento dos recursos de água e solo em áreas sob escassez.

Em consequência disso, ultimamente vários trabalhos têm sido realizados na bacia Riacho Jatobá, principalmente relacionados à variabilidade e estabilidade temporal da umidade do solo (MELO e MONTENEGRO, 2015), avaliação dos padrões de precipitação (SILVA et al., 2013), modelagem aplicada ao estudo de processos hidrológicos (SANTOS et al., 2006), caracterização físico-hídrica de solos (SILVA et al., 2012), índice de erosividade das chuvas (SANTOS et al., 2006) e padrões de variação da umidade sob diferentes tipos de cobertura em parcelas experimentais para estudos de escoamento superficial do solo (MENEZES et al., 2013). No entanto, ainda há escassez de estudos direcionados ao mapeamento de propriedades físicas e químicas de solo, que podem ser avaliadas em conjunto com a umidade, já que podem influenciar ou serem afetadas por esta, auxiliando na compreensão de sua distribuição e dinâmica espacial. Esses dados são essenciais para, em conjunto com outras informações, auxiliar a gestão e manejo racional e eficiente da bacia.

Diante do exposto, essa pesquisa teve como objetivo geral avaliar os padrões de variação espaciais e temporais da umidade do solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, sob diferentes condições de solo e cobertura vegetal, bem como realizar o mapeamento de propriedades físicas e químicas do solo por meio de técnicas geoestatísticas, testando a hipótese de que o conteúdo de água no solo é variável no espaço e ao longo do perfil em função da influência de fatores pedológicos e da vegetação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ciclo hidrológico

A água é um elemento vital para a existência humana, sendo considerada não apenas um recurso natural que exploramos e utilizamos para as nossas atividades. A água, acima de tudo, é essencial para o correto funcionamento do clima da Terra, bem como de todos os ecossistemas e ambientes. Partindo desse princípio, aceita-se o ciclo hidrológico como sendo o conceito central da hidrologia, visto que ele é essencial para a compreensão de todos os fenômenos relacionados à água, em seus mais variados estados e formas de atuação, como a precipitação, escoamento superficial e subterrâneo, evaporação e transpiração (ÁVILA, 2008).

O ciclo hidrológico representa a contínua circulação da água sobre a superfície terrestre, subsolo e oceanos. Esse estado de dinamismo e movimentação constantes é impulsionado pela radiação solar e gravidade, que governam os principais processos relacionados à água (MOTHÉ et al., 2014). Como os mecanismos que regem o ciclo da água são concomitantes, é possível caracterizar o seu início e fim, de modo a estimar as vias de entrada e saída de água, bem como compreender os processos de movimentação e distribuição (HELLER e PÁDUA, 2010).

Na prática, estudos relacionados ao balanço hídrico geralmente se concentram em ambientes terrestres, com o intuito de examinar o balanço em uma determinada região ou local, considerando-se as entradas, saídas, trocas e armazenamento da água dentro da região de interesse. Como exemplos, podem ser citadas as áreas agrícolas, lagos, reservatórios e bacias hidrográficas. Práticas de gestão dos recursos hídricos dependem criticamente da contabilidade precisa do balanço hídrico em diferentes escalas temporais (RAMANATHAN et al., 2001).

No entanto, segundo Trenberth e Asrar (2012), maior parte dos estudos sobre o ciclo hidrológico englobam apenas aspectos específicos. Dados fiáveis sobre a dinâmica da água, muitas vezes, estão disponíveis apenas para determinadas regiões e em escalas espaciais limitadas. Alguns autores (SAHOO et al., 2011; VINUKOLLU et al., 2011) vêm tentando compreender aspectos do ciclo hidrológico em grandes bacias hidrográficas utilizando dados de satélite, mas eles não conseguiram fechar adequadamente o balanço hídrico devido a limitações nos dados de entrada, que dificultam a modelagem.

Isso deixa claro que os componentes do ciclo hidrológico são essenciais para a gestão dos recursos hídricos (OLIVEIRA, 2014). É fundamental o conhecimento dos processos envolvidos no ciclo dinâmico da água para que possam ser inferidas e adotadas medidas adequadas de gestão, com base em informações consistentes.

2.2. Recursos hídricos

O termo recursos hídricos refere-se à parcela de água doce acessível à humanidade no estágio tecnológico atual, a custo compatível com os seus diversos usos (JÚNIOR, 2004). Não se deve, no entanto, confundir os termos *água* e *recurso hídrico*. Enquanto o primeiro refere-se, em geral, ao recurso natural, desprovido de qualquer uso, o segundo trata da apropriação da água para atingir um determinado fim nas atividades econômicas e no trabalho (ROCHA et al., 2011).

A complexidade dos sistemas hídricos cresce devido à diminuição da disponibilidade de água e ao aumento da deterioração da qualidade deste recurso (TUCCI, 2009). Por meio da tecnologia moderna, foi possível a constatação e comprovação de que a disponibilidade dos recursos hídricos não é infinita, mas varia no tempo e no espaço e é afetada, voluntária ou involuntariamente, por ações humanas, o que levou à necessidade atual de gerir esses recursos, de modo a garantir a sua disponibilidade e assegurar a sua qualidade para as gerações futuras.

Em todo o mundo, nos últimos 25-30 anos, tem havido uma mudança intensa no ciclo hidrológico de rios e lagos resultante de ação antropogênica, afetando a qualidade de água e seu potencial como recurso hídrico. A extensão dos recursos hídricos e sua distribuição espacial e temporal são determinadas não apenas pelas variações climáticas naturais, como anteriormente ocorria, mas também pelas atividades econômicas humanas. Em muitas partes do mundo os recursos hídricos tornaram-se tão esgotados e contaminados que já não são capazes de atender a demanda crescente a eles imposta. Esse tem se tornado o principal fator de impedimento do desenvolvimento econômico e crescimento populacional (SHIKLOMANOV, 1988).

O adequado gerenciamento dos recursos hídricos deve estar sempre associado à gestão ambiental e articulado com o controle de uso da terra, principalmente quando se considera as atividades agrícolas e ocupação urbana, que influenciam diretamente esses recursos (RUHOFF e PEREIRA, 2003).

De acordo com Valente (1999), a gestão racional dos recursos precisa estar fundamentada na capacidade de prever a influência que as diversas atividades exercem sobre eles, e isso só se dá por meio de pesquisas quantitativas e qualitativas para o conhecimento dos variados fatores que intervêm nesse processo. De posse desses dados, é possível entender melhor os fenômenos que alteram a dinâmica desses recursos e representá-los matematicamente.

Para Porto e Porto (2008), uma gestão sustentável dos recursos hídricos requer um conjunto de instrumentos essenciais: uma adequada base de dados e informações socialmente acessível, a definição clara dos direitos de uso, o controle dos impactos resultantes da exploração de sistemas hídricos e os processos de tomada de decisão.

Vários estudos têm ressaltado a importância dos recursos hídricos para a humanidade. Sendo a bacia hidrográfica a unidade hidrológica principal de uma região, é preciso que sejam realizados estudos para assegurar o controle da ocupação dessas áreas e a preservação desses recursos, tanto em termos de quantidade como de qualidade (NEVES et al., 2007).

2.3. Bacias hidrográficas experimentais e representativas

Tucci (1997) e Silveira (2001) definem bacia hidrográfica como sendo uma área de captação natural da água advinda da precipitação, que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, sendo composta por um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório. Em complemento, Magalhães Jr. (2007) afirma que a bacia hidrográfica é compreendida por uma área onde a precipitação é captada e conduzida por um sistema de drenagem natural, onde o movimento da água superficial inclui todos os usos do solo e da água existentes na localidade.

A bacia hidrográfica representa um ambiente ideal para a análise do comportamento de um sistema natural, seja ele antropizado ou não (LIMA, 2008). É um sistema complexo, onde os fluxos da água e de sedimentos constituem os seus processos fundamentais e interagem com outros elementos do sistema. Assim, reforça-se a ideia de que a bacia hidrográfica é a unidade fundamental de estudo quanto aos processos naturais e, considerá-la dessa forma, impõe abordar todos os seus elementos (água, solo, flora, fauna, uso e ocupação do solo etc.), sendo necessário compreendê-la como uma totalidade

composta por elementos naturais e sociais intimamente correlacionados (FERREIRA et al., 2008). Ademais, vale considerar que, tudo que nela ocorre, repercute direta ou indiretamente nos rios e na qualidade e quantidade das águas (LEAL, 1995), afetando, dessa forma, a qualidade de vida e bem-estar social.

Nesse sentido, entram em cena as bacias experimentais, que são definidas como aquelas que visam, basicamente, o estudo do ciclo hidrológico e eventuais influências dos componentes desse ciclo no sistema. Assim, é permitida a produção de alterações intencionais nas características de uso e ocupação do solo da bacia, visando a simulação ou criação de situações específicas (PAIVA et al., 2004). Por serem principalmente destinadas à pesquisa científica, essas bacias geralmente são de pequeno porte, não ultrapassando 4 km². Dentre os seus principais objetivos, estão a avaliação da influência de diferentes manejos de solo e vegetação na produção de erosão e ciclo hidrológico; testar, validar e calibrar modelos de previsão hidrológica; treinamento de estudantes e técnicos com aparelhos de medição hidrológica e climática e estudos detalhados de processos físicos, químicos e biológicos do regime hídrico de bacias.

Já as bacias representativas são aquelas que podem representar uma região homogênea, sendo equipadas com ferramentas para o monitoramento de eventos hidrológicos e climáticos. Essas bacias são utilizadas para estudos, sem que haja alterações em suas propriedades, especialmente no solo e cobertura vegetal, que devem ser mantidos estáveis. Estudos nessas bacias tem como objetivo principal a obtenção de grandes séries históricas de dados hidrológicos, principalmente precipitação e vazão.

Desde o início dos anos 80, a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), com o incentivo de outras instituições, lançou o programa chamado “Bacias Experimentais”, com o intuito de instalar novas bacias voltadas à pesquisa no Nordeste. A primeira a ser contemplada, em 1981, foi a bacia de Sumé, na Paraíba, visando estudar os efeitos de diferentes tipos de cobertura sobre a erosão e escoamento superficial. Três anos depois foi implementada a bacia de Tauá, no Ceará, a partir de projeto inspirado nas atividades desenvolvidas na Bacia Experimental de Sumé.

Ainda dentro do Nordeste Brasileiro, foram criados projetos com o objetivo de implementar bacias representativas, principalmente na região semiárida, onde existe carência de dados hidrológicos. Atualmente, a sub-rede denominada Rede Cooperativa de Pesquisas em Recursos Hídricos (REHIDRO), composta por grandes universidades e

coordenada pela UFRPE, vem buscando o compartilhamento de metodologias de pesquisa em Hidrologia. O projeto REHIDRO está inserido na Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA), que já contribuiu com a instalação de bacias experimentais e representativas no semiárido e cerrado, como Bacia Representativa do Alto Ipanema – PE, Bacia Representativa do Rio Tapacurá – PE, Bacia Experimental do Alto Rio Jardim – DF, Bacia do Rio Japarutuba – SE (MONTENEGRO et al., 2014) e a própria Bacia Experimental do Riacho Jatobá (SILVA JUNIOR, 2010). Estudos já realizados e ainda em andamento nessas bacias são de grande valia por fornecerem informações que podem subsidiar processos de planejamento e gestão adequado desses ambientes.

Além dos estudos realizados e ainda em andamento na bacia do Jatobá, outros trabalhos são constantemente executados nas bacias representativas do Mimoso e do Rio Tapacurá, também no estado de Pernambuco. Dentre os principais aspectos pesquisados, destacam-se investigações relacionadas à produção de água e sedimentos (SILVA JUNIOR et al., 2011), estabilidade temporal da potenciometria e da sanidade (FONTES JUNIOR et al., 2012), avaliação da precipitação interna (MOURA et al., 2011), avaliação de perdas de solo por meio de modelagem (SILVA, 2010), análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação (SILVA et al., 2010) e estimativa da evapotranspiração de referência (MOURA, 2009).

2.4. Processos hidrológicos em regiões semiáridas

Em regiões semiáridas, existe uma grande preocupação acerca da disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos a longo prazo. Essa situação se agrava em consequência dos efeitos crescentes do clima, associados à reduzida disponibilidade, seja quantitativa ou qualitativa, de água superficial e subterrânea (GEHYI et al., 2012).

O semiárido brasileiro é marcado por índices de evapotranspiração potencial acima da precipitação anual encontrada na região, o que gera déficits hídricos, limitado os cultivos agrícolas de sequeiro. Além do problema associado à disponibilidade da água, esse déficit favorece a concentração de solutos nas fontes hídricas superficiais, degradando a qualidade das águas por meio da eutrofização e salinização. Nesse sentido, Montenegro e Montenegro (2006) enfatizam que, no semiárido, os vales aluviais apresentam susceptibilidade ao processo de acúmulo de sais, tanto na zona não-saturada

quanto na saturada, o que está relacionado, entre outros fatores, às características hidráulicas do solo.

De acordo com Sen (2008), a principal característica que diferencia o processo hidrológico em regiões áridas e semiáridas das demais é a sua variabilidade no espaço-tempo. Em regiões áridas, as oscilações no clima, em ciclos de longo prazo, são importantes. O mesmo vale para regiões semiáridas, onde a variação acentuada entre as estações do ano pode exigir a segregação de dados de base por estações. Ainda segundo o autor, no caso da precipitação, pode haver uma grande variação e irregularidade, tanto espacialmente quanto temporalmente, além do fato de os totais de precipitação individuais serem muito altos, sendo que, em muitos casos, uma única tempestade pode exceder a média anual. Estudando os padrões de variação da precipitação na região Nordeste do Brasil, Silva et al. (2010) e Souza et al. (1998) constataram a irregularidade do fenômeno, tanto espacialmente quanto temporalmente, o que comprova a condição anômala da região no que concerne à dinâmica irregular da precipitação.

Em cada microrregião do semiárido brasileiro, o início do período chuvoso ocorre em épocas diferentes. Essa irregularidade temporal e espacial da precipitação influencia diretamente a agricultura de sequeiro, que depende da manutenção da umidade do solo durante o período de cultivo. No que concerne à umidade do solo, é comum, em regiões semiáridas, a presença de vegetação escassa, crostas no solo e variações sutis de textura, que alteram significativamente os padrões de distribuição espacial do conteúdo de água. A depender das condições, essas características podem verter ou reter a água, deixando o padrão de umidade do solo no estado seco muito desordenado (Monte-Mor, 2012).

Em todo o mundo, existem poucos locais em regiões áridas e semiáridas onde a umidade do solo é medida rotineiramente. É crescente a quantidade de estudos nesses locais com o objetivo de entender as alterações da umidade e a descoberta de novas metodologias capazes de quantificá-las, bem como compreender a sua relação com outras variáveis hidrológicas.

2.5. Dinâmica espaço-temporal da umidade do solo

A umidade do solo é um elemento essencial para compreender uma série de processos hidrológicos e climáticos em diferentes escalas espaciais e temporais (HEATHMAN et al., 2009). De ponto de vista hidrológico, a umidade do solo regula o

escoamento superficial, infiltração, armazenamento de água e drenagem. Além disso, ela é essencial no manejo da irrigação e produtividade das culturas, principalmente em áreas onde existe alta demanda evapotranspirativa (SOUZA et al., 2011).

A umidade do solo tem papel fundamental na divisão dos fluxos de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera, sendo de suma importância nos estudos de previsão de cheias, da produção agrícola, do balanço de energia, etc. Desempenha, segundo Li et al. (2011), um papel importante nos modelos climáticos, hidrológicos, agrícolas e biogeoquímicos. Vários estudos climáticos indicam que a circulação atmosférica e a precipitação pluvial são afetadas significativamente pela grande escala da variação da umidade do solo e evaporação (MOHAMED et al., 2004).

Em estudos hidrológicos, o solo representa o principal meio de transporte e armazenamento de água. Nas camadas superficiais, os processos relacionados à movimentação da água, como a infiltração, evaporação, drenagem, redistribuição e absorção pelas plantas, ocorrem de forma mais representativa, o que demanda maior conhecimento da dinâmica da umidade nesses locais (LIMA et al., 2012).

A umidade do solo (θ) é definida pelo volume de água dividida pelo volume de solo. Segundo Qiu et al. (2001), diversos fatores podem influenciar a sua distribuição, dentre eles o uso do solo, declividade, posição de declive e elevação relativa, propriedades do solo, radiação solar, precipitação e outros fatores climáticos.

A variação espacial e temporal da umidade está sendo cada vez mais estudada, visto que essa informação é necessária para a simulação de modelos hidrológicos. O conhecimento da variação espaço-temporal da umidade do solo auxilia na sua caracterização. Como houve um incremento representativo na utilização de modelos matemáticos para simular o movimento da água e seus solutos, é necessário, também, entender as variabilidades das propriedades do solo que influenciam a interpretação dos dados de saída do modelo (PANDEY e PANDEY, 2010).

O estudo da variabilidade espacial se destaca devido às características de heterogeneidade dos solos, principalmente em virtude dos processos de formação dos mesmos, que lhes conferem atributos físicos distintos, alterando a forma como atuam na movimentação, redistribuição, infiltração e armazenamento da água. Nos últimos anos,

vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de avaliar a variabilidade espacial em propriedades físico-químicas do solo.

O conhecimento da umidade do solo e sua variação, em uma bacia hidrográfica, é fundamental para o gerenciamento de recursos hídricos regionais em épocas de inundação ou seca (MORAN et al., 2006). Apesar da importância dos estudos em bacias hidrográficas, uma das dificuldades ainda presentes ocorre porque o monitoramento é relativamente demorado e oneroso devido à alta variabilidade ao longo do tempo e espaço (LIU et al., 2011).

Em uma bacia hidrográfica, além das atividades humanas que demandam água em quantidade e qualidade diferenciada, ocorre também a perda de água através de fenômenos naturais diretamente relacionados com a vegetação local. O papel desempenhado pela cobertura vegetal no processo de circulação da água é uma das questões mais controversas em hidrologia. Isso se deve à complexidade dos fenômenos envolvidos nas interações da água com o meio solo-vegetação-atmosfera, ou seja, durante os processos de interceptação e evapotranspiração (NEVES et al., 2007).

Sugimoto (2008) ressalta ainda que por meio do arraste das partículas do solo, há o transporte de nutrientes, matéria orgânica, água, sementes, fertilizantes e outros compostos, causando queda na produtividade das culturas e reduzindo a capacidade de armazenamento dos reservatórios de água, em consequência da sedimentação e assoreando de córregos. Além de proteger o solo, a cobertura vegetal induz a um maior armazenamento de água e melhoria dos seus atributos físicos, químicos e biológicos. Daí a necessidade de analisar padrões de variação da umidade e sua relação com tipo e cobertura do solo, bem como com a precipitação.

FENG et al. (2013) avaliando a influência do uso do tipo de cobertura no teor de umidade, identificou que, a depender da cobertura, ocorrem alterações no conteúdo de água e essa variação altera em profundidade, de acordo com o tipo de vegetação. Outros fatores, como o tipo de solo e a topografia do terreno, também podem influenciar significativamente os níveis de umidade no solo (QIU et al., 2001). No que concerne à precipitação, Silva et al. (2013) analisaram o comportamento da umidade do solo em bacia representativa no agreste de Pernambuco e observaram que a umidade apresentou respostas rápidas aos eventos de chuva, e apresentou picos isolados e de baixa significância no ano de 2012 em função da escassez hídrica.

A umidade deve ser estudada levando-se em conta que ela influencia e, ao mesmo tempo, sofre a influência de outros processos que ocorrem no solo. Quanto maior for a quantidade de variáveis consideradas quando se deseja estimar a variabilidade espacial e temporal da umidade, mais completos serão os resultados obtidos.

2.6. Estabilidade temporal da umidade do solo

Apesar da grande quantidade de pesquisas relacionadas à variação espacial da umidade, ainda são mais difíceis de encontrar informações sobre a sua variabilidade temporal (ÁVILA, 2008). Após a publicação do artigo de Vachaud et al. (1985), que propuseram duas técnicas para avaliação da dinâmica temporal da umidade, tem crescido o interesse pela análise desse comportamento da água no solo. No caso da umidade, a técnica pode ser aplicada para detectar pontos estáveis ao longo do tempo que representam a média da umidade em toda a área de estudo, reduzindo esforço operacional e gastos com equipamentos para mensurar a umidade nesses locais. Essa metodologia está sendo bastante aplicada recentemente e vem apresentando sucesso na determinação de locações de medição que expressam de forma segura a média espacial da umidade (COSH et al., 2008; BROCCA et al., 2010; SOUZA et al., 2011; MITTELBACH e SENEVIRATNE, 2012; MINET et al., 2013).

Em se tratando de estabilidade temporal, Gonçalves et al. (1999) destacam que se há variabilidade e estabilidade espacial na área, então existirão pontos que sistematicamente apresentarão a umidade igual à média amostral, independente do nível de umidade no solo e da variação temporal dessa média, o que leva à implicação prática de que esses pontos poderiam ser utilizados para avaliar o conteúdo de água médio no solo em qualquer tempo. Esse conceito é ainda mais realístico em se tratando de umidade, uma vez que a probabilidade de que uma posição mais úmida em um determinado instante tenda a ficar assim em outros momentos é grande (persistência temporal).

Melo Filho e Libardi (2005) enfatizam que essa metodologia pode ser utilizada para responder às crescentes questões sobre problemas relativos à amostragem para medições de propriedades do solo com alta variabilidade, como é o caso da umidade e condutividade hidráulica, podendo gerar ricas informações científicas e auxiliar na solução de problemas contemporâneos ligados à agricultura, aliando o econômico ao técnico e gerando resultados que poderão ser utilizados com segurança e confiança.

2.7. Métodos de determinação da umidade

De acordo com Brocca et al. (2011), estimativas da umidade do solo podem ser obtidas de diferentes maneiras, por meio de medições em campo, dados de satélite e modelos hidrológicos. No entanto, a forma mais precisa de mensurar a umidade é através de medições desta variável. Dentre os métodos utilizados, existem os diretos, que envolvem, de alguma forma, a separação da matriz do solo, permitindo a leitura direta da água removida. Essa prática pode ser executada através do aquecimento do solo, bem como a utilização de solventes ou reações químicas. Já os métodos indiretos determinam alguma propriedade física ou química relacionada à umidade do solo, como a constante dielétrica (ou permissividade dielétrica), condutividade elétrica, capacidade térmica, conteúdo de H ou susceptibilidade magnética (TOPP e FERRÉ, 2002).

A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) tem sido uma das técnicas indiretas de determinação da umidade volumétrica dos solos (θ) mais utilizadas atualmente, principalmente devido à sua exatidão, não utilização de radiação-ionizante, pequena influência na salinidade do solo, da densidade, da textura e da temperatura do solo e pela possibilidade de automação e multiplexação de um grande número de sensores em um único equipamento (NOBORIO, 2001; MANIERI et al., 2007).

A TDR é utilizada principalmente com a finalidade de monitorar a umidade superficial do solo, permitindo a descrição detalhada dessa variável e a sua variação ao longo do tempo. As medidas de conteúdo de água fornecidas pela TDR são baseadas na forte correlação observada entre a constante dielétrica do solo e o seu conteúdo volumétrico de água (GRECO e GUIDA, 2008). A técnica está fundamentada no sensível efeito da umidade do solo sobre a velocidade de pulsos de microondas em cabos condutores (guia) envoltos pelo solo. Esse fenômeno deve-se à diferença existente nas constantes dielétricas (K_a) da água, do ar e do solo.

Outro equipamento bastante utilizado no meio científico é a sonda de nêutrons (SN), que é formada por um cilindro metálico contendo uma fonte radioativa (que emite nêutrons rápidos), um detector para nêutrons térmicos e um pré-amplificador (FALLEIROS, 1994). É também uma técnica indireta de determinação da umidade do solo.

Resumidamente, o método funciona da seguinte forma: nêutrons rápidos são emitidos de uma fonte e atravessam as paredes dos tubos de acesso à sonda e, interagindo com os átomos de hidrogênio do solo, são termalizados e formam uma “nuvem de nêutrons lentos, desacelerados, com um diâmetro médio de 20 cm ao redor da fonte emissora. Esses nêutrons, no interior do solo, são identificados por outro componente da sonda, o detector de cintilação de lítio, sendo estão registrados por meio de um sistema eletrônico de contagem localizado na caixa de blindagem, na superfície do solo (LEMOS FILHO, 2010). Assim, quanto maior for a concentração de hidrogênio no solo, tanto maior será a contagem de nêutrons lentos e, conseqüentemente, a umidade do solo.

Outro método indireto que vem se popularizando é a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) ou capacitância, onde é criado um campo elétrico de alta frequência ao redor do sensor, partindo do tubo de acesso e penetrando pelo solo, em que as trocas de frequência do circuito é função das trocas de capacitância. Segundo Kunz et al. (2014), essa técnica tem sido amplamente difundida na pesquisa científica, em função de sua precisão, facilidade de acoplamento a um sistema de coleta de dados, rapidez e segurança ao operador.

Pereira et al. (2006) descrevem que, através desse método, a estimativa do conteúdo de água no solo ocorre por meio da mensuração da constante dielétrica calculada, e este valor é baseado no tempo de emissão/reflexão de um pulso eletromagnético, emitido por um gerador de pulsos presentes na sonda.

Em escala de bacia hidrográfica, vários trabalhos já comprovaram a eficiência de sensores FDR na mensuração do conteúdo de água no solo, em diferentes condições de cobertura e profundidades de monitoramento. Melo (2013) e Silva Junior (2015), avaliando os padrões de variação espaciais e temporais da umidade do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano, detectaram boa precisão com a sonda portátil Diviner 2000[®], da Sentek, em 18 pontos de monitoramento sob diferentes condições de cobertura vegetal, tipo de solo e profundidades amostrais. Heathman et al. (2012), também concluíram que a utilização de sondas FDR fixas ao solo, nas profundidades de 0,2 m a 0,5 m, foram eficientes na determinação da umidade volumétrica em uma bacia hidrográfica do estado da Indiana, Estados Unidos.

Como são sensíveis à salinidade e propriedades inerentes a cada classe de solo, esses sensores requerem calibração específica para melhorar a precisão das leituras, em

cada ponto de monitoramento e para cada profundidade amostrada (BARBOSA et al., 2012). Embora os fabricantes apresentem equações de calibração padrão, que relacionam o conteúdo de água à leitura de cada sensor, é necessário levar em conta os padrões de variação da umidade e as diferentes respostas, a depender do local em estudo (SILVA et al., 2012).

Sensores de capacitância, como o Diviner 2000[®] e o EnviroScan[®], têm sido bastante utilizados nos últimos anos para estimar a umidade do solo em diferentes escalas espaciais (SILVA et al., 2007; PRIMO et al., 2015; MELO e MONTENEGRO, 2015), oferecendo ótimos resultados em trabalhos que requerem o conhecimento do conteúdo de água do solo com eficiência e precisão (FARES e ALVA, 1999; GIRONA et al., 2002).

Os sensores FDR são largamente indicados devido à sua flexibilidade de uso, visto que, com um único equipamento, é possível realizar leituras em campo em vários pontos distintos e a diferentes profundidades ao longo do perfil (RAMOS et al., 2014). Isso é possível porque as sondas são móveis, o que acarreta menos custos com a aquisição de equipamentos. Além disso, elas permitem identificar as perdas de água por evaporação e drenagem profunda, considerando que são capazes de fornecer dados precisos acerca do conteúdo de água no solo entre os intervalos de 0,1 m a 1,5 m de profundidade (SENTEK, 2001).

Existem vários trabalhos realizados em condições distintas de solo que proporcionaram o desenvolvimento de equações de calibração para a Diviner 2000[®] (FARES et al., 2004; SILVA et al., 2007; ANDRADE JUNIOR et al., 2007), porém, é necessário considerar que esse é um procedimento local, que deve ser realizado *in situ* para que as leituras fornecidas pela sonda possam ser efetivamente representativas na área em estudo, elevando-se ainda mais as certezas advindas das predições.

A mensuração da umidade do solo em campo apresenta-se como uma forma bastante precisa de estimativa desta variável, mas por um longo tempo e em grandes áreas se torna inviável diante do custo operacional envolvido na instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra, visto que os equipamentos que medem a umidade do solo em campo de forma pontual atingem poucos metros quadrados.

2.8. Modelos de interpolação espacial de dados

Conforme Jacob e Young (2006), os avanços computacionais e aprimoramento das técnicas de mapeamento vêm possibilitando, nos últimos anos, estimativas cada vez mais precisas e confiáveis de atributos mapeados, com a mensuração de erros associados à predição, que dão uma ideia do grau de precisão e confiabilidade dos diferentes métodos interpoladores.

A interpolação pode ser definida como uma técnica que visa estimar valores de atributos específicos em locais onde eles não foram amostrados, tomando como base pontos na mesma área ou região, onde o valor já é conhecido (mensurado). A lógica por trás desse método é que, em média, os valores do atributo tendem a ser mais similares e contínuos em locais mais próximos, alterando a continuidade conforme afasta-se de um ponto específico de origem. Esse conceito fundamenta a base das relações entre fenômenos de diferentes naturezas, utilizando a correlação espacial como meio de diferença dos atributos estimados (CÂMARA e MEDEIROS, 1998).

Existem diferentes modelos disponíveis que possibilitam modelar a variabilidade espacial de determinado atributo, gerando superfícies que permitem estudar o fenômeno de forma realista. Os principais métodos utilizados para interpolação são, segundo Camargo et al. (2015): *modelos determinísticos de efeitos locais* (cada ponto da superfície é estimado com base, apenas, na interpolação das amostras mais próximas, utilizando funções como o inverso do quadrado da distância – IDW; nesse caso, predominam os efeitos puramente locais, não sendo feita qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial); *modelos determinísticos de efeitos globais* (supõe que, para a caracterização do fenômeno em estudo, predomina a variação em larga escala, e que a variabilidade local não é relevante; engloba os interpoladores por superfície de tendência); *métodos estatísticos de efeitos locais e globais – krigagem* (cada ponto é estimado apenas a partir do valor das amostras mais próximas, utilizando um estimador geoestatístico; esses procedimentos requerem que a variabilidade local e global sejam modeladas através de modelos específicos).

A escolha do melhor modelo de interpolação deve levar em conta o objetivo que se deseja atingir e a forma de disposição dos pontos de amostragem na malha, de modo que sejam obtidos os menores erros de interpolação possíveis, possibilitando uma representação real do fenômeno em estudo.

2.8.1. Interpolação geoestatística: a krigagem

A geoestatística possibilita a caracterização da variabilidade espacial da distribuição de diferentes propriedades ou elementos presentes na natureza e, em conjunto com outras técnicas estatísticas, permite contribuir para a tomada de decisões sobre o manejo do fenômeno em estudo (ZANETTE et al., 2007).

A krigagem é formada por um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estruturação espacial. Assim, assume-se a hipótese intrínseca de que o processo estudado é estacionário, dotado de dependência espacial (CAMARGO et al., 2015). Os seguintes passos são pré-requisito quando se deseja trabalhar com mapeamento utilizando a krigagem:

- (a) análise exploratória de dados (estatística descritiva);
- (b) análise estrutural (modelagem da estrutura de correlação espacial);
- (c) interpolação estatística da superfície (mapeamento por krigagem).

A krigagem está fundamentada no conceito das “*variáveis regionalizadas*”, que podem ser definidas, segundo Matheron (1963), como uma função espacial numérica, que varia espacialmente, de um local para outro, com uma continuidade geográfica aparente, que pode ser representada por funções numéricas que assumem um valor definido a cada ponto do espaço e, matematicamente, descrevem o comportamento de um fenômeno natural específico.

A geoestatística dispõe de interpoladores bastante eficazes, precisos e eficientes, que possibilitam estimar com alta precisão valores de um determinado atributo onde ele não foi amostrado (SALGUEIRO, 2005). Ao contrário do inverso do quadrado da distância, que é fácil e simples de ser executado, a krigagem geoestatística consome muito mais tempo, é mais complicada e exige certa experiência do pesquisador (KRAVCHENKO e BULLOCK, 1999). Em contrapartida, ela faz uma estimativa muito mais acurada da dependência espacial dos dados e produz uma valiosa e rica estimativa dos erros associados à interpolação, por estar fundamentada em uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio (ASSIS SILVA et al., 2008).

Quando duas amostras de um atributo z forem coletadas em um ponto qualquer do campo, com as direções x e y conhecidas, e quando há a necessidade de interpolação entre

os locais para a construção de mapas de isolinhas, é necessário utilizar uma ferramenta adequada para inferir a dependência espacial (VIEIRA, 2000). Essa ferramenta é usualmente conhecida como semivariograma e está representada, matematicamente, na equação 1.

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

onde:

$\gamma^*(h)$ é o semivariograma estimado, e $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $Z(x_t)$ e $Z(x_t + h)$, separados pelo vetor h . O uso desse estimador pressupõe que a propriedade atenda a uma condição de estacionaridade e, segundo Montenegro et al. (1999), um número mínimo de 30 pares é requerido para que a estimativa possa ser feita com relativa precisão.

Graficamente, o semivariograma experimental pode ser representado como na Figura 1. Espera-se, como demonstrado, que observações geograficamente mais próximas entre si tenham um comportamento mais uniforme e semelhante do que aquelas situadas a maiores distâncias. Isso indica que o valor absoluto da diferença entre duas amostras $Z(x_t)$ e $Z(x_t + h)$ tende a crescer gradativamente conforme aumenta a distância entre elas, até que seja atingido um valor no qual o efeitos locais não teriam mais influência, encerrando-se o pressuposto da dependência espacial entre os pares amostrados (CAMARGO et al., 2015).

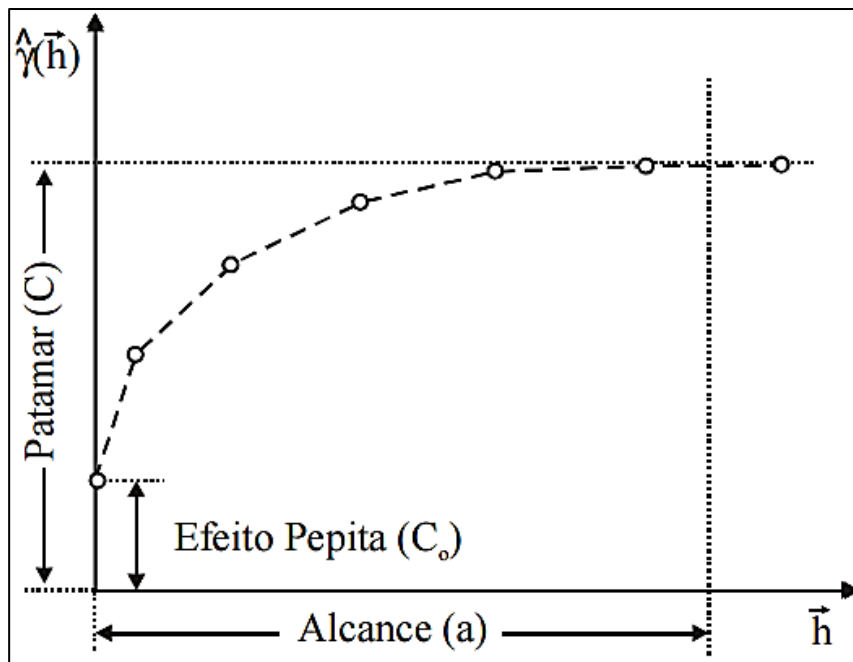


Figura 1. Parâmetros do semivariograma experimental. Fonte: Camargo et al. (2015).

Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se espacialmente correlacionadas. A partir dessa distância, deixa de existir a dependência espacial entre os valores;

Patamar (C): é o valor que corresponde (coincide) ao alcance. A partir desse ponto, a variância da diferença entre os pares de amostras ($Var [Z(x_t) - Z(x_t + h)]$) torna-se aproximadamente constante;

Efeito pepita (C_0): em uma condição ideal, $\gamma^*(h) = 0$. No entanto, à medida em que h tende a zero, $\gamma^*(h) = 0$ vai se aproximando de um valor positivo chamado *efeito pepita*, que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores de que a menor distância amostrada. Ele representa o valor da semivariância para a distância zero. Essa descontinuidade pode estar relacionada tanto a escolha inadequada da distância entre os pares de amostras que compõem a malha quanto a erros de coleta de dados/medição em campo. Na prática, é como se uma mesma amostra, coletada em um mesmo ponto, apresentasse valores diferentes se forem tomadas repetições diferentes, o que gera o efeito pepita. Quando a semivariância é igual ao patamar, para qualquer valor de distância, tem-se o chamado efeito pepita puro, que é a total ausência de dependência espacial (BOTTEGA et al., 2013).

A partir da obtenção do semivariograma experimental, é necessário realizar o ajuste, que não é direto e automático e sim interativo, pois depende da intervenção do intérprete, que faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico, mediante a mensuração de erros e *validação cruzada* (as amostras com dados originais são removidas e, com base nos pontos vizinhos, um novo valor a ela é atribuído, sendo esta posteriormente comparado do valor experimentalmente mensurado). Dependendo do ajuste, é conveniente redefinir e refinar – ou não – o modelo, até que seja obtido um considerado satisfatório (JACOB e YOUNG, 2006).

Nos últimos anos, vários estudos vêm sendo realizados com o intuito de estudar a distribuição espacial de atributos hidrológicos em áreas agrícolas e em bacias hidrográficas, principalmente a umidade do solo (ÁVILA et al., 2010; SOUZA et al., 2011; MONTE-MOR et al., 2012; FELTRIN et al., 2013). No entanto, propriedades de solo que interferem ou são influenciadas pela dinâmica da água, também vêm ganhando destaque na geoestatística.

Tavares et al. (2014) utilizaram a interpolação por meio da krigagem para estudar a variabilidade espacial da umidade do solo, em área cultivada com cenoura, no estado de Pernambuco, bem como atributos físicos relacionados ao movimento e retenção de água, como textura e resistência à penetração. Assim como Montenegro e Montenegro (1999), que avaliaram a distribuição espacial de atributos hidráulicos do solo, bem como da condutividade elétrica, em escala de bacia hidrográfica, também no semiárido pernambucano.

O principal mérito da geoestatística é a possibilidade de construção de mapas a partir da krigagem, permitindo que seja conhecida a distribuição de uma determinada variável na área de estudo. Isso facilita a compreensão da dinâmica do fenômeno e facilita a tomada de decisões, com a adoção de medidas diferentes para cada locação mapeada, dependendo da distribuição espacial da variável.

3. REFERÊNCIAS

ADUBUWAILI, J. et al. Spatial distribution of soil moisture, salinity and organic matter in Manas River watershed, Xinjiang, China. **Journal of Arid Land**, v. 4, n. 4, p. 441–449, 2012.

ADUBUWAILI, J. et al. Spatial distribution of soil moisture, salinity and organic matter in Manas River watershed, Xinjiang, China. **Journal of Arid Land**, v. 4, n. 4, p. 441–449, 2014.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; SILVA, C. R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.**, Belém, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Paulo: UNISINOS, 2013.

ASSIS SLVA, S. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agrivultura de precisão. **IDESIA**, v. 26, n. 2, mai/ago 2008.

ÁVILA, L. F. **Comportamento espacial e temporal da umidade do solo numa bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais**. Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 120. 2008.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1257–1266, 2010.

ÁVILA, L. F.; MELO, C. R.; SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1257–1266, 2010.

BARBOSA, M. A. G. et al. Calibração de sensor FDR ECH2O para determinação da umidade em dois tipos de solos. **In: INOVAGRI**, Fortaleza, mai 2012.

BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, jan/mar 2013.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 131–139, 2010.

BRITO, M. D. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta à silvicultura de precisão**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 89. 2014.

BROCCA, L. et al. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. **Water Resources Research**, v. 46, 2010.

BROCCA, L. et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 3390-3408, 2011.

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JUNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 42, n. 2, p. 258-267, 2011.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: _____
In: ASSAD, E.D.; SANO, E. E. (Ed.). Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura. Brasília: Embrapa-SPI, 1998. p. 3-11.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. **INPE**, 2015. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/analise/cap3.pdf>>. Acesso em: 30 dez 2015.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. Teste de Filiben para validar modelos Geoestatísticos aplicados a agroclimatologia. **In: Anais. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA**, São Pedro, 2004.

COELHO FILHO, M. A.; COELHO, R. D.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 239-246, 2001.

CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R. **Levantamento detalhado de solos da fazenda Nossa Senhora do Rosario (Pesqueira – PE)**. Relatório Técnico: UFRPE/UFPE/CNPq/BNB. Recife, p. 35. 2001.

COSH, M. H. et al. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 304-313, 2008.

COSTA, C. A. G. et al. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 44, n. 4, p. 685-694, out/dez 2013.

EITEN, G. **Classificação da vegetação do Brasil**. Ed. CNPq, Brasília. 305 pp.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA - SPI, v. 2, 2006. 306 p.

FALLEIROS, M. C. **Medida da umidade do solo com sonda de nêutrons. (Tese - Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear)**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo. [S.l.]. 1994.

FAMIGLIETTI, J. S. et al. Field observations of soil moisture variability across scales. **Water Resources Research**, v. 44, n. 1, jan 2008.

FARES, A. et al. Dual Field Calibration of Capacitance and Neutron Soil Water Sensors in a Shrinking–Swelling Clay Soil. **Vadose Zone J.**, Madison, v. 3, n. 4, p. 1390-1399, 2004.

FARES, A.; ALVA, K. A. Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance. **Soil Science**, v. 164, n. 5, p. 302-310, 1999.

- FELTRIN, R. M. et al. Seasonal variation in soil water content for forest and pasture in southern Brazil. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 56, 2013.
- FENG, Q. et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and the scale variability of its influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. **Water**, v. 5, p. 1226-1242, 2013.
- FENG, Q. et al. Spatial Heterogeneity of Soil Moisture and the Scale Variability of Its Influencing Factors: A Case Study in the Loess Plateau of China. **Water**, v. 5, p. 1226-1242, 2013.
- FERREIRA, M. I. P.; SILVA, J. A. F.; WERNECK, B. R. Marcos conceituais para gestão de recursos hídricos. **In: Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, 2, jul/dez 2008.
- FONTES JUNIOR, R. V. P. et al. Estabilidade temporal da potenciometria e da salinidade em vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1188-1197, nov 2012.
- GEHYI, H. R. et al. **Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2012.
- GIRONA, J. et al. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water stress. **Agricultural Water Management**, v. 54, p. 107-122, 2002.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em uma área irrogada por pivô central. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:155-164, 1999.
- GRECO, R.; GUIDA, A. Field measurements of topsoil moisture profiles by vertical TDR probes. **Journal of Hydrology**, v. 348, p. 442-451, 2008.
- GUARIZ, H. R. et al. Variação da Umidade e da Densidade do Solo sob Diferentes Coberturas Vegetais. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 3293 – 3296, 2009.
- GUO, D. et al. Temporal changes in spatial patterns of soil moisture following disturbance: an experimental approach. **Journal of Ecology**, v. 90, p. 338 – 347, 2002.
- HEATHMAN, G. C. et al. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA. **Catena**, v. 78, p. 159-169, 2009.
- HEATHMAN, G. C. et al. Multi-scale temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture within the Upper Cedar Creek Watershed, Indiana. **Catena**, v. 95, p. 91-103, 2012.
- HEGEDUS, P. et al. Analysis of spatial variability of near-surface soil moisture to increase rainfall-runoff modelling accuracy in SW Hungary. **Open Geosciences**, v. 7, n. 1, p. 2391-5447, abr 2015.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. [S.l.]: UFMG, v. 2, 2010.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. **Análise exploratória de dados: técnicas robustas, um guia.** Lisboa: Salamandra, 1992. 446 p.

INSTITUTO AGRONÔMICO - IAC. Argissolos. **IAC - SP**, 2016. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/pdf/Argissolos.pdf>>. Acesso em: 06 jan 2016.

JABRO, J. D. et al. Spatial variability and correlation of selected soil properties in the Ap Horizon of a CRP Grassland. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 26, n. 3, p. 419-428, 2010.

JACOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. **In: XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais - ABEP**, Caxambu, set 2006.

JAMES, S. E. et al. Temporal heterogeneity of soil in grassland and forest. **Journal of Ecology**, v. 91, p. 234 – 239, 2003.

JÚNIOR, J. S. P. **Recursos hídricos – conceituação, disponibilidade e uso. Biblioteca digital da câmara dos deputados.** Centro de documentação e informação. Brasília. 2004.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. A comparative study of interpretation methods for mapping properties. **Agron**, v. 91, p. 393-400, 1999.

KUNZ, J.; ÁVILA, V. S.; PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento superficial. **Revista Monografias Ambientais - REMOA**, v. 13, n. 5, p. 3963-3976, dez 2014.

LEAL, A. C. **Meio ambiente e urbanização na microbacia do Areia Branca - Campinas -São Paulo. (Dissertação - Mestrado em Geociências e Meio Ambiente).** Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. São Paulo, p. 155. 1995.

LEMOS FILHO, L. C. A. **Estabilidade temporal e análise espacial do armazenamento de água em solo arenoso da região de Petrolina-PE (Tese - Doutorado em Engenharia Agrícola).** Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2010.

LI, Q. et al. Comparison of two retrieval methods with combined passive and active microwave remote sensing observations for soil moisture. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, p. 1181-1193, 2011.

LIBARDI, P. L.; MELO FILHO, J. F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 197-206, 2006.

LIMA, J. E. F. W. et al. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de latossolos do cerrado em condições de campo. **RBRH**, v. 17, n. 1, p. 23-32, jan/mar 2012.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas.** 2. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2008. 253 p.

LIU, W.; XU, X.; KIELY, G. Spatial variability of remotely sensed soil moisture in a temperate-humid grassland catchment. **Ecohydrology**, v. 5, n. 5, p. 668-676, 2011.

- MAGALHÃES JR, A. P. **Indicadores Ambientais e Recursos Hídricos: Realidade e perspectivas para o Brasil a partir da experiência francesa.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 668 p.
- MANIERI, J. M.; VAZ, C. M. P.; MARIA, I. C. Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31 , n. 2, mar/abr 2007.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
- MELO FILHO, J. F.; LIBARDI, P. L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transeção. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:497-506, 2005
- MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal. (Tese - Doutorado em Recursos Florestais)**. Universidade de São Paulo campus Piracicaba. Piracicaba, p. 122. 2004.
- MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Florestalis**, v. 1, n. 69, p. 25-37, 2005.
- MELO, O. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica. **RBRH**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 430-441, abr/jun 2015.
- MELO, R. O. **Estabilidade temporal e variabilidade da umidade do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano. (Tese - Doutorado em Engenharia Agrícola)**. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 91. 2013.
- MENEZES, J. A. L. et al. Comportamento temporal da umidade do solo sob Caatinga e solo descoberto na Bacia Experimental do Jatobá, Pernambuco. **Water Resources and Irrigation Management**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 45-51, Jan-Abr 2013.
- MINET, J. et al. Temporal stability of soil moisture patterns measured by proximal ground-penetrating radar. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 10, p. 4063–4097, 2013.
- MITTELBAACH, H.; SENEVIRATNE, S. I. A new perspective on the spatio-temporal variability of soil moisture: temporal dynamics versus time-invariant contributions. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 16, p. 2169-2179, 2012.
- MOHAMED, Y. A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; SAVENIJE, H. H. G. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. **Hydrol**, v. 289, p. 145-164, 2004.
- MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 90-101, jan/fev 2011.
- MONTE-MOR, R. C. A. **Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes do semiárido mineiro. (Dissertação - Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 307. 2012.
- MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R. Variabilidade espacial da umidade do solo em uma bacia intermitente no semiárido de Minas Gerais. **In: Anais. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, nov 2013.

- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 30-37, mar 2006.
- MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R. Caracterização da Variabilidade Espacial de Parâmetros Hidráulicos em Solos Aluviais no Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 5-17, 1999.
- MONTENEGRO, S. M. G. L. et al. **Estudos hidrologicos e sedimentologicos em bacias experimentais e representativas do semiárido e cerrado**. In...: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal, RN. 2014.
- MORAN, M. S. et al. Radar Remote Sensing for Estimation of Surface Soil Moisture at the Watershed Scale. Chapter 5. Modelling and Remote Sensing in Agriculture (US and Mexico). **INIFAP Publ: Aquascalientes**, Mexico, out 2006. 91-106.
- MORGAN, K. T. et al. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 987-989, 1999.
- MOTHÉ, C. G. et al. Monitoramento, análises qualitativa e quantitativa do sistema de captação de água da chuva no CT/UFRJ. **Revista Analytica**, v. 70, Abr/Mai 2014.
- MOURA, A. E. S. S. et al. Avaliação da precipitação interna em diferentes períodos na bacia do Rio Tapacurá. In: **Anais - XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió, nov 2011.
- MOURA, A. R. C. **Estimativa da Evapotranspiração de Referência em bacia experimental da região Nordeste. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil)**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 115. 2009.
- MZUKU, M. et al. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 69, p. 1572–1579, 2005.
- NEVES, B. V. B.; VERSSIANI, B. R.; RODRIGUES, P. C. H. Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e a evapotranspiração. **RBRH**, v. 12, n. 4, p. 87-102, 2007.
- NEVES, B. V. B.; VERSSIANI, B. R.; RODRIGUES, P. C. H. Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e a evapotranspiração. **RBRH**, v. 12, n. 4, p. 87-102, 2007.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. **Comp. Electr. Agr.**, v. 31, p. 213-237, 2001.
- PAIVA, J. B. D.; CHAUDHRY, F. H.; REIS, L. F. R. **Monitoramento de bacias hidrológicas e processamento de dados**. São Carlos: RiMa, 2004.
- PANDEY, V.; PANDEY, P. K. Spatial and Temporal Variability of Soil Moisture. **International Journal of Geosciences**, v. 1, p. 87-98, 2010.
- PENNA, D. et al. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. **Journal of Hydrology**, v. 364, n. 3-4, p. 311-327, 2009.

- PEREIRA, S. et al. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 306–314, 2006.
- PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Science Journal**, v. 33, n. 4, p. 379-400, 1988.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. **Gestão de bacias hidrográficas**. 63. ed. São Paulo: Estud. av, v. 22, 2008.
- PRIMO, J. T. A. et al. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 1, p. 020-029, jan/fev 2015.
- QIU, Y. et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. **Journal of Arid Environments**, v. 49, p. 723–750, 2001.
- RAMANATHAN, V. et al. Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. **Science**, New York, v. 294, n. 2119, 2001.
- ROBINSON, D. A. et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, p. 358–389, 2008.
- ROCHA, G. A. et al. **Caderno de educação: recursos hídricos**. São Paulo: SMA / CEA, 2011.
- ROSENBAUM, U. et al. Field observations of soil moisture variability across scales. **Water Resources Research**, v. 48, n. 10, out 2012.
- RUHOFF, A. L.; PEREIRA, R. S. Gerenciamento de recursos hídricos com a simulação de cenários preservacionistas em sub-bacias hidrográficas. **In: Anais XI SBSR**, Belo Horizonte, 05-10 abril 2003. 1447-1449.
- SAHOO, A. K. et al. Reconciling the global terrestrial water budget using satellite remote sensing. **Rem Sens Envir**, v. 115, p. 1850-1865, 2011.
- SALGUEIRO, J. H. P. B. **Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil)**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 122. 2005.
- SANTOS, F. M. S. et al. Comparação entre modelos digitais de terreno gerados para estudos hidrológicos na bacia hidrográfica do Riacho Jatobá, Pesqueira, Pernambuco. **In: Anais - III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**, Aracaju, Outubro 2006.
- SANTOS, T. E. M. et al. Índice de erosividade (EI30) das chuvas para a Bacia Experimental do Jatobá, no Semi-árido pernambucano. **In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Gravatá, 2006.
- SANTOS, T. E. M. et al. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura de solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 1-15, 2008.

- SEN, Z. Wadi Hydrology. CRC Press. **Taylor & Francis Group**, 2008.
- SENTEK. **Calibration of Sentek Pty Ltd soil moisture sensors**. Stepney: Sentek Pty Ltd. [S.l.]. 2001.
- SHIKLOMANOV, I. A. **World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century**. Paris: UNESCO, 1988. 37 p.
- SHING, L. R. et al. **Aplicação de métodos geoestatísticos na determinação da variabilidade espacial do teor de argila**. In: VI Congresso Brasileiro de Soja. Cuiabá: [s.n.]. 2012.
- SILVA, C. R. et al. Calibração da sonda de capacitância Diviner 2000 em um Argissolo. **In: XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, João Pessoa, ago 2006.
- SILVA, C. R. et al. Calibration of a capacitance probe in a paleudult. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 636-640, nov/dez 2007.
- SILVA, R. C. et al. Calibration of a capacitance probe in a paleudult. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 636-640, nov/dez 2007.
- SILVA JUNIOR, V. P. **Investigação do escoamento superficial e produção de sedimentos em bacia representativa do semiárido. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola)**. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 95. 2010.
- SILVA JUNIOR, V. P. **Avaliação da estabilidade temporal da umidade do solo em uma bacia experimental no semiárido pernambucano e aplicações termográficas para determinação da umidade. (Tese - Doutorado em Engenharia Agrícola)**. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 2015.
- SILVA JUNIOR, V. P. et al. Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1073-1081, out 2011.
- SILVA, B. M. et al. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 277-286, fev 2012.
- SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 27-36, Nov 2012.
- SILVA, R. M. **Análise da perda de solos na bacia do Rio Tapacurá mediante previsão climática e modelos de erosão. (Tese - Doutorado em Engenharia Civil)**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 133. 2010.
- SILVA, R. M. et al. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 22, n. 2, p. 357-372, ago 2010.
- SILVA, T. F. P. et al. Avaliação da precipitação e umidade do solo na bacia do Ipanema, no semiárido de Pernambuco. **In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, Nov 2013.

- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. **In: TUCCI, C.E.M. (Org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação**, São Paulo. EDUSP, 2001. 35-51.
- SOUZA, E. B.; ALVES, J. M. B.; NOBRE, P. Anomalias de precipitação nos setores norte e leste do nordeste brasileiro em associação aos eventos do padrão de dipolo observados na bacia do atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 2, p. 45-55, 1998.
- SOUZA, E. R. et al. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 29, p. 26-32, 2011.
- SOUZA, E. R. et al. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 29, p. 26-32, 2011.
- SOUZA, J. L. L. et al. Avaliação de métodos de interpolação aplicados à espacialização das chuvas no território identidade Portal do Sertão / Bahia. **In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, arb/mai 2011. 4295.
- SUGIMOTO, L. **Pesquisa revela benefícios de cobertura vegetal para plantio**. Jornal da Unicamp. Campinas. 2008.
- TAVARES, U. E. et al. Variabilidade espacial da resistência à penetração e da umidade do solo em Neossolo Flúvico. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 3, n. 2, p. 79-89, 2014.
- TEEGAVARAPU, R. S. V. **Floods in a Changing Climate: Extreme Precipitation**. [S.l.]: International Hydrology Series - Cambridge, 2012.
- TELES SANTOS, M. S. et al. Altimetria GNSS de precisão aplicada ao monitoramento da dinâmica sedimentar costeira de curta duração em escala regional. **Bol. Ciênc. Geod**, v. 19, n. 4, p. 624-638, out/dez 2013.
- THOMPSON, S. K. **Sampling**. Wiley-Interscience Publication. New York, p. 343. 1992.
- TOPP, G. C.; FERRÉ, P. A. The soil solution phase. **In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. Methods of soil analysis**, Wisconsin, Soil Science Society of America, 2002. 417-1071.
- TRENBERTH, K. E.; ASRAR, G. R. **Challenges and Opportunities in Water Cycle**. National Center for Atmospheric Research. Geneva, Switzerland. 2012.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, v. 4, 1997.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 2009.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Developing Spatially Interpolated Surfaces and Estimating Uncertainty**. [S.l.]: Research Triangle Park, 2004.
- VACHAUD, G. et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, p. 822-827, 1985.

VALENTE, F. M. R. T. **Intercepção da precipitação em povoamentos florestais esparsos. Modelação do processo e características aerodinâmicas dos cobertos molhados. (Tese - Doutorado em Engenharia Florestal).** Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 172. 1999.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos Ciência do Solo.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em Estudo de Variabilidade Espacial do Solo. In: **NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. & SCHAEFER, C. E. G. R., eds. Tópicos em Ciências do Solo. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo,** Viçosa, 2000. 1-54.

VINUKOLLU, R. K. et al. Multi-model, multi-sensor estimates of global evapotranspiration: climatology, uncertainties and trends. **Hydrol Process**, v. 25, p. 3993–4010, 2011.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: _____ In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics.** New York: Academic, 1980. Cap. 2, p. 319-344.

WILLIAMS, C. J.; MCNAMARA, J. P.; CHANDLER, D. G. Controls on the temporal and spatial variability of soil moisture in a mountainous landscape: the signature of snow and complex terrain. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 1325–1336, 2009.

YAO, X. et al. Comparison of Four Spatial Interpolation Methods for Estimating Soil Moisture in a Complex Terrain Catchment. **Plos One**, v. 8, n. 1, jan 2013.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. **Common, In Soil Science, Plant Anal**, 1988. 1467-1476.

ZANETTE, S. V. et al. Análise fisiográfica da bacia do Rio Tapacurá-PE. **Revista Geografia**, Recife, v. 24, n. 2, mai/ago 2007.

- CAPÍTULO II -

RESUMO

ARAÚJO, D. C. S. **Variabilidade espacial da umidade e propriedades físicas e químicas do solo em uma bacia experimental do semiárido Pernambucano.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.

O conhecimento da dinâmica espacial da umidade do solo em uma bacia hidrográfica é essencial para auxiliar o manejo agrícola e promover a utilização desse recurso de forma adequada, especialmente em regiões semiáridas, caracterizadas pela irregularidade nas precipitações. Entender a dinâmica da água e sua relação com atributos de solo e cobertura vegetal podem auxiliar técnicas de gestão mais eficientes. Nesse sentido, a geoestatística entra como uma técnica promissora e que ultimamente vem sendo bastante utilizada em estudos dessa natureza. O objetivo desse trabalho foi avaliar os padrões espaciais de variação da umidade e atributos físicos e químicos de solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano, localizada no município de Pesqueira, com amostragens nas profundidades de 0,0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m, em 32 pontos. A umidade, monitorada por quatro meses e na estação seca, decresceu ao longo do tempo e apresentou valores mais elevados em locais com presença de solo de textura argilosa, bem como cobertura vegetal do tipo caatinga arbóreo-arbustiva aberta, sendo registrados maiores conteúdos de água na porção montante da bacia. Para os atributos textura do solo, carbono orgânico (CO), matéria orgânica (MO) e densidade do solo, na camada de 0,1 m – 0,2 m, foi detectado grau de dependência espacial de médio a forte, variando de 0,03% a 49,98%. A densidade na camada de 0,0 – 0,1 m, assim como a condutividade elétrica, nas duas camadas, apresentou efeito pepita puro (total ausência de dependência espacial).

Palavras-chave: interpolação, geoestatística, caatinga, bacia experimental.

- CHAPTER II -

ABSTRACT

ARAÚJO, D. C. S. **Spatial variability of moisture and physico-chemical properties of the soil in an experimental basin in the semiarid of Pernambuco State, Brazil.** 2016. Thesis (Master's degree in Agricultural Engineer) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Knowledge of the spatial dynamics of soil moisture in a watershed is essential to assist the agricultural management and promote the use of this resource appropriately, particularly in semi-arid regions, characterized by irregularity in rainfall. Understand the dynamics of water and their relationship with soil attributes and vegetation cover, may help more efficient management techniques. In this sense, geostatistics comes as a technique that is efficient and that lately being widely used in such studies. The objective of this study was to evaluate the spatial patterns of variation of moisture and physico-chemical attributes of soil in an experimental basin of Pernambuco, semiarid region, in the municipality of Pesqueira, with sampling depths from 0.0 - 0.1 m and 0.1 - 0.2 m, at 32 monitoring points. Soil moisture, monitored for four months and in the dry season, decreased over time and showed higher values in locations with presence of clay soil and vegetation of the natural caatinga type sparse, being recorded higher water content in the portion amount of the basin. For the attributes of soil texture, organic carbon (OC), organic matter (OM) and bulk density in the layer of 0.1 m - 0.2 m, was detected spatial dependence of medium to strong, ranging from 0.03% to 49.98%. The density in the layer of 0.0 - 0.1 m, as the electrical conductivity, in two layers, showed pure nugget effect (no spatial dependence).

Key-words: interpolation, geostatistics, caatinga, experimental basin.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, de modo geral, há grande carência de dados hidrológicos para pequenas bacias hidrográficas. Isso ocorre porque a medição de variáveis hidroclimatológicas em todas as bacias do país é economicamente difícil e fisicamente impraticável (MONTE-MOR e PALMIER, 2013). Devido ao fato de a Caatinga ser um bioma representativo e exclusivamente brasileiro, é necessário compreender os fenômenos hidrológicos que ocorrem nas bacias que abastecem a população dessa região, visto que essa prática facilita a previsão de cenários e serve de subsídio para a modelagem hidrológica (PILGRIM et al., 1988; PANDEY e PANDEY, 2010).

A água no solo exerce uma importante função na regulação do ciclo hidrológico. A sua distribuição é o principal objeto de estudo em investigações do balanço hídrico em diferentes camadas de solo (PENNA et al., 2009; SOUZA et al., 2011; ADUBUWAILI et al., 2013; HEGEDUS et al., 2015). No entanto, um dos grandes desafios desse tipo de trabalho é estimar o conteúdo de água no campo, em larga escala, dada a sua significativa variação no espaço-tempo (COSTA et al., 2013), que pode sofrer influência direta das características dos solos (CAJAZEIRA e ASSIS JUNIOR, 2011).

A umidade do solo é afetada e controlada por vários fatores, como a precipitação, topografia, radiação solar, textura e uso do solo. A sua distribuição espacial é complexa e os fatores que regulam os seus padrões de variação são controversos, principalmente porque é difícil compreender até que ponto, espacialmente, esses fatores podem interferir na sua dinâmica (FENG et al., 2013). Nesse sentido, Robinson et al. (2008) reforçam que a topografia e a posição do declive têm influência dominante nos períodos úmidos, enquanto os demais aspectos são mais importantes nos períodos secos, dada a característica da água de escoar para faixas menos elevadas do terreno durante o período chuvoso.

Souza et al. (2011), avaliando os padrões de variação da umidade do solo em uma bacia hidrográfica, no estado de Pernambuco, identificaram a sensível variação dessa propriedade em função do tipo de solo, topografia e cobertura vegetal, detectando que

variações espaciais são mais significativas do que as temporais, que mostram-se mais estáveis. Da mesma forma, Ávila et al. (2010), estudando a dinâmica da água em uma bacia, no estado de Minas Gerais, notaram que a umidade responde de formas diferentes, de acordo com o tipo de cobertura e propriedades físicas do solo, o que causa sensível variação em seus padrões espaciais e afeta, por consequência, o seu comportamento temporal.

Assim como é afetada por propriedades físico-hidráulicas do solo, a umidade também pode exercer influência sobre os padrões espaciais de variação de algumas propriedades químicas, como o carbono orgânico, matéria orgânica e condutividade elétrica (CE). Braida et al. (2010), em estudo realizado em um Nitossolo, identificaram que o teor de carbono orgânico tende a aumentar com o incremento da umidade. Em se tratando da correlação entre umidade do solo e CE, Molin e Rabello (2011), constataram que, conforme aumenta-se o conteúdo de água no solo, crescem os valores de CE, indicando a influência do primeiro fator sobre o segundo. Essa influência é tanto maior quanto mais elevada for a concentração de sais na água.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi investigar os padrões de variação espaciais da umidade e de propriedades físicas e químicas do solo em uma bacia experimental, na região do semiárido do Estado de Pernambuco, utilizando dados de umidade obtidos por gravimetria e com a sonda capacitiva Diviner 2000[®], nas profundidades de 0,0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m, por um período de quatro meses, durante período com escassez de chuvas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da bacia hidrográfica do Riacho Jatobá

O estudo foi desenvolvido na Bacia Experimental do Riacho Jatobá, localizada no município de Pesqueira – PE, região Agreste do semiárido Pernambucano, situada entre as coordenadas 8° 34' 17" e 8° 18' 11" de Latitude Sul e 37° 1' 35" e 36° 47' 20" de Longitude Oeste (Figura 2). A microbacia está inserida na Bacia Representativa do Riacho Mimoso, pertencente ao Rio Ipanema, e possui uma área de drenagem de 12,44 km² e perímetro de 16 km, o que resulta em um coeficiente de compacidade de 1,27. O rio que percorre a bacia possui extensão de 6,5 km.

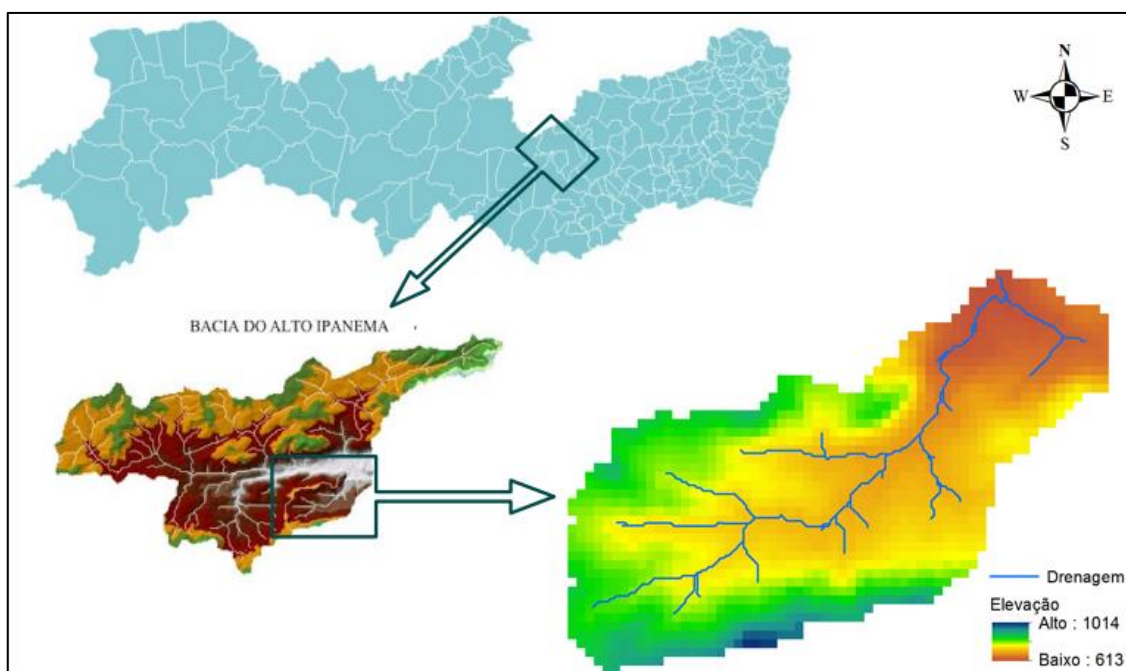


Figura 2. Localização da Bacia Experimental do Riacho Jatobá, no município de Pesqueira-PE.

A precipitação anual média da bacia é de 607 mm, com temperatura média de 23 °C e evapotranspiração potencial anual de aproximadamente 2000 mm (SANTOS et al., 2008), com estação chuvosa concentrada entre os meses de março a agosto e estiagem entre os meses de setembro e fevereiro. A vegetação predominante é do tipo caatinga hiperxerófila, com a presença de cactáceas e bromeliáceas. As principais classes de solo predominantes na bacia são: Argissolo Amarelo, com presença de impedimento rochoso; Neossolo Litólico e Neossolo Regolítico (CORRÊA e RIBEIRO, 2001). A distribuição de cada unidade pedológica ao longo da bacia pode ser visualizada na Figura 3, assim como os pontos de monitoramento de umidade e amostragem de solo.

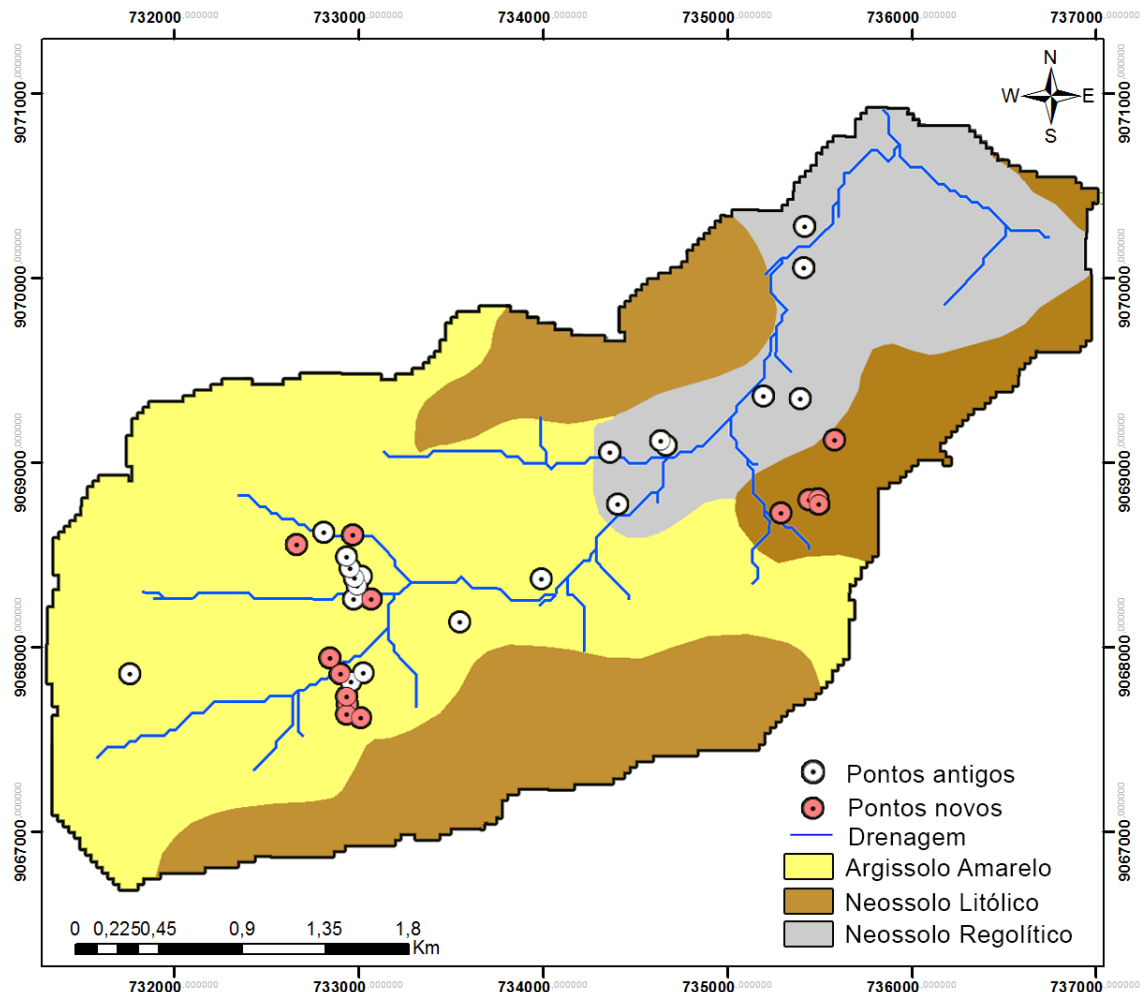


Figura 3. Distribuição das unidades de solo e pontos de monitoramento e amostragem ao longo da bacia do Riacho Jatobá. Fonte: Melo et al. (2013).

De acordo com levantamento feito por Melo (2013), a ocupação da bacia apresenta distribuição bem especializada e com poucos aglomerados habitacionais, sendo considerada tipicamente rural. A vegetação natural, no entanto, vem cedendo lugar a diferentes tipos de uso do solo, o que causa sensível alteração na paisagem ao longo do tempo. Além da extração de madeira, o uso da bacia também inclui a presença de pastagem nas regiões com menor predominância de vegetação natural composta por caatinga, assim como da agricultura de subsistência, com feijão e milho no regime de sequeiro, que estão dispostos em fragmentos desmatados ao longo de toda a bacia, sem considerar limitações de relevo. Há, ainda, áreas com o cultivo de palma, utilizada como suplemento na alimentação animal, principalmente nas épocas de estiagem. As atividades agropecuárias limitam-se à criação de bovinos e caprinos em sistema extensivo e a bovinocultura de leite em sistema consorciado. O mapa de uso e ocupação do solo quanto

à vegetação natural predominante (Caatinga) e pastagem, destinada à alimentação animal, está representado na Figura 4.

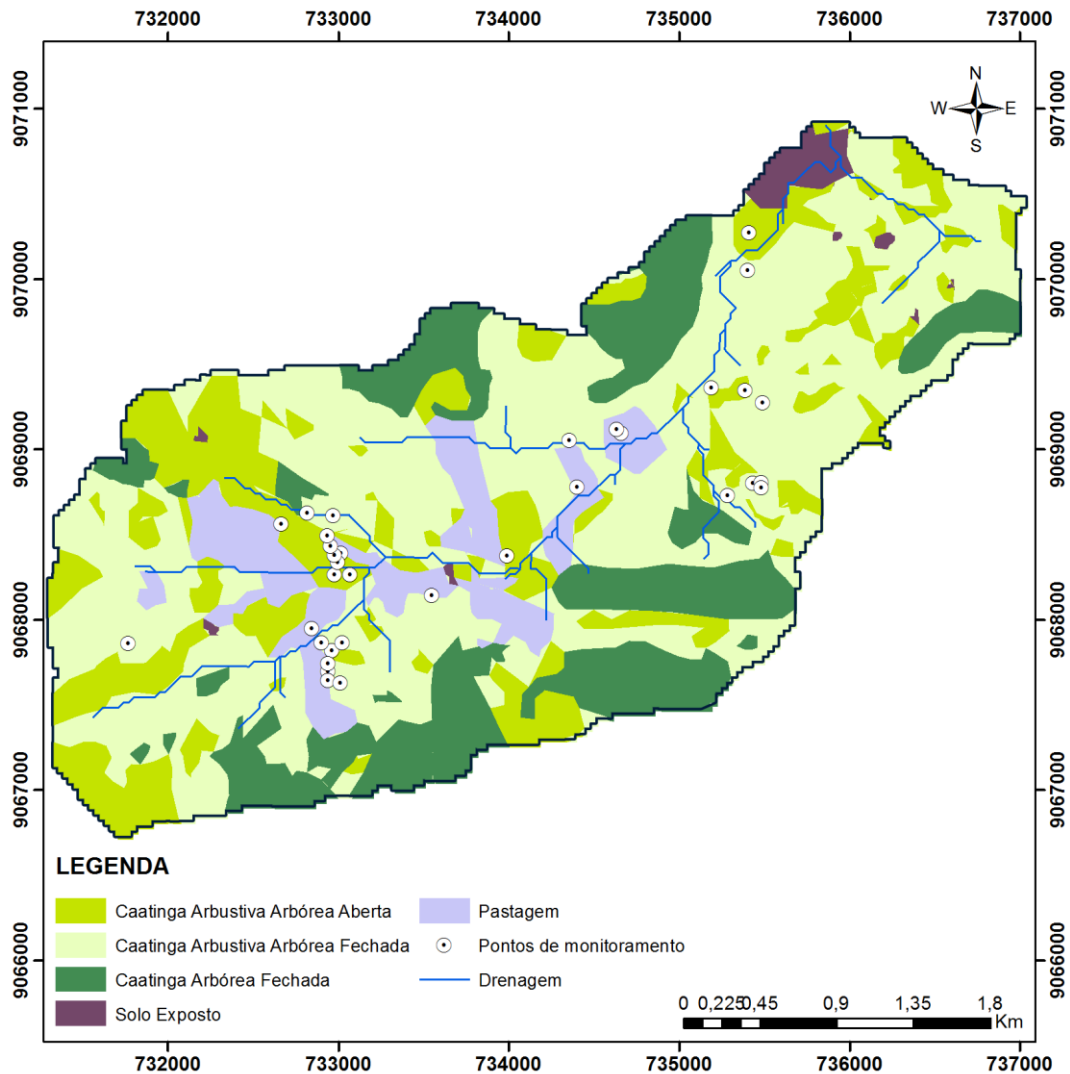


Figura 4. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Experimental do Riacho Jatobá.

Desde 2010, monitoramentos mensais da umidade do solo vêm sendo realizados na bacia, a partir financiamento conseguido pelo projeto “Bacias Experimentais e Representativas – BEER”. O objetivo é obter séries de dados que permitam estudar os padrões de variação da umidade, principalmente em escala temporal. De modo que fosse possível aprofundar o conhecimento da dinâmica da umidade em escala espacial, foram implementados, durante o período de abril a agosto de 2015, mais 14 pontos de monitoramento, em diferentes pontos da bacia, totalizando 32 locais de coleta de dados de umidade do solo. Limitações pedológicas, com a presença de impedimento rochoso raso, não permitem uma padronização na profundidade de instalação dos tubos de acesso ou maior aprofundamento, em locais específicos. Assim, as profundidades de instalação

variam de 0,2 m a 0,6 m. Como a profundidade de 0,2 m é comum a todos os 32 tubos, optou-se por trabalhar nessa faixa, visando englobar condições distintas de solo e vegetação na bacia.

2.2. Monitoramento da umidade do solo

A umidade foi determinada por gravimetria, através de coleta de solo, e com a sonda de capacitância Diviner 2000[®] - Sentek (Figura 5), em 32 pontos ao longo da bacia.

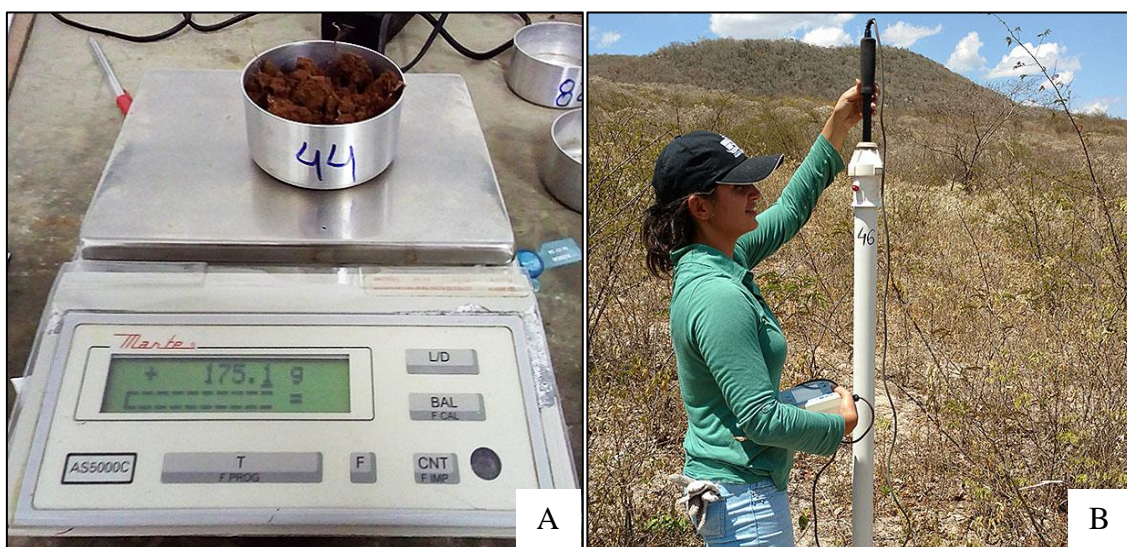


Figura 5. Monitoramento de umidade do solo. (A) amostra sendo pesada para determinação de umidade por gravimetria; (B) leitura em campo com a utilização da sonda de capacitância Diviner 2000[®].

Para os 14 tubos recém instalados, a umidade foi determinada por gravimetria, com amostras sendo coletadas durante os quatro monitoramentos, a cada 0,1 m de profundidade. O procedimento foi necessário para realizar a calibração da sonda. A cada coleta, leituras eram realizadas para posterior correlação. Nos tubos já instalados, com equação de calibração conhecida, o monitoramento foi realizado apenas com a leitura, sem necessidade de coleta de solo.

Os monitoramentos foram mensais (n=4), durante o período de 17 de setembro a 15 de dezembro de 2015, totalizando quatro meses. Monitoramentos anteriores a setembro foram realizados nos pontos já existentes, mas os dados não foram considerados nas análises, visto que a instalação dos novos tubos de acesso visando a ampliação da rede ainda estava em andamento e, conseqüentemente, alguns pontos de interesse para estudo da variabilidade espacial não estavam tendo dados coletados.

Com o intuito de avaliar os padrões espaciais de variação da umidade por tipo de solo e cobertura, o monitoramento foi realizado nas três diferentes classes de solos predominantes na bacia, bem como nos tipos de cobertura vegetal mais comuns e de fácil acesso para os monitoramentos. Foram eles: Pastagem (P), Caatinga Arbóreo-arbustiva Fechada (CAF) e Caatinga Arbóreo-arbustiva Aberta (CAA), conforme classificação de George Eiten (1983), sendo a CAF caracterizada pela presença de caatinga natural, formada por espécies vegetais de porte médio a alto, distribuídas de forma mais adensada. No caso da CAA, a vegetação era mais espaçada, permitindo fácil acesso aos pontos e caracterizada pela presença, em sua maior parte, de espécies vegetais de porte médio e rasteiro.

Nos pontos antigos, a calibração da sonda foi pontual, por cada locação de monitoramento e a cada profundidade. O mesmo procedimento foi adotado nos novos pontos, dada a heterogeneidade de solos e topografia da bacia. Para obtenção da umidade gravimétrica, foi seguida metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). Como a densidade do solo, por cada ponto e camada, era previamente conhecida, a umidade volumétrica foi obtida multiplicando-se a umidade gravimétrica (à base de massa) pela densidade.

Devido a limitações no número de pontos e à alta variabilidade espacial da umidade do solo, esse atributo não foi mapeado por nenhum método de interpolação, visto que nenhum deles permitiu representar de forma significativa o conteúdo de água em toda a bacia. Assim, a umidade foi avaliada apenas do ponto de vista de sua variação espacial por locação, considerando os tipos de solo e vegetação predominantes.

2.3. Calibração da sonda de capacitância Diviner 2000®

A calibração da sonda nos novos pontos foi realizada para dois tipos de solo (Argissolo Amarelo e Neossolo Litólico) onde houve instalação de tubos de acesso, com profundidades de coleta variaram de 0,2 m a 0,5 m e a intervalos de 0,1 m, a depender da resistência do solo à coleta manual, considerando que o trabalho foi executado durante período seco, sem precipitação significativa, o que representa limitação para a coleta de solo na bacia, que possui impedimento rochoso raso em muitos pontos.

Por recomendação do fabricante (Sentek), as leituras feitas pela sonda foram normalizadas, uma vez que cada equipamento pode responder de forma diferente ao ar e

à água. Para isso, as leituras feitas no solo (FS) passaram a ser designadas frequências relativas (FR), a partir da aplicação na equação abaixo:

$$FR = (Fa - Fs)/(Fa - Fw)^{-1} \quad (2)$$

onde FR é a frequência relativa (variando de 0 a 1, aumentando com a umidade do solo); Fa é a leitura feita em tubo suspenso no ar; Fs é a leitura no tubo instalado no solo e Fw é a leitura feita em tudo imerso em água.

Os valores de FR obtidos e os seus correspondentes de umidade volumétrica (θ_v) foram ajustados a um modelo de regressão do tipo potencial crescente ($\theta_v = aFR^b$), sendo a e b os coeficientes estimados. A acurácia do ajuste foi avaliada por meio da significância dos coeficientes, adotando-se como critério o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa do ajuste, em que os valores ideais são aqueles mais próximos de 1 e 0, respectivamente. As equações obtidas foram, ainda, comparadas com outras disponíveis na literatura através de trabalhos prévios executados com a sonda.

2.4. Amostragem e análises físicas e químicas de solo

Para a determinação da densidade e frações granulométricas do solo, 35 pontos foram utilizados, três a mais do que os requeridos para monitoramento de umidade na bacia. A coleta foi realizada na mesma profundidade de instalação dos tubos, a cada 0,1 m (Figura 6). Para evitar perturbações que pudessem alterar a estrutura do solo nas proximidades do tubo de acesso, foi padronizada uma distância de 30 cm, ao redor do tubo, para coleta de solo, considerando que aquela área é representativa para os dados de umidade obtidos.



Figura 6. Etapas de amostragem de solo na bacia do Jatobá. (A) coleta de amostra indeformada; (B) cilindro no amostrador após a coleta; (C) amostra indeformada pronta para ser embalada; (D) amostras indeformadas e deformadas, devidamente protegidas.

As análises físicas (densidade do solo e textura) e a condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado foram realizadas conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). O carbono orgânico total do solo foi determinado pelo método adaptado por Yeomans e Bremner (1988), utilizando o dicromato em meio ácido como agente oxidante. Visando maximizar a oxidação do carbono pelo dicromato, foi utilizada uma fonte externa de calor. Posteriormente, foi executada a titulação do dicromato através de uma solução indicadora de ferroin. A matéria orgânica foi calculada de forma indireta, através da multiplicação do carbono orgânico obtido por um fator de ajuste, conhecido como fator de “Van Bemmelen”. Considerando-se que, em média, a matéria orgânica do

solo apresenta 58% de carbono, estima-se que o teor de matéria orgânica seja o resultado da multiplicação do teor de carbono por 1,72, que corresponde a 100 dividido por 58.

2.5. Estatística descritiva e análise exploratória de dados

Essa análise tem como objetivo verificar o comportamento dos dados e identificar possíveis valores discrepantes, sem considerar a posição espacial dos dados observados. É uma etapa fundamental para confirmar a consistência das informações e, a partir daí, iniciar a tomada de decisões e prosseguir com as demais etapas estatísticas.

As análises estatísticas descritivas empregadas foram as de medidas de tendência ou posição central (média, mediana, moda) e as medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) e de distribuição dos dados. As medidas de tendência central permitem a verificação do ajuste dos dados a uma possível distribuição normal e as de dispersão dão uma ideia da magnitude da variabilidade dos mesmos.

Para caracterização do grau de variabilidade, os coeficientes de variação (CV) foram analisados conforme sugerido por Warrick & Nielsen (1980), que consideram baixa variabilidade quando $CV < 12\%$, média variabilidade para o intervalo de 12 a 60% e alta para $CV > 60\%$.

Os dados foram, ainda, submetidos à análise de tendência por meio da plotagem de gráficos direcionais com as coordenadas de latitude e longitude, bem com o atributo Z em estudo. Constatada a tendência de primeira ou segunda ordem, a mesma foi removida e, utilizando a validação cruzada do *ArcGis 10.3.1*, gerada com os dados originais e aqueles utilizados após a remoção da tendência, foi escolhido o modelo que melhor representou os dados, de acordo com a estatística da validação, levando em conta os erros de predição associados à interpolação, conforme recomendação de Jacob e Young (2006).

2.6. Estudo variográfico e krigagem

O ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental é uma das etapas mais importantes em estudos geoestatísticos, pois permite realizar inferências e possibilita a interpretação de fenômenos com continuidade espacial e temporal. Essa etapa deve ser executada com muito rigor, devido ao fato de a sensibilidade e experiência do operador influenciarem diretamente na precisão e ajuste dos dados, de forma que o modelo escolhido se aproxime ao máximo do fenômeno real. Essa operação é realizada

por métodos matemáticos, estimando-se parâmetros que estruturam os modelos de semivariograma (efeito pepita, patamar e alcance).

Após a obtenção dos semivariogramas experimentais, foram testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial, que são os principais utilizados na modelagem de atributos de solo e que satisfazem a maioria das situações encontradas, com boa eficiência para o estudo da continuidade espacial (CARVALHO e VIEIRA, 2004).

Esses modelos são representados pelas seguintes expressões matemáticas:

- Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad h \geq 0 \quad (3)$$

- Modelo exponencial (de Formery):

$$\gamma(h) = \left[1 - \exp \left(- \frac{h}{a} \right) \right] \quad h \geq 0 \quad (4)$$

- Modelo esférico (de Matheron):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \times \left[\frac{3h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C_1 & h \geq a \end{cases} \quad (5)$$

onde:

$C_0 + C_1$ é o patamar ou contribuição; a é o alcance e h é a distância euclidiana.

A escolha do melhor modelo de semivariograma foi baseado em alguns critérios, como o grau de dependência espacial (GDE) e a validação cruzada (MELLO et al., 2005). De acordo com Cambardella et al. (1994), o GDE possui a seguinte classificação: (a) dependência espacial forte quando for < 25%; (b) dependência espacial moderada, entre 25% e 75% e (c) dependência fraca quando > 75%. O GDE expressa a proporção, em porcentagem, do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar ($C_0 + C_1$) e pode ser encontrado pela equação abaixo:

$$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (6)$$

A partir da validação cruzada, foram considerados, na escolha do melhor modelo, os erros gerados pelo *ArcGis 10.3.1* a partir da execução do método, de acordo com recomendação de Jacob e Young (2006), sendo eles: o *Erro Médio Padronizado* (EMP) - quanto mais próximo de 0 (zero), melhor; e o *Erro Quadrático Médio Padronizado* (EQMP) - quanto mais próximo de 1 (um), melhor.

O mapeamento foi feito por meio da krigagem ordinária (interpolador geoestatístico). O estimador da krigagem é do tipo BLUE (*best linear unbiased estimator*), que é considerado *linear* por ser formado por uma combinação linear de dados. A técnica leva em consideração o número de amostras utilizadas, as posições das amostras na área a ser avaliada, as distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada, bem como a continuidade espacial da variável em estudo (ANDRIOTTI, 2013).

Segundo Thompson (1992), apesar de o operador pouco inferir no processo de interpolação, a krigagem possui uma sequência de cálculos, como mostrado abaixo:

$$[A]^{-1} \cdot [b] = [\lambda] \quad (7)$$

sendo:

$[A]^{-1}$: matriz inversa da semivariância entre as localidades da vizinhança de um ponto, determinada pelo modelo de semivariograma, com base nas distâncias entre os pontos; $[b]$: matriz da semivariância entre as localidades vizinhas (com a variável estimada) e o ponto para o qual a variável em questão será interpolada, que também é determinado pelo modelo de semivariograma escolhido, com base nas distâncias entre as localidades e o ponto a ser predito; $[\lambda]$ é a matriz de pesos de krigagem.

$$X_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot X_i \quad (8)$$

onde X_p é a variável a ser interpolada; λ_i é o peso da i -ésima localidade vizinha; X_i é o valor da variável para a i -ésima localidade e n é o número de pontos utilizados na interpolação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração da sonda capacitiva Diviner 2000®

Os ajustes obtidos entre os valores de umidade volumétrica do solo (θ_v) e as leituras de frequência relativa realizadas pela sonda (FR) foram significativos nos dois tipos de solo e profundidades amostradas para a situação avaliada, considerando que o estudo foi efetuado na estação seca. Por se tratar de uma bacia hidrográfica, torna-se inviável instalar tubos adicionais para aumentar a precisão da calibração com diferentes condições de umidade. Assim, é necessário aguardar a chegada da estação chuvosa para aumentar a precisão das leituras em uma faixa mais ampla de água no solo. Ainda assim, as calibrações obtidas permitem o uso das equações durante época de escassez de chuvas.

Na Tabela 1 estão os coeficientes obtidos para os pontos localizados no Argissolo Amarelo, nas diferentes profundidades utilizadas para calibração, bem como as faixas de umidade mínima e máxima ao longo dos quatro meses, para cada caso.

Tabela 1. Equações obtidas para calibração da sonda Diviner 2000® na estação seca, para as diferentes profundidades estudadas, em Argissolo Amarelo.

Pont	Prof. (m)	Class. Textural	a	b	R ²	Erro Padrão	Umidade (cm ³ cm ⁻³)	
							Mínimo	Máximo
1	0,0 - 0,1	Franco argilo arenoso	0,281	1,538	0,77	0,0047	0,01555	0,03801
	0,1 - 0,2	Franco argilo arenoso	0,388	2,222	0,98	0,0024	0,03034	0,04124
	0,2 - 0,3	--	0,229	1,308	0,98	0,0015	0,07246	0,07882
2	0,0 - 0,1	Franco argilo arenoso	0,553	2,191	0,97	0,0048	0,03275	0,05326
	0,1 - 0,2	Franco argilo arenoso	0,480	1,824	0,77	0,0031	0,04377	0,05652
3	0,0 - 0,1	Franco argilo arenoso	0,552	2,845	0,94	0,0025	0,02798	0,03885
	0,1 - 0,2	Franco argilo arenoso	0,235	1,656	0,76	0,0019	0,04090	0,05008
4	0,0 - 0,1	Franco arenoso	0,198	1,573	0,86	0,0053	0,01500	0,03851
	0,1 - 0,2	Franco argilo arenoso	0,235	1,849	0,95	0,0071	0,03681	0,06678
5	0,0 - 0,1	Franco argilo arenoso	0,212	1,478	0,76	0,0048	0,03692	0,05863
	0,1 - 0,2	Franco arenoso	0,848	2,312	0,81	0,0009	0,02828	0,03207
6	0,0 - 0,1	Argilo arenoso	0,335	2,207	0,99	0,0098	0,05379	0,09528
	0,1 - 0,2	Franco argilo arenoso	0,502	2,756	0,93	0,0028	0,03731	0,04881
	0,2 - 0,3	Argilo arenoso	0,259	2,051	0,73	0,0011	0,03658	0,04204
	0,3 - 0,4	Argilo arenoso	0,335	2,365	0,73	0,0015	0,03719	0,04447
	0,4 - 0,5	Argilo arenoso	0,277	1,975	0,94	0,0013	0,03486	0,04046
7	0,0 - 0,1	Franco argilo arenoso	0,448	2,785	0,94	0,0028	0,04083	0,05252
	0,1 - 0,2	Franco argilo arenoso	0,500	2,385	0,95	0,0015	0,04291	0,05012
	0,2 - 0,3	Franco argilo arenoso	0,444	1,885	0,69	0,0018	0,07196	0,07994
8	0,0 - 0,1	Franco argilo arenoso	0,170	1,546	0,90	0,0053	0,04480	0,06722
	0,1 - 0,2	Franco arenoso	0,389	2,592	0,97	0,0023	0,03901	0,05001
Média			0,3748	2,064	0,87	0,0033	0,03905	0,05351

O menor valor de coeficiente de determinação (R^2) foi 0,69, com média de 0,87 em todos os pontos. A pouca variação da umidade ao longo dos quatro meses pode ter favorecido esse comportamento, visto que as leituras de FR e a umidade obtidas por gravimetria se mantiveram relativamente semelhantes ao longo do tempo, propiciando a boa correlação. Silva et al. (2006), também trabalhando com a calibração da Diviner 2000[®], encontraram resultados similares, até a profundidade de 1,0 m, com coeficientes de determinação médios de 0,93, sendo que o mínimo foi 0,56. Da mesma forma, Primo et al. (2015) conseguiram ajuste com coeficientes variando de 0,87 a 0,92. Ambos trabalharam com faixas mais amplas de umidade, favorecidas pela escala menor da área em estudo, o que não implica na calibração da sonda ponto a ponto, como no caso de uma bacia hidrográfica.

A Figura 7 evidencia a relação entre a umidade volumétrica (θ_v) e as correspondentes frequências relativas (FR) ao longo do perfil do solo para o ponto 6, que foi calibrado a maior profundidade. Vale destacar que foram obtidas equações de calibração individuais por cada profundidade de monitoramento, a intervalos de 10 cm, e em cada tubo de acesso. No entanto, visando destacar a representatividade da calibração para todas as profundidades em um mesmo ponto, foi plotado o gráfico de correlação evidenciado na Figura 7. Ainda com o objetivo de comparar a curva de calibração local da bacia do Jatobá, para o referido ponto em destaque, com as equações obtidas por outros trabalhos, as leituras de FR obtidas em campo foram inseridas nas equações encontradas por diferentes autores.

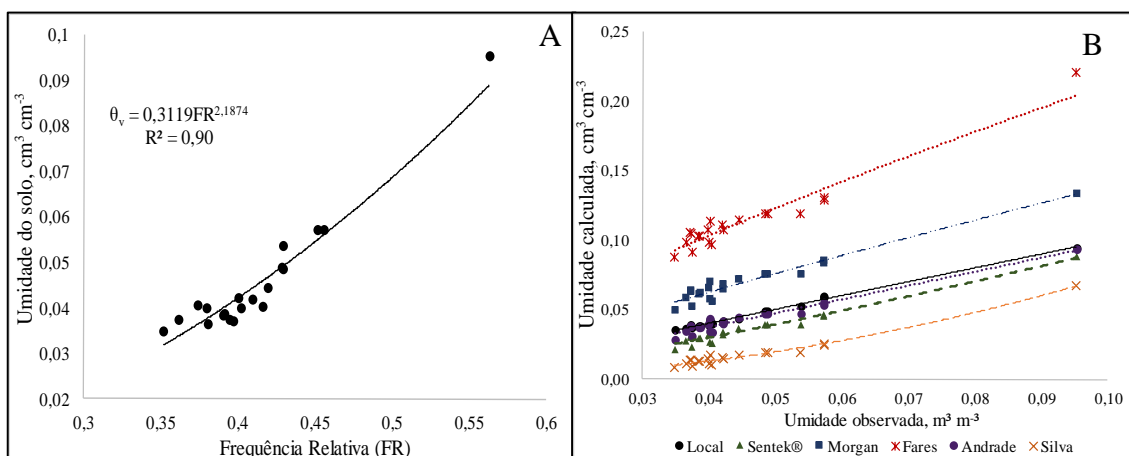


Figura 7. Correlação entre as leituras de umidade volumétrica e suas correspondentes frequências relativas (A) e comparação da curva de calibração local com a encontrada por outros autores (B).

É possível perceber que a equação do fabricante (Sentek), bem como a de Andrade et al. (2007), se aproximaram da curva local da bacia, principalmente a segunda, onde o estudo foi realizado em solos com textura que variava de média a argilosa no horizonte B. A equação de Andrade et al. (2007) subestimou os valores de umidade do solo em 6,85%, ao passo que para a do fabricante subestimou em 32,7 %.

Resultado similar foi identificado por Silva et al. (2007), também calibrando a sonda Diviner 2000® em um Argissolo. Os autores detectaram que a curva de calibração do fabricante se aproximou bastante da obtida localmente. Assim como observado na bacia do Jatobá, também foi percebida a superestimativa da umidade do solo ao utilizar as equações propostas por Morgan et al. (1999) e Fares et al. (2004).

Para o Neossolo Litólico, houve sensível variação na curva de calibração, provavelmente causada pela mudança na classificação textural do solo, que apresenta conteúdo médio de 80% de areia em todos os pontos e profundidades amostradas. A Tabela 3 contém os parâmetros das equações para os cinco pontos calibrados. O menor coeficiente de determinação obtido foi 0,50, com média de 0,85 para todos os pontos.

Tabela 2. Equações obtidas para calibração da sonda Diviner 2000® na estação seca, para as diferentes profundidades estudadas, em Neossolo Litólico.

Pont	Prof. (m)	Class. Textural	a	b	R ²	Erro Padrão	Umidade (cm ³ cm ⁻³)	
							Mínimo	Máximo
1	0,0 - 0,1	Franco arenoso	1,333	3,500	0,97	0,0060	0,01555	0,04065
	0,1 - 0,2	Franco argilo arenoso	0,516	2,183	0,95	0,0017	0,02237	0,03043
2	0,0 - 0,1	Franco arenosa	0,170	1,624	0,94	0,0030	0,01224	0,02971
	0,1 - 0,2	Franco arenosa	0,135	2,260	0,50	0,0019	0,01049	0,01980
	0,2 - 0,3	Franco arenosa	0,356	2,203	0,91	0,0012	0,01537	0,02100
3	0,0 - 0,1	Franco arenosa	0,143	1,254	0,93	0,0015	0,00952	0,01601
	0,1 - 0,2	Franco arenosa	0,111	1,745	0,86	0,0012	0,01329	0,01906
4	0,0 - 0,1	Franco arenosa	0,133	1,367	0,90	0,0039	0,01368	0,03040
	0,1 - 0,2	Franco arenosa	0,146	1,362	0,81	0,0022	0,02765	0,03808
	0,2 - 0,3	Franco arenosa	0,227	1,537	0,85	0,0014	0,01823	0,02454
	0,3 - 0,4	Franco arenosa	0,487	2,077	0,87	0,0013	0,01751	0,02354
5	0,0 - 0,1	Franco arenosa	0,206	2,668	0,79	0,0057	0,00916	0,03526
	0,1 - 0,2	Franco arenosa	0,151	2,290	0,77	0,0021	0,01217	0,02192
Média			0,316	2,005	0,85	0,0025	0,01517	0,02695

O coeficiente de determinação médio para o ponto 4, nas quatro profundidades estudadas, foi de 0,79, inferior ao encontrado no Argissolo Amarelo (Figura 8). Ainda assim, a equação pode ser usada com boa precisão para prever valores de umidade

volumétrica do solo no período de estiagem. Comparando-se a equação obtida com a de outros estudos, nota-se que, nesse caso, a curva obtida por Andrade et al. (2007) já não representa de forma tão similar o conteúdo de água no solo, como foi identificado para o Argissolo Amarelo. Há uma tendência de subestimativa, assim como na equação fornecida pelo fabricante. A curva obtida por Morgan et al. (1999) é a que mais se aproxima da obtida localmente, principalmente em condições de umidade muito baixas, havendo uma tendência à superestimativa conforme as leituras de frequência relativa (FR) vão aumentando.

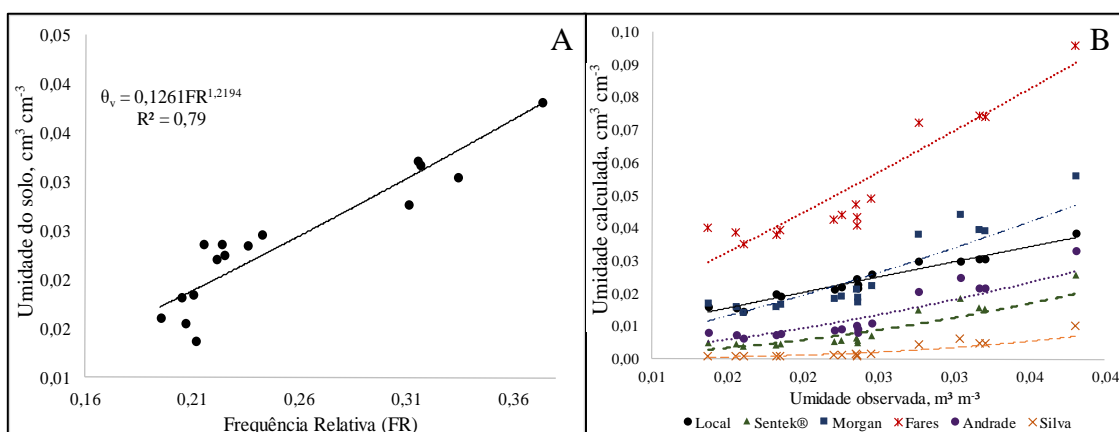


Figura 8. Correlação entre as leituras de umidade volumétrica e suas correspondentes frequências relativas (A) e comparação da curva de calibração local com a encontrada por outros autores (B).

3.2. Análise exploratória dos dados de umidade do solo

A diferença entre o valor médio e a mediana foi acentuada na maioria dos casos, assim como o coeficiente de variação, que apresenta valores elevados, sendo classificados como médio a altos, segundo Warrick e Nielsen (1980). Ademais, percebe-se forte assimetria positiva no conjunto de dados, associada a altos valores de curtose (Tabela 3). Os desvios-padrão também mostram-se relativamente altos quando comparados com as médias, o que evidencia a dispersão dos valores. No entanto, os dados apresentaram distribuição de frequência do tipo log-normal, confirmada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e, adicionalmente, de Shapiro-Wilk.

Tabela 3. Estatística descritiva dos dados de umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para os quatro meses do monitoramento na bacia do Riacho Jatobá.

Mês	Prof. (cm)	Média	Mediana	DP	Curtose	Assimetria	Mín.	Máx.	CV (%)	DF
SET	0,0 – 0,1	0,053	0,048	0,031	2,610	1,620	0,013	0,157	58,49	L
	0,1 – 0,2	0,066	0,049	0,039	0,051	1,186	0,019	0,173	59,09	L
OUT	0,0 – 0,1	0,030	0,027	0,025	10,560	0,360	0,010	0,144	83,33	L
	0,1 – 0,2	0,057	0,045	0,051	3,840	1,910	0,010	0,248	89,47	L
NOV	0,0 – 0,1	0,027	0,020	0,024	8,520	2,730	0,009	0,132	88,89	L
	0,1 – 0,2	0,047	0,033	0,038	1,400	1,420	0,007	0,165	80,85	L
DEZ	0,0 – 0,1	0,026	0,019	0,023	8,140	2,700	0,009	0,127	88,46	L
	0,1 – 0,2	0,048	0,033	0,041	1,280	1,400	0,010	0,161	85,42	L
		0,044	0,034	0,035	4,550	1,666	0,011	0,163	80,72	

DP = Desvio padrão; DF = distribuição de frequência; CV = coeficiente de variação; L = distribuição lognormal.

Como foram registradas precipitações significativas na bacia nos meses antecedentes de junho e julho, com totais de 62,4 mm e 113,5 mm, respectivamente, alguns pontos de monitoramento à montante, locados em Argissolo Amarelo, apresentaram picos de umidade que se sobressaíram em relação aos demais. Mesmo com a tendência natural do solo de perder umidade ao longo dos quatro meses seguintes, esses pontos mantiveram valores de umidade mais elevados e persistentes, o que naturalmente contribuiu com a maior dispersão dos dados.

Os pontos supracitados foram detectados como discrepantes em relação aos demais do conjunto de dados, por meio de análise em gráficos *box-plot*. No entanto, seguindo metodologia proposta por Libardi e Melo Filho (2006), os mesmos foram mantidos, visto que não apresentaram valores consideravelmente diferentes dos seus vizinhos mais próximos, uma vez que esses pontos com picos mais altos de umidade estavam próximos, o que implica que o solo, nessa zona, possivelmente possui a característica de reter maior conteúdo de água. Além disso, a umidade do solo é amplamente caracterizada pela elevada variabilidade espacial, que pode ser influenciada por fatores diversos. Famiglietti et al. (2008), Ávila et al. (2010) e Rosenbaum et al. (2012), avaliando os padrões de variação espaciais da umidade do solo em extensas áreas, também identificaram a presença de valores discrepantes, evidenciando a tendência desse atributo de possuir elevada variação espacial.

Melo e Montenegro (2015), estudando a umidade do solo na mesma bacia, também encontraram coeficientes de variação que se enquadraram na faixa de média à alta variabilidade, com predomínio de variação média. No entanto, como os autores

utilizaram dados de um ano de monitoramento, o que possibilitou trabalhar com diferentes faixas de umidade e nas estações seca e chuvosa, a variação nos dados foi menos acentuada. Além disso, foi utilizado um número menor de pontos. Como no estudo atual o número de pontos aumentou consideravelmente e cinco deles foram instalados em Neossolo Litólico, classe pedológica que apresentou valores muito baixos de conteúdo de água, essa dispersão foi ainda mais acentuada.

Os dados de estatística descritiva para o logaritmo da umidade do solo podem ser visualizados na Tabela 4, que evidencia a distribuição log-normal dos dados. Tomando-se por base o coeficiente de variação (CV), verifica-se que o logaritmo da umidade do solo apresenta média variabilidade na área.

Tabela 4. Estatística descritiva para o logaritmo da umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), durante os quatro meses de monitoramento, na bacia do Riacho Jatobá.

Mês	Prof.	Média	Mediana	DP	Curtose	Assimetria	Mín.	Máx.	CV (%)
SET	0,0 - 0,1	-3,116	-3,034	0,602	-0,017	0,078	-4,366	-1,852	-19,33
	0,1 - 0,2	-2,914	-3,016	0,631	-0,900	0,138	-3,960	-1,754	-21,64
OUT	0,0 - 0,1	-3,682	-3,612	0,598	0,673	0,528	-4,605	-1,938	-16,25
	0,1 - 0,2	-3,180	-3,101	0,819	-0,754	0,093	-4,605	-1,394	-25,75
NOV	0,0 - 0,1	-3,815	-3,888	0,639	0,150	0,700	-4,711	-2,025	-16,74
	0,1 - 0,2	-3,351	-3,396	0,788	-0,810	0,044	-4,962	-1,802	-23,51
DEZ	0,0 - 0,1	-3,876	-3,965	0,644	0,253	0,788	-4,711	-2,064	-16,62
	0,1 - 0,2	-3,359	-3,397	0,817	-1,041	0,182	-4,605	-1,826	-24,33
		-3,412	-3,426	0,692	-0,306	0,319	-4,566	-1,832	-20,52

DP = Desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Na Figura 9 estão representados os gráficos *Q-Q Plot* de umidade do solo e seu logaritmo para o mês de setembro, na camada de 0,0 – 0,1 m. Percebe-se, apenas por meio de análise visual, a boa aproximação à distribuição log-normal da umidade.

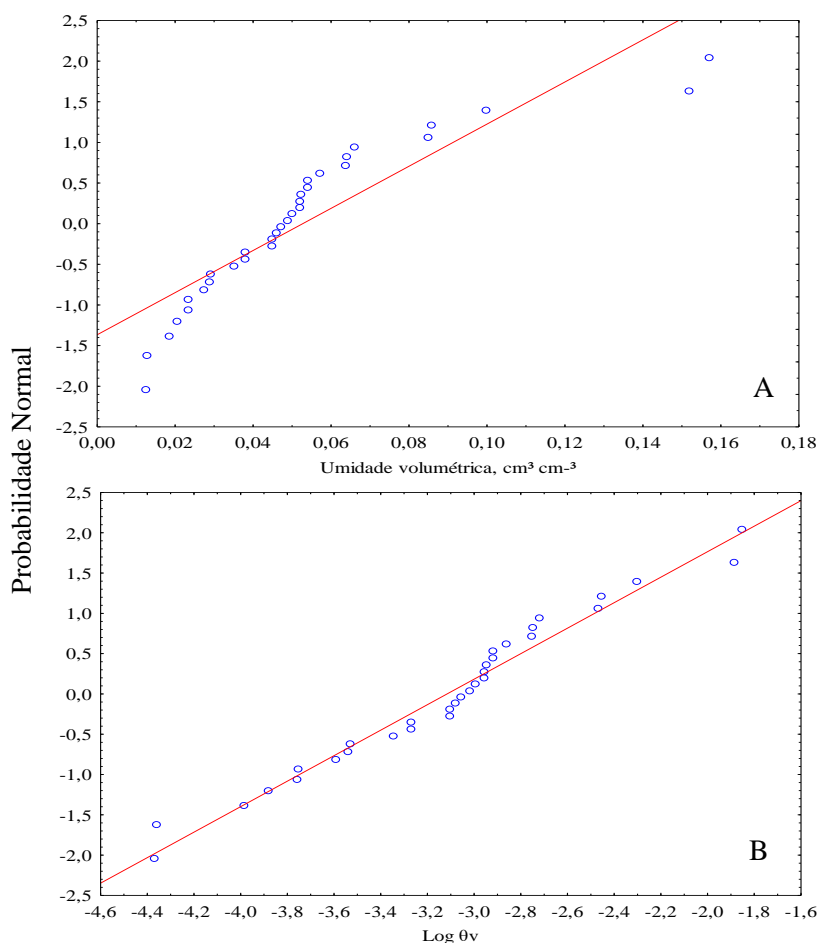


Figura 9. Gráficos Q-Q Plot para umidade do solo (A) e seu logaritmo (B) a 0,0 – 0,1 m de profundidade, no mês de setembro.

Passos e Carvalho et al. (2002) em estudo realizado em um Latossolo Vermelho, no estado do Mato Grosso do Sul, também identificaram a distribuição de frequências do tipo log-normal para dados de umidade coletados. De forma similar, Souza et al. (2001) notaram a distribuição mais próxima à log-normal para valores de conteúdo de água no solo, com dados obtidos durante dois meses em área cultivada com feijoeiro. Embora a distribuição normal também tenha sido comprovada em testes realizados pelos autores, as estatísticas apontaram melhor ajuste à log-normalidade.

3.3. Variação temporal da umidade do solo

Quanto à variação temporal da umidade do solo, nos quatro meses de monitoramento e nas duas profundidades amostradas, foi possível identificar, facilmente, a tendência natural da água no solo de ir reduzindo gradativamente ao longo dos monitoramentos (Figura 10). Isso ocorreu porque, durante o período, não houve registros significativos de precipitação, de modo que incrementos significativos na umidade não

foram constatados. Nos dois últimos meses (novembro e dezembro), a umidade média mostrou-se mais estável, porém com leve aumento de 0,047 para 0,048 na camada de 0,1 – 0,2 m.

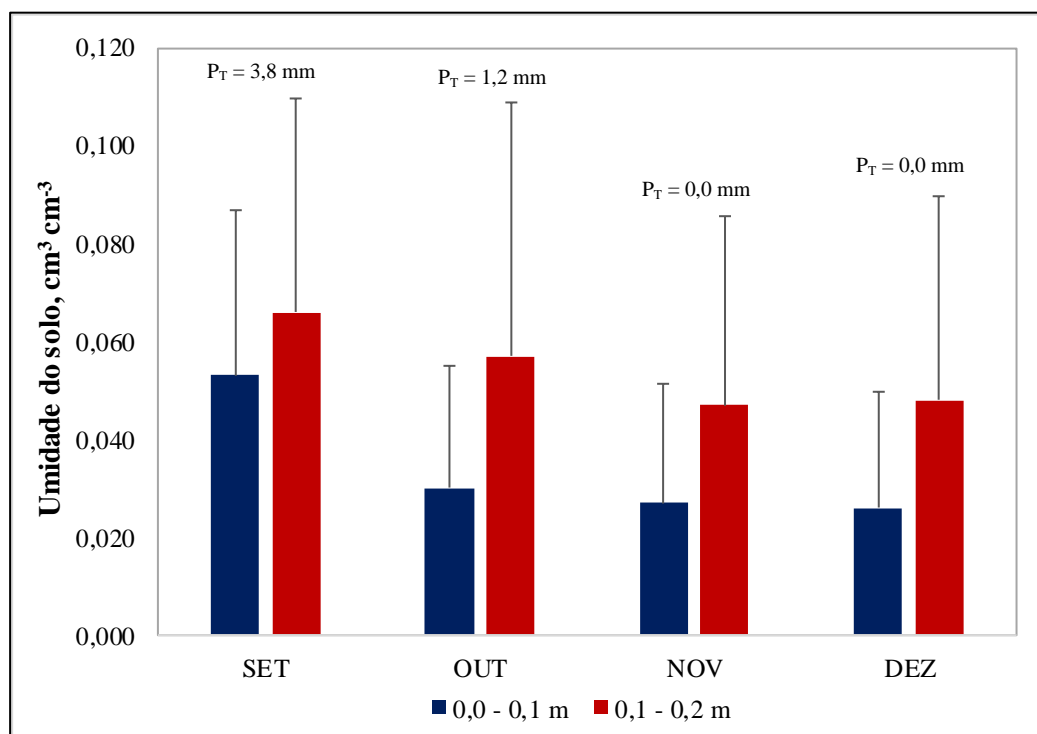


Figura 10. Variação temporal média da umidade do solo durante o período avaliado, nas profundidades de 0,0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m; P_T = Precipitação total.

Vale destacar que, nos meses de junho e julho, foram registradas precipitações totais a montante da bacia de 62,4 mm e 113,5 mm, respectivamente, o que contribuiu para um rápido incremento nos níveis de umidade no solo. Melo e Montenegro (2015) também identificaram picos de precipitação para esses meses, na mesma bacia experimental, no ano de 2011, fato que provocou incremento na umidade do solo nesse período, com redução significativa a partir dos meses de setembro e outubro, quando a precipitação atingiu níveis bem mais reduzidos, voltando a exercer leve influência sobre o aumento da umidade apenas no mês de novembro, o que não ocorreu na situação atual, devido à ausência de chuvas neste mês.

A umidade foi mais elevada na camada de 0,1 – 0,2 m, assemelhando-se a resultados obtidos por Williams et al. (2009), ao estudarem a umidade do solo em uma pequena área de bacia hidrográfica localizada em região semiárida, nos Estados Unidos, a diferentes profundidades. Conforme constatado pelos autores, no início da estação chuvosa, a umidade tende a aumentar mais rapidamente nas camadas superficiais. Após

redução da precipitação, a situação vai se invertendo, com o registro de maior conteúdo de água nas camadas mais profundas de solo. Assim como apresentou maiores valores de umidade do solo ao longo do tempo, essa camada também obteve maiores desvios-padrão, o que evidencia uma dispersão mais elevada dos dados.

A variação média de umidade, durante os quatro meses, foi de 104,55% para a camada de 0,0 – 0,1 m e 37,00% para a camada de 0,1 – 0,2 m. Nesse sentido, Lima et al. (2012) destacam ainda que, nas camadas superficiais, os processos relacionados à movimentação da água, como a infiltração, evaporação, drenagem e redistribuição, ocorrem de forma mais representativa, o que, naturalmente, pode fazer com que a água contida nessas camadas vá sendo perdida mais rapidamente pelo processo de evapotranspiração ou deslocada para camadas mais profundas do solo.

Os resultados corroboram com os obtidos por Melo (2013). Embora o autor tenha estudado, na mesma bacia, a dinâmica temporal da umidade nas profundidades de 0,0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m, esse mesmo comportamento foi identificado, com valores médios de umidade mais elevados na camada subsuperficial durante a estação seca. No início da estação chuvosa, no entanto, alguns monitoramentos apresentaram valores de umidade mais elevados na camada superficial do solo.

3.4. Variabilidade espacial da umidade por classe de solo e cobertura

A Figura 11 destaca, por meio de gráficos *box plot*, variações da umidade em função da classe de solo e cobertura. A presença de outliers deve-se ao fato da existência de pontos que apresentaram valores de umidade mais elevados e persistentes ao longo dos monitoramentos, sobressaindo-se em relação à média amostral, principalmente aqueles instalados em Argissolo Amarelo.

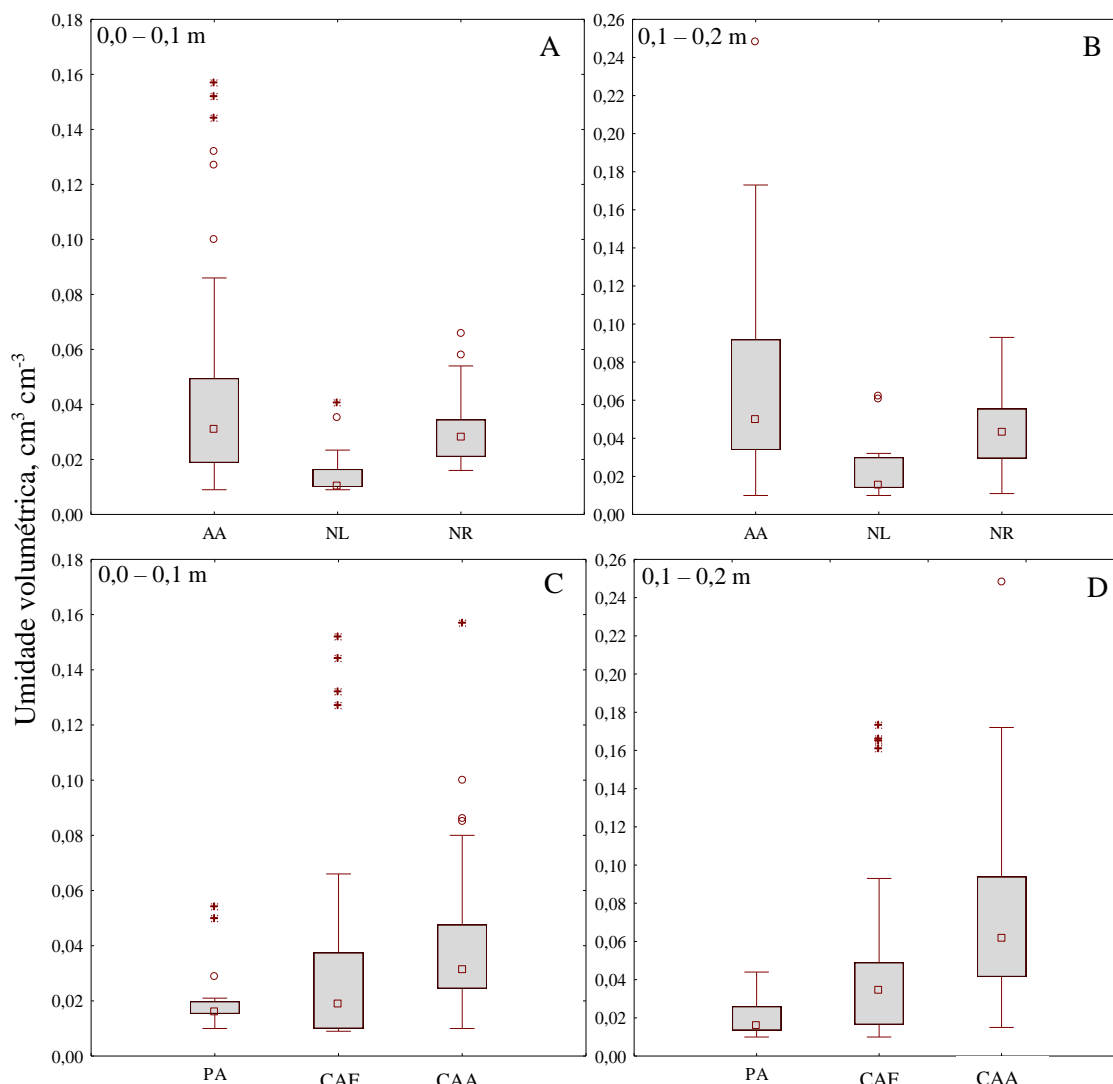


Figura 11. Umidade volumétrica média por classe de solo e tipo de cobertura vegetal. (A) e (B) - classes de solo; (C) e (D) - tipo de vegetação. AA - Argissolo Amarelo; NL - Neossolo Litólico; NR - Neossolo Regolítico; P - Pastagem; CAF - Caatinga arbóreo-arbustiva fechada; CAA - Caatinga arbustiva aberta.

Maior conteúdo médio de água foi registrado no Argissolo Amarelo, nas duas profundidades, tanto de 0,0 – 0,1 m ($0,041 \pm 0,033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) quanto de 0,1 – 0,2 m ($0,067 \pm 0,048 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), seguido do Neossolo Regolítico, com médias de $0,030 \pm 0,014 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,045 \pm 0,021 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para as camadas de 0,0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m, respectivamente. Esse é um comportamento esperado, visto que Argissolos são caracterizados pelo elevado teor de argila, que pode, por vezes, aumentar abruptamente em profundidade. Esse tipo de solo é reconhecido pela boa capacidade de retenção de água, devido à presença de horizonte B textural (B_t), que é ainda maior nos horizontes subsuperficiais, o que pode constituir um reservatório de água para as plantas

(EMBRAPA, 2006; IAC, 2016), característica muito importante, principalmente em regiões semiáridas.

De acordo com a EMBRAPA (2006), a classe de Neossolos compreende solos ainda em vias de formação, sendo pouco evoluídos, com material orgânico com menos de 20 cm de espessura e não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. No caso dos Neossolos Litólicos, que foram os que apresentaram menor conteúdo de água, vale destacar que esse tipo de solo, geralmente, é formado de horizonte A superficial assentado diretamente sobre a rocha ou massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm (cascalhos), o que justifica a sua dificuldade maior de reter água. Além disso, foi constatado, por meio de análise granulométrica, predomínio de fração areia superior a 80% nesses pontos, o que reforça o motivo de valores mais baixos de umidade serem registrados, nas duas camadas.

Quanto ao tipo de cobertura, houve uma diferença no padrão de distribuição espacial da umidade, que diverge dos resultados obtidos por Melo e Montenegro (2015) em dados de monitoramentos dos anos de 2010 e 2011. Em seu estudo, os autores identificaram maior conteúdo de água na área de pastagem. Porém, conforme cita o próprio Melo (2013), a bacia do Riacho Jatobá está gradativamente tendo a sua paisagem alterada em função de alterações no uso e ocupação do solo. Assim, no ano de 2015, foi necessária uma reclassificação da área de vegetação no entorno dos antigos tubos de acesso. Locações que nos anos de 2010 e 2011 eram formadas por pastagem, agora estão, em sua maior parte, inseridas em áreas de cobertura natural do tipo caatinga esparsa, com a presença de espécies vegetais típicas desse bioma. Esse fato ocasionou redução no número de tubos de acesso inseridos dentro da cobertura classificada como pastagem. Variações nos índices pluviométricos, inclusive, contribuíram com esse processo. Devido à escassez de chuvas, a dificuldade em manter áreas de pastagem fez com que, naturalmente, a vegetação natural avançasse sobre essas áreas, alterando a paisagem.

Nas condições avaliadas, as áreas com vegetação de caatinga natural apresentaram maior conteúdo de água no solo, especialmente as de vegetação mais esparsa e rala (arbóreo-arbustiva aberta), com médias de $0,040 \pm 0,026 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para a profundidade de 0,0 – 0,1 m e $0,072 \pm 0,044$ para a camada de 0,1 – 0,2 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Guariz et al. (2009), estudando a distribuição espacial da umidade em uma microbacia no município de Posto Alegre – ES, também durante o período de quatro meses e sob cinco condições distintas

de cobertura vegetal, encontraram valores de umidade relativamente elevados na camada de 0,15 – 0,20 m, para locais com presença de pastagem abandonada, que acabou cedendo lugar a formações arbustivas, também esparsas. Quando comparado ao sítio com presença de espécies de maior porte, no entanto, a umidade na antiga área de pastagem mostrou-se um pouco mais baixa. Essa resposta obtida pelos autores pode ter sido favorecida por outros fatores. Vale lembrar que a vegetação interage também com atributos de solo, que podem favorecer ou não maior acúmulo de água.

No caso da bacia do Jatobá, 50% dos pontos e monitoramento com vegetação do tipo pastagem estão atualmente localizados em Neossolo Regolítico e os outros 50% restante em Argissolo Amarelo. A distribuição no primeiro tipo de solo pode ter influenciado a presença de valores mais baixos de umidade e reduzido a média, considerando que maior parte dos tubos reclassificados eram, nos anos de 2010 e 2011, da área com Argissolo Amarelo, o que possivelmente influenciou positivamente os resultados obtidos por Melo (2015) para esse tipo de cobertura.

Embora em condições climáticas distintas, Ávila (2008), estudando a umidade do solo na Serra da Mantiqueira – MG, em locais cobertos com pastagem, mata e várzea, identificou que a primeira está mais propensa à perda de água, que ocorre de forma mais acelerada e abrupta depois de cessada a estação chuvosa. A presença de cobertura vegetal mais espessa e com raízes mais profundas, contribuiu para a manutenção da umidade em níveis mais representativos nas outras áreas.

Guo et al. (2002) e James et al. (2003), também avaliando a variabilidade da umidade sob diferentes condições de cobertura, detectaram que a vegetação exerce maior influência sobre os padrões de variação do conteúdo de água no solo quando a precipitação é escassa. Essa influência vai reduzindo quando esse recurso é mais abundante. Como na bacia do Jatobá, durante o período avaliado, não houve registros significativos de precipitação, nota-se a influência do tipo de vegetação, que causou variações significativas na distribuição espacial da umidade.

3.5. Análise exploratória e geoestatística de atributos físicos e químicos do solo

De modo geral, todas as propriedades avaliadas apresentaram distribuição normal, conforme teste de aderência à normalidade de Kolmogorov-Smirnov, com exceção da condutividade elétrica, nas duas camadas, que apresentou distribuição de frequências do

tipo log-normal (Tabela 5). O mesmo resultado foi identificado por Montenegro e Montenegro (2006) ao estudarem os padrões espaciais da CE do solo em uma planície aluvial no semiárido pernambucano. Além disso, os autores detectaram CE média de 1894,57 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores muito superiores aos encontrados no presente estudo, onde a salinidade do solo foi considerada relativamente baixa. Gomes e Fizziola (2006) destacam que em regiões semiáridas e áridas, valores de CE acima de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ podem causar severas limitações ao desenvolvimento das culturas. Sendo assim, nas condições estudadas, o solo da bacia do Jatobá não representa sérios riscos ao cultivo agrícola, desde que sejam adotadas boas práticas de manejo da irrigação e da cultura.

Assim como identificado por Hu et al. (2014), ao estudarem por técnicas geoestatística a CE no extrato de saturação do solo em uma pequena bacia experimental na China, com valores médios na faixa de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, os sais tendem a reduzir em profundidade, o que, segundo os autores, pode estar associado à intensa atividade de evaporação, que causa uma forte agregação e acúmulo de sais na superfície do solo.

Tabela 5. Estatística descritiva dos dados de propriedades físicas e químicas do solo na bacia do Jatobá. DS = densidade do solo; CO = carbono orgânico; MO = matéria orgânica; CE = condutividade elétrica.

Atributo	Unidade	Prof. (cm)	Média	Mediana	DP	Curtose	Assimetria	Mín.	Máx.	CV (%)	DF
DS	kg dm^{-3}	00 - 10	1,44	1,45	0,11	-0,60	-0,27	1,22	1,66	7,59	N
		10 - 20	1,50	1,51	0,08	0,82	-0,38	1,27	1,65	5,69	N
Areia	g kg^{-1}	00 - 10	699,46	656,70	90,15	-0,01	1,42	495,80	884,60	13,46	N
		10 - 20	647,19	627,90	101,01	-0,65	0,57	436,20	834,00	15,60	N
Argila	g kg^{-1}	00 - 10	187,27	182,00	50,95	-0,02	0,31	88,80	298,20	27,20	N
		10 - 20	215,16	207,60	70,93	0,14	0,32	82,40	392,00	32,96	N
Silte	g kg^{-1}	00 - 10	144,26	149,10	44,89	-0,57	-0,32	49,00	218,20	31,12	N
		10 - 20	137,64	141,10	48,12	-0,65	-0,22	35,80	223,20	34,96	N
CO	g kg^{-1}	00 - 10	16,19	15,68	5,20	-1,31	0,29	6,86	24,65	32,13	N
		10 - 20	14,76	14,10	4,42	0,08	0,45	3,17	22,88	29,96	N
MO	g kg^{-1}	00 - 10	24,55	24,04	7,09	0,37	0,22	6,45	39,36	28,87	N
		10 - 20	27,64	26,96	8,67	-1,26	0,24	11,79	42,40	31,39	N
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	00 - 10	334,16	283,20	202,67	7,37	2,44	122,20	1172,0	60,65	L
		10 - 20	231,54	163,1	147,49	1,68	1,49	87,09	791,60	63,70	L

DF = distribuição de frequência; N = distribuição normal; L = distribuição log-normal.

A Figura 12 representa os gráficos *box plot* e histogramas de frequência para as frações granulométricas, nas duas profundidades. Todas as frações apresentaram boa simetria, com gráficos *box plot* bem distribuídos, considerando que o outlier na fração argila foi removido, de acordo com recomendação de Libardi e Melo Filho (2006), que

propõem que esse valor seja comparado com os seus vizinhos mais próximos. Havendo diferença significativa, recomenda-se a remoção do outlier, que pode exercer influência negativa sobre o ajuste de semivariogramas e interpolação espacial por qualquer método. Os histogramas de frequência também confirmam a boa distribuição dos dados e indicam a presença de normalidade.

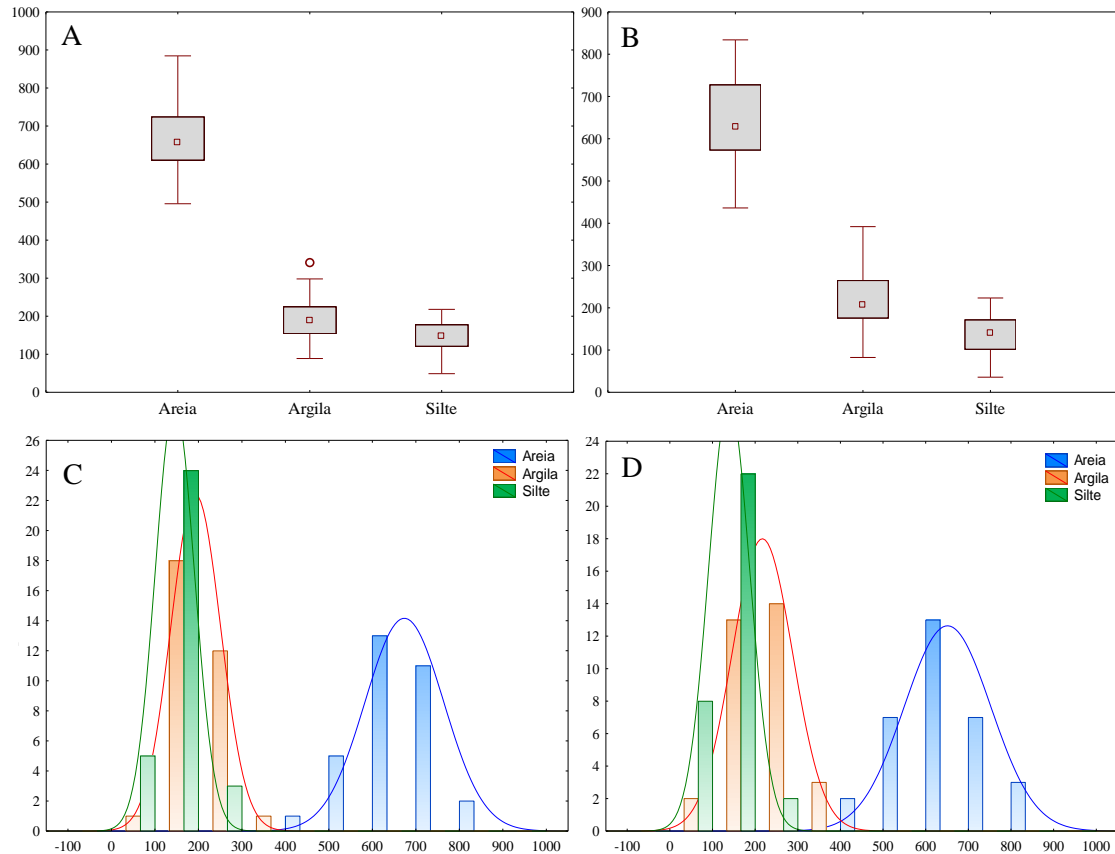


Figura 12. Box plot e histogramas com dados originais de frações granulométricas do solo com outlier, para a profundidade de 0,0-0,1 m (A e C), e sem outlier, para a profundidade de 0,1-0,2 m (B e D).

Shing et al. (2012), também encontraram pontos com valores discrepantes ao caracterizarem o teor de argila na camada de 0,0 – 0,2 m, sendo necessária a remoção desses valores antes dos estudos variográficos para que não houvesse influência sobre a precisão do método. Da mesma forma, Brito (2014), estudando a variabilidade espacial da CE do solo em uma área de aproximadamente 35 ha, encontrou elevados coeficientes de variação, o que indica a tendência dos dados à alta variabilidade.

Os dados de densidade do solo apresentaram baixos coeficientes de variação, segundo classificação de Warrick e Nielsen (1980), que consideram baixos CV aqueles que são inferiores a 12%. Com exceção da CE, que apresentou alta variabilidade espacial

na área, os demais atributos enquadraram-se na categoria de variação média, visto que não ultrapassaram o valor limiar de 60%. Sendo assim, o ajuste de semivariogramas a um modelo que representasse a distribuição espacial desses atributos na área foi possível, de modo que os mesmos foram mapeados.

Antes do ajuste de semivariogramas, os dados foram submetidos à análise de tendência, que foi constatada para areia, argila, densidade do solo, CO e MO, conforme pode ser visualizado na Figura 13.

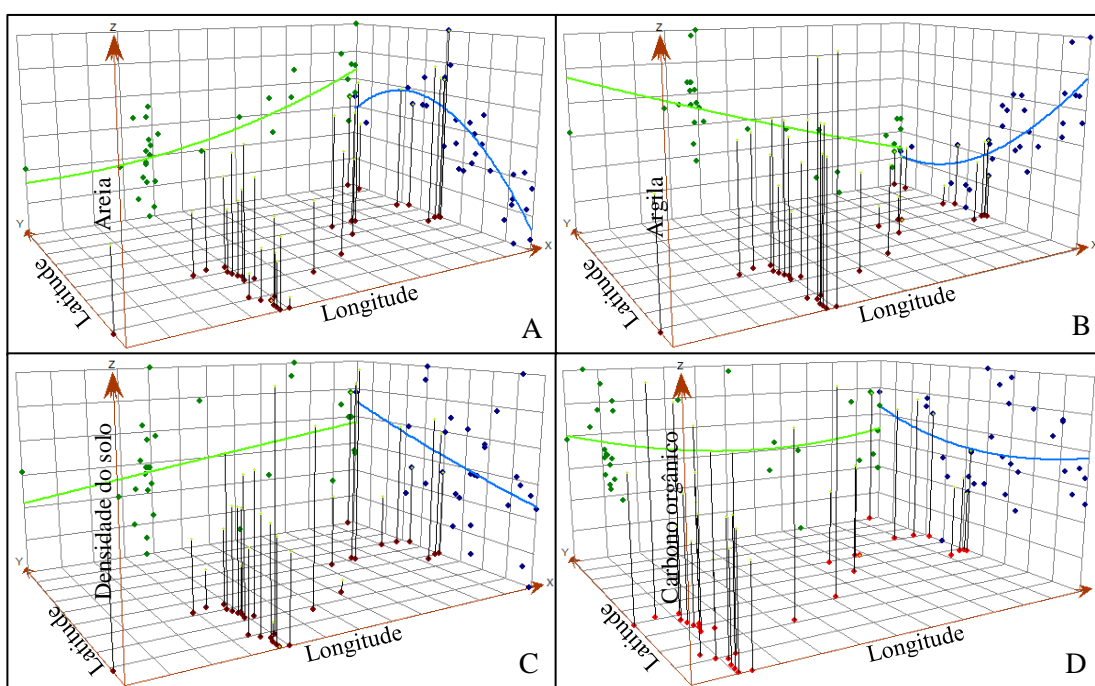


Figura 13. Gráficos de superfície de tendência de primeira e segunda ordem para os atributos areia (A), argila (B), densidade do solo (C) e carbono orgânico (D), apenas para a profundidade de 0,0-0,1 m.

Alguns atributos apresentaram tendência leve, de primeira ou segunda ordem, outros mais acentuada, como a areia, argila e a densidade do solo. Em todos os casos, a opção pela remoção ou não da tendência foi realizada por meio da validação cruzada observada entre os dados originais e os que foram analisados com remoção de tendência, por meio do *ArcGis 10.3.1*.

Na Tabela 6 estão os parâmetros de ajuste e validação dos semivariogramas teóricos. Para os atributos densidade do solo na profundidade de 0,0 – 0,1 m e CE, nas duas camadas, não foi possível realizar o ajuste. Esse tipo de problema, segundo Andriotti (2013), pode ser resultado tanto de amostragem inadequada quanto de fatores inerentes à própria propriedade em estudo, que não apresenta dependência espacial devido a fatores

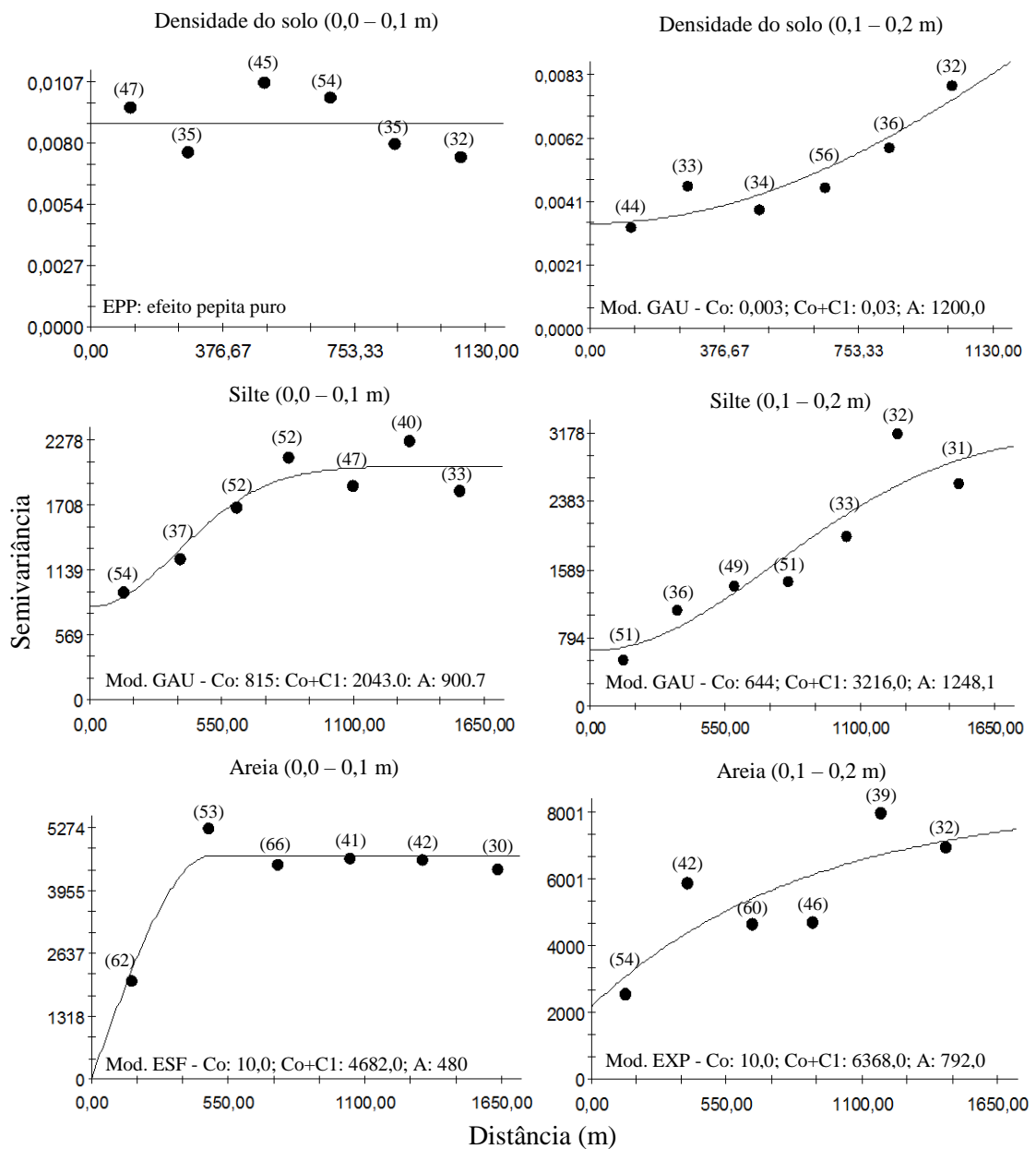
diversos. No caso da bacia do Jatobá, é provável que a limitação no número de pontos e espacialização pouco abrangente na distribuição da malha amostral tenham causado esse fato. Assim, essas propriedades foram caracterizadas pela presença de efeito pepita puro. Nascimento et al. (2014), estudando a variabilidade espacial da CE também no semiárido, em área cultivada com videira, detectaram a presença de efeito pepita puro até a camada de 0,4 m.

Tabela 6. Parâmetros de ajuste e validação dos semivariogramas teóricos de propriedades de solo. C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial (%); EM_{pad} = erro médio padrão; RQMP = raiz quadrada média padronizada e EPP = efeito pepita puro.

Atributo	Unidade	Prof. (cm)	C ₀	C ₀ +C ₁	a	Modelo	GDE (%)	EM _{pad}	RQMP
DS	$kg\ dm^{-1}$	00 - 10	-	-	-	EPP	-	-	-
		10 - 20	0,003	0,03	1200,0	GAU	12,24	0,0078	1,0723
Areia	$g\ kg^{-1}$	00 - 10	10,000	4682,00	480,0	ESF	0,21	0,0083	1,0010
		10 - 20	10,000	6368,00	792,0	EXP	0,16	0,0036	1,0601
Argila	$g\ kg^{-1}$	00 - 10	1,000	1445,00	393,0	EXP	0,07	-0,0225	1,2642
		10 - 20	1,000	3087,00	381,0	EXP	0,03	0,0143	1,2503
Silte	$g\ kg^{-1}$	00 - 10	815,00	2043,00	900,7	GAU	39,89	-0,0058	0,9623
		10 - 20	644,00	3216,00	1248,1	GAU	20,02	-0,0044	1,1269
CO	$g\ kg^{-1}$	00 - 10	16,640	33,29	486,0	EXP	49,98	0,0102	1,0783
		10 - 20	10,510	30,88	848,0	EXP	34,03	0,0155	1,0732
MO	$g\ kg^{-1}$	00 - 10	46,600	114,95	910,0	EXP	40,54	0,0062	1,2534
		10 - 20	34,800	71,93	780,0	EXP	48,38	-0,0249	0,9990
C.E.	$\mu S/cm$	00 - 10	-	-	-	EPP	-	-	-
		10 - 20	-	-	-	EPP	-	-	-

Como pode ser observado na tabela, o grau de dependência espacial (GDE) foi classificado como moderado para silte na camada de 0,0 – 0,1 m e para CO e MO, nas duas camadas amostradas. Os demais atributos apresentaram GDE forte e nenhum deles foi classificado com fraca dependência espacial. Isso indica, segundo Ávila et al (2010), que o interpolador geoestatístico provavelmente produzirá bons resultados, resultando em mapas representativos e sem tendência na distribuição espacial das propriedades em estudo. Além disso, o erro médio padronizado, para todos os atributos, ficou próximo de zero, ao passo que a raiz quadrada média padronizada esteve próxima de um, o que indica bom ajuste do modelo, de acordo com critérios estabelecidos por Jacob e Young (2006). Esses critérios, em conjunto com o GDE, foram utilizados na seleção do modelo de semivariograma teórico que melhor representasse a dependência espacial dos atributos avaliados.

Os modelos ajustados e selecionados estão representados na Figura 14. Percebe-se que a densidade do solo e o silte, na camada de 0,1 – 0,2 m, foram os que apresentaram maior alcance, da ordem de 1200 m para a densidade do solo e 1248,1 m para o silte, ambos ajustados ao modelo gaussiano. Vale destacar que o alcance indica a distância (m) da dependência espacial observada na área (Tavares et al., 2014). Sendo assim, pontos coletados a distâncias maiores que o alcance são considerados independentes (Vieira, 2000).



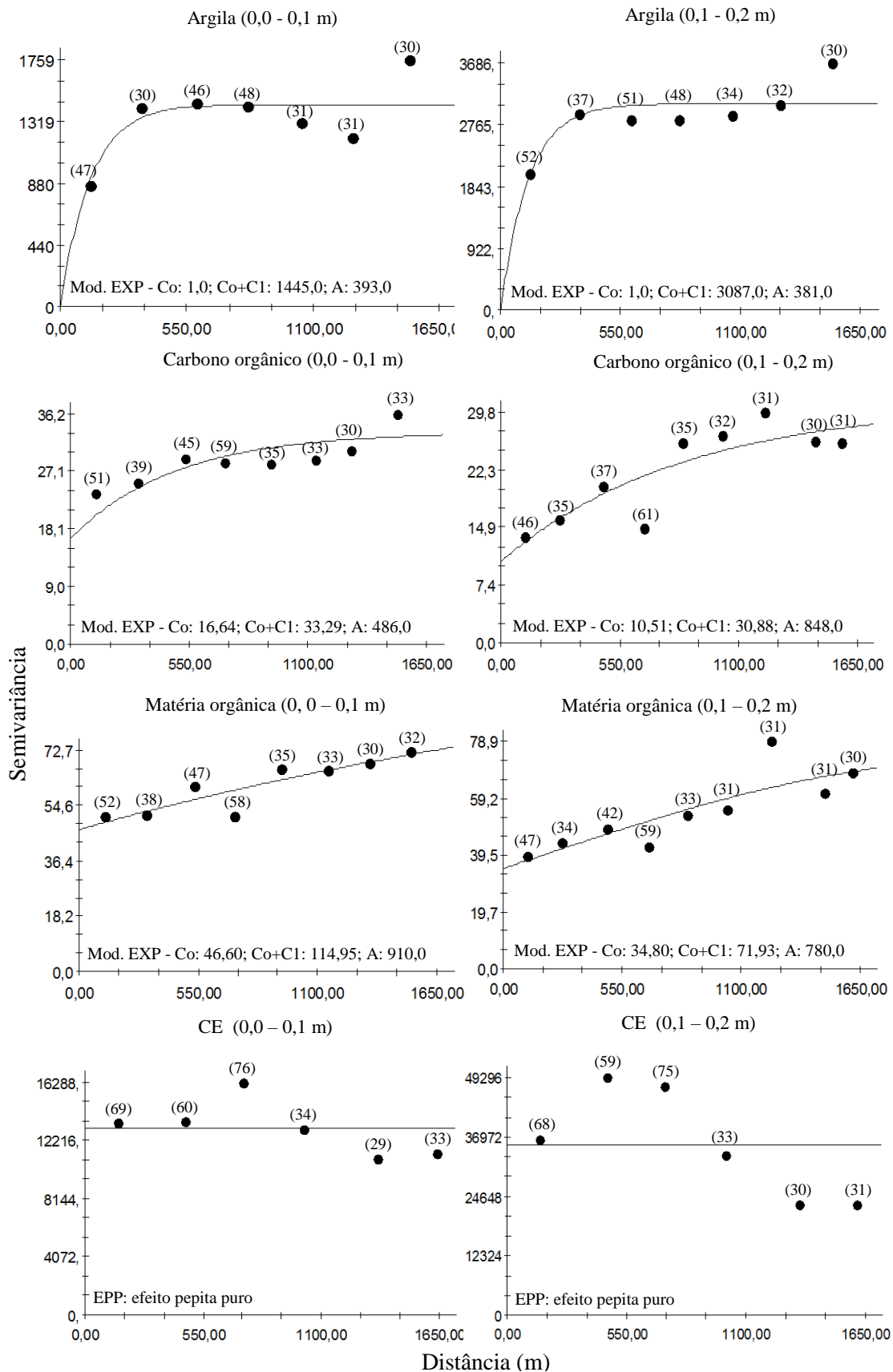


Figura 14. Semivariogramas teóricos escolhidos para mapeamento da variabilidade espacial de propriedades de solo; C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; A = alcance.

Em todos os casos em que foi possível modelar espacialmente o atributo em estudo, os alcances foram favoráveis, gerando mapas representativos, uma vez que somente são considerados na interpolação pontos de amostragem que se encontram dentro do raio de influência do alcance. Gomes et al. (2007), estudando os mesmos atributos em uma sub-bacia de 477 ha, em Minas Gerais, também encontraram elevados valores de alcance para algumas propriedades, como a areia ($A = 3000$ m) e argila ($A = 1236,63$ m), sendo superiores aos constatados no presente estudo. Já para os atributos densidade do solo, silte e MO, os autores encontraram alcances de 425,90 m, 291,48 m e 354,08 m, respectivamente, evidenciando menor continuidade espacial na situação em estudo para essas variáveis.

As superfícies resultantes da krigagem estão dispostas na Figura 15, 16, 17 e 18. Em virtude da limitação no número de pontos, optou-se por colocar, ao lado dos mapas de predição dos atributos, os mapas de erros associados às estimativas. Nota-se que, nas regiões vizinhas aos locais com presença de pontos de coleta, os erros são consideravelmente menores e tendem a crescer nas extremidades da bacia, onde não houve amostragem. Algumas propriedades apresentaram erros mais reduzidos e mostraram maior precisão de estimativa na superfície da bacia. No caso do CO e MO, a presença marcante de áreas avermelhadas nos limites da bacia indica a tendência da krigagem a gerar maiores erros de predição nesses locais, o que pode estar associado à menor dependência espacial desses atributos. Vale considerar que ambos apresentaram efeito pepita significativo, nas duas camadas.

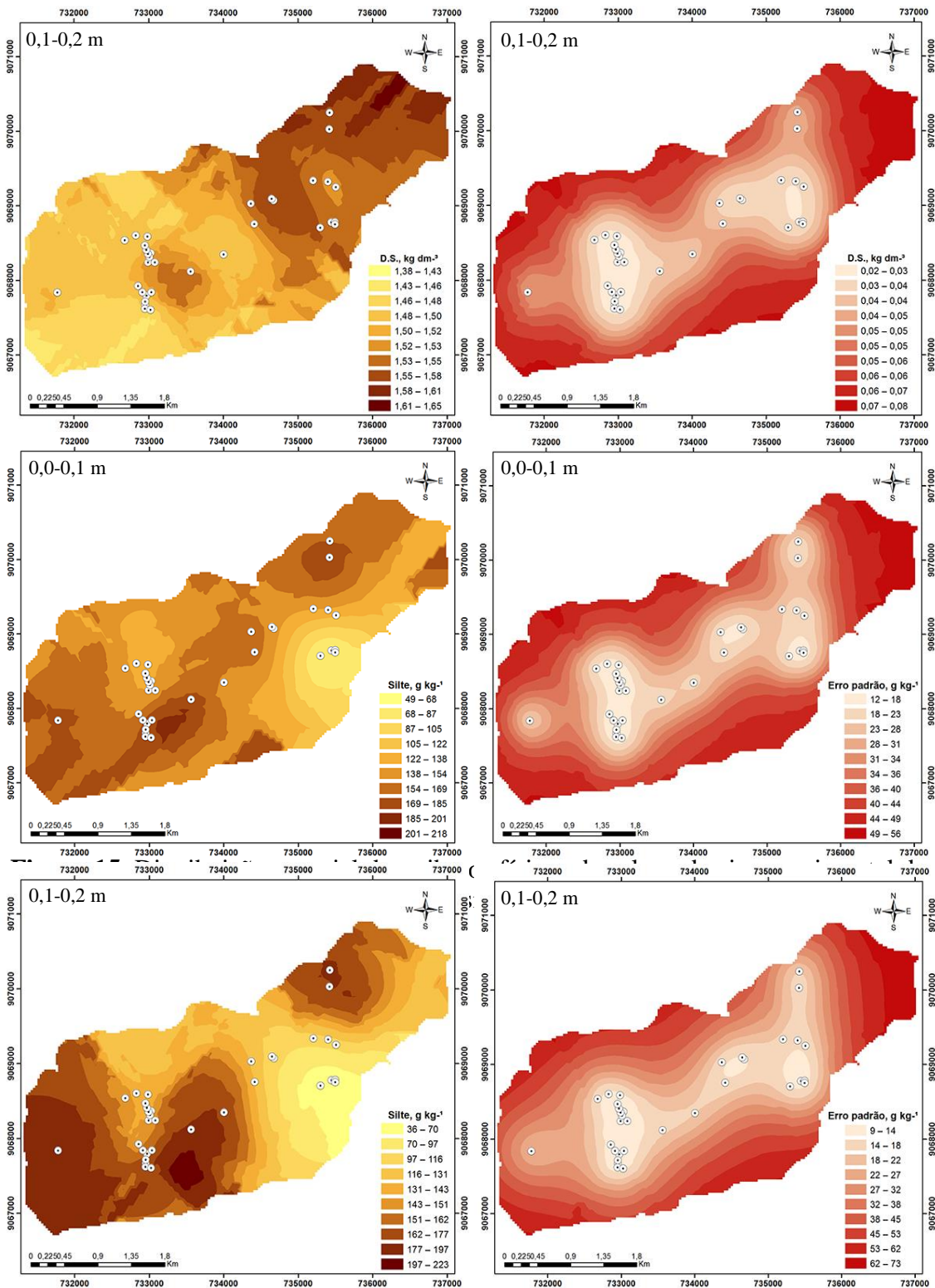


Figura 15. Distribuição espacial de atributos físicos de solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE.

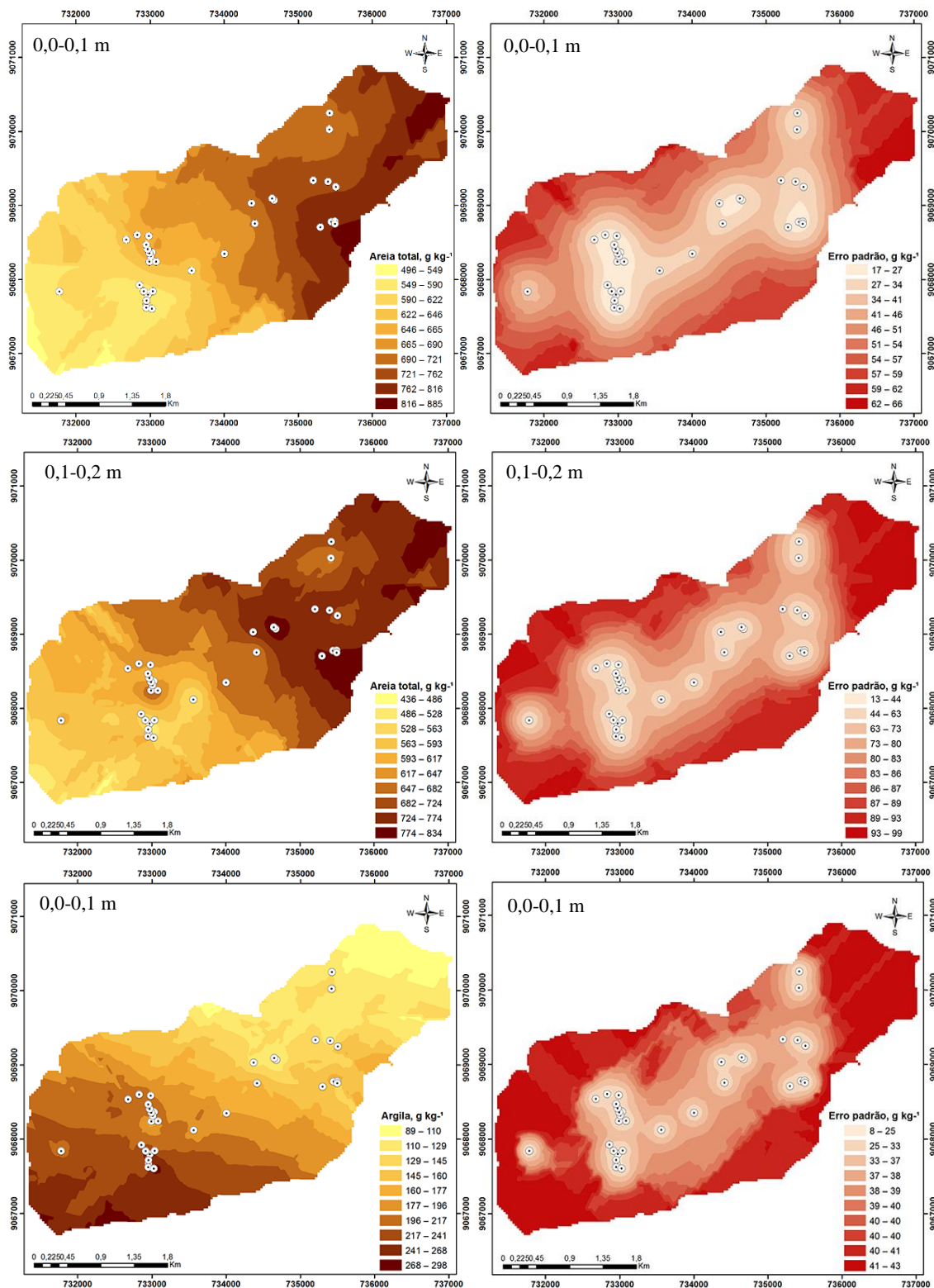


Figura 16. Distribuição espacial de atributos físicos de solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE.

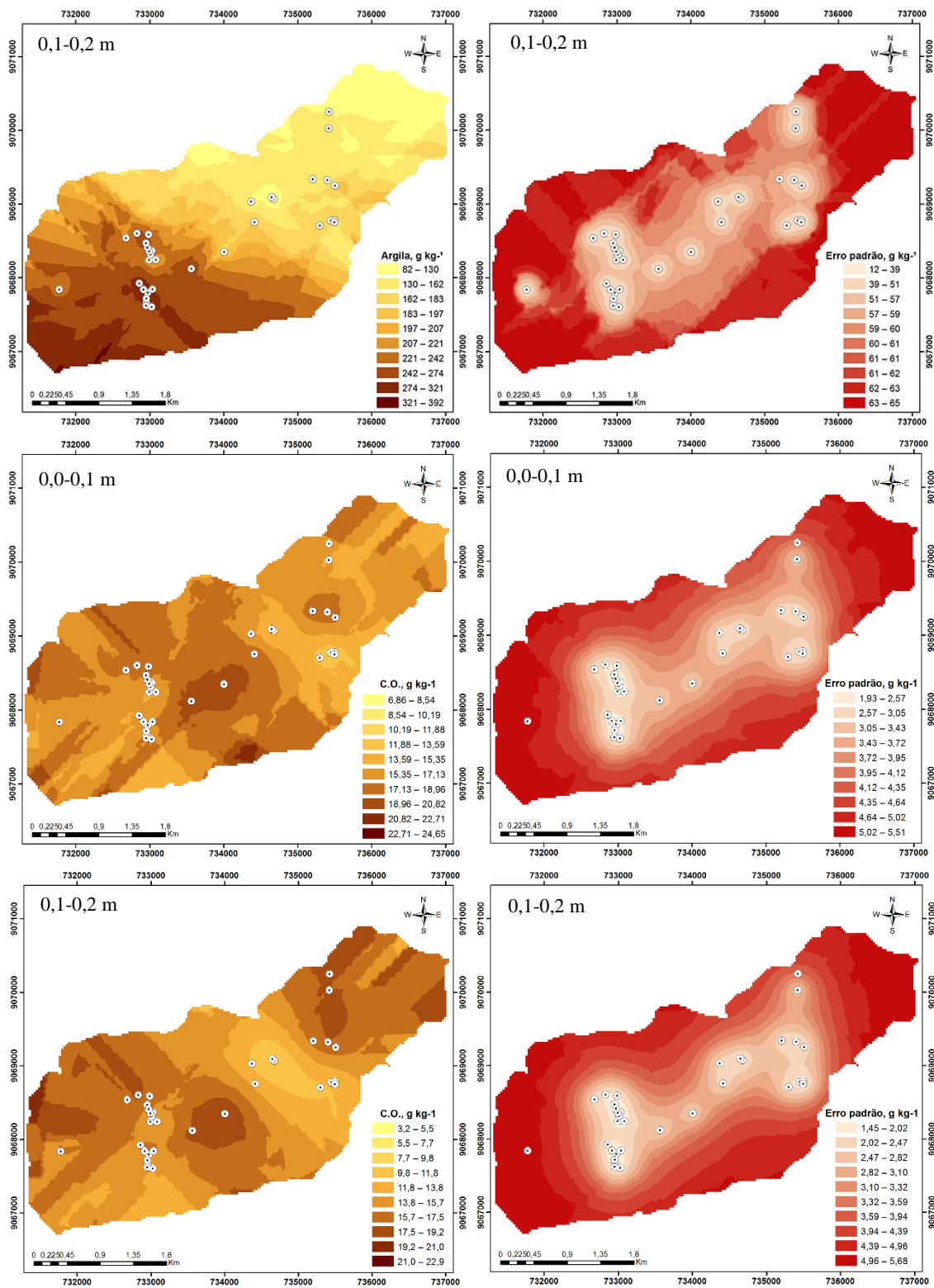


Figura 17. Distribuição espacial de atributos físicos e químicos de solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE.

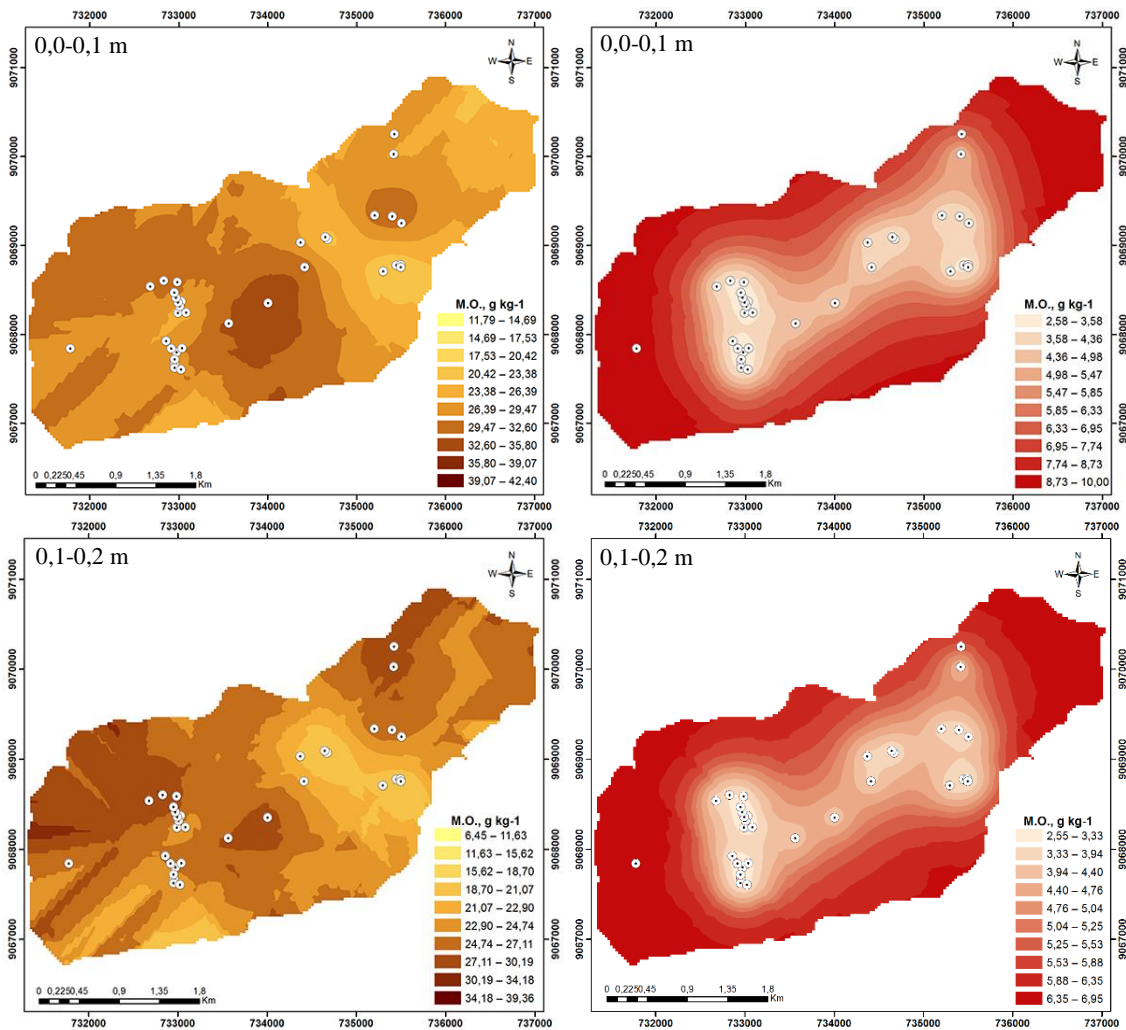


Figura 18. Distribuição espacial da matéria orgânica (MO) do solo na bacia experimental do Riacho Jatobá, Pesqueira – PE.

De modo geral, os mapas de textura comprovam a classificação pedológica da bacia, com predomínio de fração argila à montante, onde há forte presença de Argissolo Amarelo, e elevado conteúdo de areia à jusante, onde estão distribuídos o Neossolo Regolítico e Neossolo Litólico.

A densidade no solo, na profundidade modelada (0,1 – 0,2 m), foi mais representativa a jusante da bacia, onde há maior predomínio da fração areia. Esse é um resultado esperado, considerando que as partículas de areia não formam agregados. Dessa forma, a quantidade total de poros é menor que na fração argila, o que conseqüentemente lhe confere maior massa devido ao menor volume de vazios (ar), com valores de densidade do solo mais representativos (MARCOLIN e KLEIN, 2011).

Yang et al. (2014), estudando a distribuição espacial do carbono orgânico em uma área desértica da China coberta com gramíneas, detectaram a correlação positiva entre

umidade do solo e conteúdo de CO, ocorrendo o contrário com a densidade do solo e valores de CO, onde a correlação foi negativa. No caso da bacia do Jatobá, houve também uma leve tendência de a porção jusante apresentar conteúdos de CO e MO representativos, principalmente na porção com predomínio de silte, que é mais eficiente na retenção de água. Além disso, durante a estação chuvosa, a água naturalmente escoar para as regiões de menores altitude, o que acarreta o arraste de material de áreas mais elevadas, podendo causar aporte de MO nas zonas de menor altitude.

3.6. Relação entre umidade e propriedades físicas e químicas de solo

A umidade do solo na bacia foi mais elevada, durante os quatro monitoramentos, na porção montante, com predomínio de solo com fração granulométrica argilosa. Coelho Filho (2000), enfatiza que a distribuição da umidade tende a ser similar à da argila, o que indica forte correlação espacial entre esses dois atributos.

Ávila (2008), em estudo realizado em bacia da Serra da Mantiqueira – MG, percebeu variações do conteúdo de água ao longo do período de um ano, tanto em resposta às estações climáticas quanto ao tipo de vegetação. O autor comenta que, no período chuvoso, foi comum encontrar maiores níveis de umidade do solo na porção jusante da bacia, com menores altitudes, visto que a água das chuvas tende a escoar para essas regiões. Na época de estiagem, conforme reforça Guo et al. (2002), ocorre uma inversão, com o tipo de solo e cobertura exercendo maior influência sobre a distribuição espacial da umidade. No caso da bacia do Jatobá, onde o monitoramento foi realizado em período com ausência de precipitações significativas, maior conteúdo de água foi identificado na porção montante da bacia, com predominância de solos mais argilosos, que tendem a reter com mais força a água quando este atributo é limitado.

A jusante, maior conteúdo de água no solo foi detectado nos locais com predomínio de silte. Os poros do material siltoso são bem mais pequenos e numerosos que os poros presentes entre as partículas de areia, desse modo, esse material tende a reter mais água e permitir uma menor taxa de drenagem, o que favorece a retenção de água com maior força, ao contrário da areia.

Mzuku et al. (2005) também identificaram a tendência característica da umidade de ser maior em faixas de solo com predomínio de argila e silte, assim como o teor de carbono e matéria orgânica que, em seu estudo, apresentaram relação direta com a

umidade do solo. No caso da bacia do Jatobá, tanto o CO quanto a MO foram mais representativos em faixas de solo próximas de pontos com maior conteúdo de água, assim como em áreas mais argilosas e siltosas.

Adubuwaili et al. (2012), estudando a distribuição espacial da umidade do solo, salinidade e carbono orgânico em uma bacia hidrográfica na China, encontraram resultados semelhantes, como níveis mais representativos de CO onde a umidade do solo era mais elevada, em três profundidades ao longo do perfil. Quanto à salinidade, os autores identificaram maior concentração à jusante, justificando essa resposta pelo fato de a água que escoar da porção montante, durante a época chuvosa, arrastar esses sais para as áreas com menor altitude, resultando em sua concentração e acúmulo. Como na bacia do Jatobá não foi possível mapear esse atributo, não dá para inferir com precisão sobre a sua distribuição espacial.

4. CONCLUSÕES

1. As equações de calibração obtidas para a sonda Diviner 2000[®] podem ser utilizadas nas condições estudadas, sendo necessário continuar com a calibração em período com precipitação, visando abranger uma faixa maior de umidade e consequente aprimoramento das leituras;

2. A porção montante da bacia é caracterizada pela capacidade de reter maior quantidade de água no solo devido à predominância de Argissolo Amarelo e elevados teores de argila;

3. Os solos da bacia apresentam CE relativamente baixa, o que lhes confere bom potencial agrícola, sendo necessária a adoção de boas práticas de manejo da irrigação e cultura;

5. Apesar do número reduzido de pontos, foi possível realizar boa modelagem variográfica por meio da *krigagem* para atributos de solo, com dependência espacial variando de moderada a forte, para todas as propriedades mapeadas.

5. REFERÊNCIAS

- ADUBUWAILI, J. et al. Spatial distribution of soil moisture, salinity and organic matter in Manas River watershed, Xinjiang, China. **Journal of Arid Land**, v. 4, n. 4, p. 441–449, 2012.
- ANDRADE JUNIOR, A. S.; SILVA, C. R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.**, Belém, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007.
- ÁVILA, L. F. **Comportamento espacial e temporal da umidade do solo numa bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais**. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 120. 2008.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1257–1266, 2010.
- BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 131–139, 2010.
- BRITO, M. D. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta à silvicultura de precisão**. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 89. 2014.
- BROCCA, L. et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe, v. 115, p. 3390-3408, 2011.
- CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JUNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 42, n. 2, p. 258-267, 2011.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, J. M.; NOVAK, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. Teste de Filiben para validar modelos Geoestatísticos aplicados a agroclimatologia. **In: Anais. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA**, São Pedro, 2004.
- COELHO FILHO, M. A.; COELHO, R. D.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 239-246, 2001.
- CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R. **Levantamento detalhado de solos da fazenda Nossa Senhora do Rosario (Pesqueira – PE)**. Relatório Técnico: UFRPE/UFPE/CNPq/BNB. Recife, p. 35. 2001.
- COSTA, C. A. G. et al. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 44, n. 4, p. 685-694, out/dez 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA - SPI, v. 2, 2006. 306 p.

FAMIGLIETTI, J. S. et al. Field observations of soil moisture variability across scales. **Water Resources Research**, v. 44, n. 1, jan 2008.

FARES, A. et al. Dual Field Calibration of Capacitance and Neutron Soil Water Sensors in a Shrinking–Swelling Clay Soil. **Vadose Zone J.**, Madison, v. 3, n. 4, p. 1390-1399, 2004.

FARES, A.; ALVA, K. A. Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance. **Soil Science**, v. 164, n. 5, p. 302-310, 1999.

FENG, Q. et al. Spatial Heterogeneity of Soil Moisture and the Scale Variability of Its Influencing Factors: A Case Study in the Loess Plateau of China. **Water**, v. 5, p. 1226-1242, 2013.

GIRONA, J. et al. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water stress. **Agricultural Water Management**, v. 54, p. 107-122, 2002.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: EMBRAPA, 2006.

GOMES, M. N. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.11, n.4, p.427–435, 2007.

GUARIZ, H. R. et al. Variação da Umidade e da Densidade do Solo sob Diferentes Coberturas Vegetais. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 3293 – 3296, 2009.

GUO, D. et al. Temporal changes in spatial patterns of soil moisture following disturbance: an experimental approach. **Journal of Ecology**, v. 90, p. 338 – 347, 2002.

HEGEDUS, P. et al. Analysis of spatial variability of near-surface soil moisture to increase rainfall-runoff modelling accuracy in SW Hungary. **Open Geosciences**, v. 7, n. 1, p. 2391-5447, abr 2015.

HU, W.; MING, A. S.; WAN, L.; BING, C. S. Spatial variability os soil electrical conductivity in a small watershed on the Loess of Plateau of China. **Geoderma**, 230-231, 2014.

INSTITUTO AGRONÔMICO - IAC. Argissolos. **IAC - SP**, 2016. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosp/pdf/Argissolos.pdf>>. Acesso em: 06 jan 2016.

JABRO, J. D. et al. Spatial variability and correlation of selected soil properties in the Ap Horizon of a CRP Grassland. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 26, n. 3, p. 419-428, 2010.

- JACOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. **In: XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais - ABEP**, Caxambu, set 2006.
- JAMES, S. E. et al. Temporal heterogeneity of soil in grassland and forest. **Journal of Ecology**, v. 91, p. 234 – 239, 2003.
- LIBARDI, P. L.; MELO FILHO, J. F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 197-206, 2006.
- MARCOLIN, C. D; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Maringá**, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011
- MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. (Tese - Doutorado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo campus Piracicaba. Piracicaba, p. 122. 2004.
- MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Florestalis**, v. 1, n. 69, p. 25-37, 2005.
- MELO, O. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica. **RBRH**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 430-441, abr/jun 2015.
- MELO, R. O. **Estabilidade temporal e variabilidade da umidade do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano**. (Tese - Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 91. 2013.
- MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 90-101, jan/fev 2011.
- MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R. Variabilidade espacial da umidade do solo em uma bacia intermitente no semiárido de Minas Gerais. **In: Anais. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Golçalves, nov 2013.
- MORGAN, K. T. et al. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 987-989, 1999.
- MZUKU, M. et al. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 69, p. 1572–1579, 2005.
- NASCIMENTO, P. S.; ROCHA, M. G.; SILVA, J. A.; COSTA, B. R. S.; RABELLO, L. M.; BASSOI, L. H. **Zonas homogêneas de condutividade elétrica aparente em Neossolo Quartzarênico no Semiárido**. In...: Agricultura de precisão: um novo olhar. EMBRAPA, 2014.
- PANDEY, V.; PANDEY, P. K. Spatial and Temporal Variability of Soil Moisture. **International Journal of Geosciences**, v. 1, p. 87-98, 2010.
- PASSOS E CARVALHO, M.; SORATTO, R. P.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos físicos em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico sob preparo

convencional em Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1353-1361, 2002.

PENNA, D. et al. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. **Journal of Hydrology**, v. 364, n. 3-4, p. 311-327, 2009.

PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Science Journal**, v. 33, n. 4, p. 379-400, 1988.

PRIMO, J. T. A. et al. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 1, p. 020-029, jan/fev 2015.

ROBINSON, D. A. et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, p. 358–389, 2008.

ROSENBAUM, U. et al. Field observations of soil moisture variability across scales. **Water Resources Research**, v. 48, n. 10, out 2012.

SANTOS, T. E. M. et al. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura de solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 1-15, 2008.

SENTEK. **Calibration of Sentek Pty Ltd soil moisture sensors**. Stepney: Sentek Pty Ltd. [S.l.]. 2001.

SHING, L. R. et al. **Aplicação de métodos geoestatísticos na determinação da variabilidade espacial do teor de argila**. In: VI Congresso Brasileiro de Soja. Cuiabá: [s.n.]. 2012.

SILVA, C. R. et al. Calibração da sonda de capacitância Diviner 2000 em um Argissolo. **In: XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, João Pessoa, ago 2006.

SILVA, C. R. et al. Calibration of a capacitance probe in a paleudult. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 636-640, nov/dez 2007.

SILVA, R. C. et al. Calibration of a capacitance probe in a paleudult. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 636-640, nov/dez 2007.

SOUZA, E. R. et al. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 29, p. 26-32, 2011.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 699-707, 2001.

TELES SANTOS, M. S. et al. Altimetria GNSS de precisão aplicada ao monitoramento da dinâmica sedimentar costeira de curta duração em escala regional. **Bol. Ciênc. Geod**, v. 19, n. 4, p. 624-638, out/dez 2013.

THOMPSON, S. K. **Sampling**. Wiley-Interscience Publication. New York, p. 343. 1992.

TOPP, G. C.; FERRÉ, P. A. The soil solution phase. **In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. Methods of soil analysis**, Wisconsin, Soil Science Society of America, 2002. 417-1071.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Developing Spatially Interpolated Surfaces and Estimating Uncertainty**. [S.l.]: Research Triangle Park, 2004.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos Ciência do Solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: _____ **In: HILLEL, D. (Ed.). Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. Cap. 2, p. 319-344.

YANG, R.; YONGZHONG, SU.; WANG, M.; WANG, T.; YANG, X.; FAN, G.; TIACHANG, WU. Spatial pattern of soil organic carbon in desert grasslands of the diluvial-alluvial plains of northern Qilian Mountains. **J Arid Land** (2014) 6(2): 136–144.

YAO, X. et al. Comparison of Four Spatial Interpolation Methods for Estimating Soil Moisture in a Complex Terrain Catchment. **Plos One**, v. 8, n. 1, jan 2013.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. **Common, In Soil Science, Plant Anal**, 1988. 1467-1476.

ZHANG, C. et al. Research of the spatial variability of soil moisture. **International Federation for Information Processing**, 2008. Disponível em: <<http://dl.ifip.org/db/conf/ifip12/ccta2008-1/ZhangLZT08.pdf>>. Acesso em: 06 jan 2016.

ZHANG, J. G. et al. Spatial variability and patterns of surface soil moisture in a field plot of karst area in southwest China. **Plant Soil Environ**, v. 57, n. 9, p. 409–417, 2011.

CAPÍTULO III –

RESUMO

ARAÚJO, D. C. S. **Estabilidade temporal da umidade do solo em cultivo de banana no semiárido Pernambucano**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco.

A umidade do solo é bastante variável no tempo e no espaço devido à influência de vários fatores edafoclimáticos, o que torna necessária a sua amostragem para a obtenção de dados seguros acerca do conteúdo de água no solo. Com base nisso, o presente trabalho avaliou a umidade do solo em lote irrigado, pertencente à bacia experimental do Rio Ipanema, localizado no município de Pesqueira, região semiárida do estado de Pernambuco, cultivado com banana no espaçamento de 4 x 4 metros, totalizando 200 plantas. O estudo foi realizado durante dois dias, em uma área de 6.270 m² dividida em dois setores, com e sem cobertura morta de folhas de bananeira, respectivamente. A umidade foi monitorada com o uso de sensores FALKER HidroFarm HFM 1010 instalados em um transecto com 11 unidades espaçadas em 8 metros, em cada setor. O monitoramento foi conduzido antes e após irrigação e os dados foram avaliados utilizando a estatística descritiva e a estabilidade temporal, pelo método das diferenças relativas e teste de correlação de Spearman. O setor sem cobertura morta apresentou umidade mais elevada em todos os instantes de monitoramento e o conteúdo de água variou quanto à posição dos sensores no terreno, devido a variações nas propriedades granulométricas do solo. Os valores de correlação de Spearman foram elevados, indicando estabilidade temporal, e a técnica das diferenças relativas possibilitou a identificação de pontos no espaço amostral que se aproximaram da média da umidade em toda a área.

Palavras-chave: monitoramento, diferença relativa, cobertura morta.

- CHAPTER III –

ABSTRACT

ARAÚJO, D. C. S. **Temporal stability of soil moisture in banana cropping area in the semiarid of Pernambuco State, Brazil.** 2016. Thesis (Master's degree in Agricultural Engineer) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Soil moisture is highly variable in time and space due to the influence of various edaphoclimatic factors, which makes necessary your sampling to obtain reliable data about soil water content. This study evaluated the soil moisture in irrigated plot belonging the experimental basin of Rio Ipanema, located in the municipality of Pesqueira, semiarid region of Pernambuco State, Brazil, cultivated with banana in spacing of 4 x 4 meters, totaling 200 plants. The study was conducted over dois days, in an area of 6270 m² divided in two sectors, with mulch and without mulch of banana leaves, respectively. The soil moisture was monitored using Falker HidroFarm HFM 1010 units installed on a transect with 11 units spaced 8 meters, in each sector. Monitoring was performed before and after irrigation and data were analyzed using descriptive statistics and the temporal stability by the method of relative differences and Spearman correlation test. The sector without mulch had higher soil moisture at all times monitoring and the water content varied depending on the position of the sensors on the soil. The Spearman correlation coefficients were high, indicating temporal stability, and the technique of relative differences enabled the identification of points in the sample space that approached the soil moisture average throughout the area.

Key-words: monitoring, relative difference, mulching.

1. INTRODUÇÃO

A umidade do solo é um elemento essencial para compreender uma série de processos hidrológicos e climáticos em diferentes escalas espaciais e temporais (HEATHMAN et al., 2009). Do ponto de vista hidrológico, a umidade do solo regula o escoamento superficial, infiltração, armazenamento de água e drenagem. Além disso, ela é essencial no manejo da irrigação e produtividade das culturas, principalmente em áreas onde existe alta demanda evapotranspirativa (SOUZA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2014; HASSAN-ESFAHANI et al., 2015).

Como uma variável climática, a umidade do solo tem papel fundamental na divisão dos fluxos de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera, sendo de suma importância nos estudos de previsão de cheias, da produção agrícola, do balanço de energia, etc. Desempenha, segundo Li et al. (2011), um papel importante nos modelos climáticos, hidrológicos, agrícolas e biogeoquímicos. Vários estudos climáticos, como o realizado por Mohamed et al. (2004), indicam que a circulação atmosférica e a precipitação pluvial são afetadas significativamente pela grande escala da variação da umidade do solo e evaporação.

Em estudos hidrológicos, o solo representa o principal meio de transporte e armazenamento de água. Nas camadas superficiais, os processos relacionados à movimentação da água, como a infiltração, evaporação, drenagem, redistribuição e absorção pelas plantas, ocorrem de forma mais representativa, o que demanda maior compreensão da dinâmica da umidade nesses locais (LIMA et al., 2012).

O conhecimento da umidade do solo, com obtenção de dados de sua variação espacial e temporal, é necessário para a execução e desenvolvimento de modelos hidrológicos e climáticos, bem como na tomada de decisões e elaboração de políticas públicas para manejo dos recursos hídricos (KOSTER et al., 2004; GILL et al., 2007; FELTRIN et al., 2013). No entanto, como a umidade é caracterizada por uma alta variação espaço-temporal, uma das grandes dificuldades ainda presentes nesse tipo de estudo é a limitada capacidade de estimar valores dessa variável em grandes áreas, o que acarreta gastos com a instalação de equipamentos e possibilita a obtenção de informações apenas em pontos previamente selecionados (BROCCA et al., 2010).

Um das formas de contornar esse problema é através da metodologia proposta por Vachaud et al. (1985), que é considerada referência para os estudos de estabilidade

temporal (WAGNER et al., 2008; ÁVILA et al., 2011; SALVADOR et al., 2012). Essa técnica sugere que os padrões espaciais da umidade do solo são persistentes ao longo do tempo, o que remete à ideia de que alguns pontos de monitoramento apresentam valores semelhantes à média total dos pontos monitorados, em qualquer tempo.

Vários trabalhos vêm sendo realizados e apresentando resultados promissores, validando a metodologia, seja em áreas pequenas, de apenas alguns metros quadrados, até grandes bacias hidrográficas com extensas áreas de drenagem (MATÍNEZ-FERNÁNDEZ & CEBALLOS, 2005; COSH et al., 2008; SOUZA et al., 2011; MONTE-MOR et al., 2012; ZHANG & SHAO, 2013; JIA et al., 2013). No entanto, ao trabalhar com monitoramento da umidade, é necessário considerar a sua sensível relação com características de solo, clima, topografia e vegetação, que podem alterar a dinâmica de movimentação, redistribuição e armazenamento (WAGNER et al., 2008; ZHANG & SHAO, 2013), de modo que o conhecimento da influência desses fatores é essencial na seleção de pontos de amostragem representativos para estudos de estabilidade temporal e detecção de possíveis locações de monitoramento estáveis ao longo do tempo (VANDERLINDEN et al., 2011). Nesse sentido, Santos et al. (2010) observaram que a umidade do solo na região semiárida apresenta grande variabilidade no tempo e espaço, em função de diferentes condições de cobertura e propriedades físicas do solo, alertando sobre a necessidade de se conhecer de forma mais detalhada a dinâmica da água nessas regiões.

No que concerne à importância da cobertura vegetal objetivando reduzir as perdas de água no solo, Baver et al. (1973) afirmam que técnicas de cultivo que utilizam diferentes tipos de cobertura na superfície assumem grande importância em regiões tropicais e subtropicais, onde a energia solar que incide diretamente é de grande intensidade. Isso ocorre pelo fato de a cobertura vegetal dissipar, por reflexão, parte dessa energia, diminuindo as perdas de água por evaporação.

A cobertura vegetal é importante não apenas do ponto de vista de perdas de água por evaporação, mas também por escoamento superficial, visto que protege o solo contra o impacto das gotas das chuvas, além de auxiliar com o incremento da fertilidade pela ação da matéria orgânica presente em sua estrutura, trazendo benefícios tanto imediatos quanto a longo prazo (BELTRAME, 1994). Nesse sentido, Santos et al. (2007), em estudo realizado em região semiárida do Pernambuco, visando verificar a influência de diferentes tipos de cobertura sobre o escoamento superficial da água no solo em condições de

campo, detectaram que a cobertura morta reduz a velocidade de enxurrada e aumenta a capacidade de infiltração e retenção de água, com reduções de perdas bastante significativas quando comparadas aos solos com superfície exposta.

Considerando a importância da dinâmica da umidade do solo para a produção agrícola, principalmente em regiões semiáridas, bem como a necessidade de identificar um número reduzido de pontos necessários para a caracterização dessa dinâmica, o objetivo deste estudo foi avaliar a estabilidade temporal e variação da umidade do solo em função da presença de cobertura morta em uma bacia experimental do semiárido Pernambucano, cultivada com banana.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

A coleta de dados aconteceu no período de 27 a 28 de novembro de 2014, na Fazenda Mimosa, localizada no município de Pesqueira, situado no agreste Pernambucano, distante 230 km de Recife – PE, com as seguintes coordenadas geográficas: longitude $-36^{\circ} 87'$, latitude $-8^{\circ} 39'$, e altitude de 645 metros. A região apresenta precipitação total anual média de 730 mm e evapotranspiração potencial anual média de 1683 mm (Montenegro & Montenegro, 2006). De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo BSsh (extremamente quente, semiárido). A área experimental possui 6.270 m² e está atualmente cultivada com banana (*Musa paradisiaca* L.) espaçada em 4 x 4 m, totalizando 200 plantas, irrigadas por aspersão convencional.

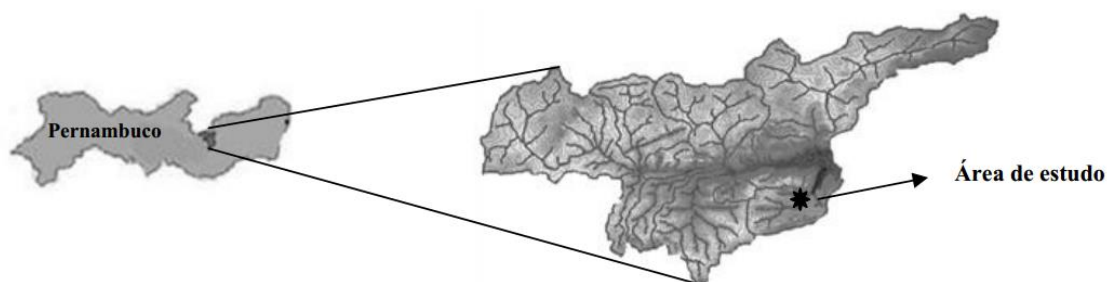


Figura 19. Localização da área de estudo, em Pesqueira – PE.

O solo da área de estudo é caracterizado como Neosolo Flúvico (EMBRAPA, 2013). Baseado no modelo de identificação de classes texturais do perfil do solo (triângulo textural) apresentada por Embrapa (2006), é possível classificar o perfil do solo com textura franco argilo arenosa. As frações granulométricas e propriedades do solo estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7. Valores médios de atributos físico-hidráulicos do solo da área em estudo, em Pesqueira-PE.

Profundidade (m)	Areia	Argila	Silte	Densidade do solo (g cm ⁻³)	Porosidade (cm ³ cm ⁻³)	Condutividade hidráulica (mm h ⁻¹)
0 – 0,20	587,6	240,5	171,9	1,47	0,52	0,183

Para avaliar a influência da cobertura morta composta por folhas de bananeira descartadas após a poda e inseridas ao redor das plantas na data de início da coleta de dados, a área foi dividida em dois setores, cada um contendo 100 plantas (Figura 20). Um

dos setores recebeu a cobertura, depositada ao redor do colo das plantas, formando um círculo com 1 m de raio que cobria a superfície do solo e os sensores de monitoramento de umidade.

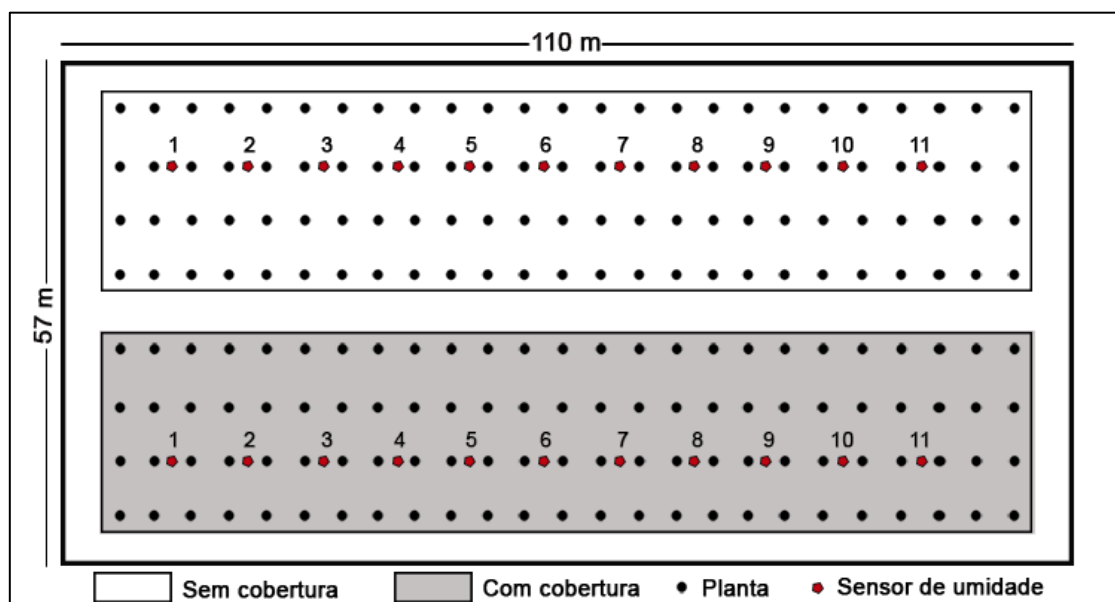


Figura 20. Esquema da área de estudo no município de Pesqueira, com localização dos pontos de amostragem.

2.2. Monitoramento da umidade do solo

A umidade foi monitorada com o uso de sensores FALKER HidroFarm HFM 1010 (Figura 21), que têm a capacidade de fornecer leituras instantâneas, à profundidade e dentro de um diâmetro ativo de 20 cm. Os sensores foram instalados em um transecto, em cada setor (com e sem cobertura), com espaçamento de 8 m, totalizando 22 pontos amostrais que foram colocados a uma distância de 40 cm das plantas, de modo a evitar contato com as raízes e de forma que ficassem localizados próximo à região central da cobertura. As medições foram realizadas antes ($n=3$) e após a irrigação ($n=13$), totalizando 16 momentos de medição ao longo do período de avaliação. As avaliações tiveram início às 09h30 do dia primeiro e foram finalizadas às 13h30 do segundo dia, em intervalos de tempo não regulares.

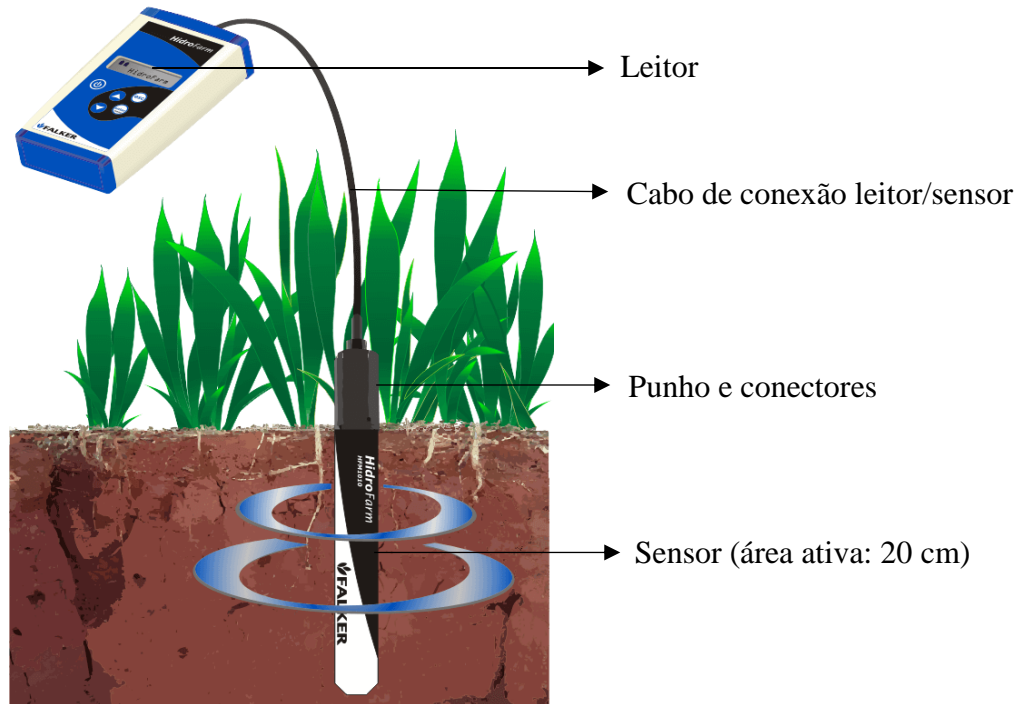


Figura 21. Componentes do Sensor Falker HidroFarm. (Imagem: Fabricante/Falker).

2.3. Análises estatísticas

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos dados, foi realizada a análise estatística descritiva, através da avaliação de medidas de tendência central, dispersão e aderência à distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Para caracterização do grau de variabilidade, foram analisados os valores de coeficiente de variação (CV), conforme sugerido por Warrick & Nielsen (1980), que consideram baixa variabilidade quando $CV < 12\%$, média variabilidade para o intervalo de 12 a 60% e alta para $CV > 60\%$.

Os dados de umidade obtidos nos dois setores foram comparados para verificar qual locação apresentou maior conteúdo de água e a análise de estabilidade temporal seguiu a metodologia proposta por Vachaud et al. (1985), que sugerem duas técnicas. A primeira, conhecida como diferença relativa (DR), faz uma análise dos desvios entre os valores observados individualmente e a média destes, e pode ser obtida pela seguinte equação:

$$DR_{ij}(\theta) = \frac{\theta_{ij} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \times 100 \quad (9)$$

em que DR_{ij} é a diferença relativa média na posição i no tempo j ; θ_{ij} é o valor do conteúdo de água no solo na posição i e no tempo j ; e $\bar{\theta}_j$ é a média do conteúdo de água no solo, em todas as posições, no tempo j . Valores de DR próximos a zero indicam locais que possuem uma média de umidade próxima da média da área, enquanto valores de DR maiores ou menores que zero indicam, respectivamente, uma superestimativa ou subestimativa em relação à média da umidade na área de estudo (MONTE-MOR et al., 2012).

A segunda técnica é o teste de correlação de Spearman, que é empregado como uma ferramenta estatística para indicar o grau de concordância da variabilidade espacial obtida em diferentes pontos. Esse método possibilita identificar a presença de estabilidade temporal, mas não indica quais são os locais de monitoramento que representam a média em toda a área. O coeficiente de correlação de Spearman pode ser obtido pela seguinte equação:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{ij} - R_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (10)$$

onde R_{ij} é a posição ordenada da variável θ_{ij} observada no tempo j no ponto i ; $R_{ij'}$ é a posição da mesma variável observada no tempo j' no ponto i ; e n é o número de pontos de medição.

A metodologia da estabilidade temporal já vem sendo aplicada em muitos estudos ligados à caracterização de propriedades físicas, químicas e hidráulicas de solos, em diferentes condições de clima e topografia, bem como em várias escalas espaciais. A exemplo, tem-se os estudos de Cosh et al. (2008) e Melo & Montenegro (2015). Os primeiros tentaram localizar a presença de locais de monitoramento de umidade estáveis ao longo do tempo, em uma bacia do semiárido do Arizona, EUA. Já os outros, por pouco mais de um ano de monitoramento, objetivaram encontrar pontos estáveis ao longo de uma bacia hidrográfica do semiárido Pernambucano. Mas não apenas em extensas áreas a metodologia pode ser aplicada. Souza et al. (2011), utilizaram com sucesso a técnica proposta por Vachaud em um lote irrigado com banana, com dimensão de 1800 m².

Após a identificação dos pontos que apresentaram estabilidade temporal, foram elaborados gráficos com o intuito de validar o comportamento do ponto escolhido durante

os tempos (horários) de avaliação e comparação dos valores individuais dos pontos com a média geral.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentaram normalidade em todos os instantes, de acordo com o teste de aderência à distribuição Normal de Kolmogorov-Smirnov. Os coeficientes de variação (CV) indicaram média variabilidade, segundo Warrick & Nielsen (1980), que classificam variação média para valores de CV entre 12% e 60%. Para o setor com cobertura, foram encontrados valores médios de 38,79% ($\pm 0,85\%$), ao passo que no setor sem cobertura, a variação média nos pontos de monitoramento foi de 24,07% ($\pm 1,07\%$). Valores de CV semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2011) ao estudarem a variabilidade espacial da umidade também em Neossolo Flúvico cultivado com cenoura no Nordeste Brasileiro, com e sem a utilização de cobertura morta. A Tabela 8 apresenta os resultados de estatística descritiva para umidade do solo, nos dois setores (com e sem cobertura), durante os 16 momentos de observação.

Tabela 8. Estatística descritiva dos dados espaciais de umidade do solo (%) coletados no município de Pesqueira, em cultivo de banana com e sem cobertura morta.

Condição	Momento de medição	Setor											
		Com cobertura						Sem cobertura					
		Média	Mediana	Mín.	Máx.	CV (%)	Dist.	Média	Mediana	Mín.	Máx.	CV (%)	Dist.
Antes da irrigação	1	14,67	17,0	4,6	23,2	43,84	N	25,7	27,1	13,1	34,3	26,42	N
	2	14,74	17,5	4,9	22,3	41,58	N	24,6	26,3	12,6	31,8	26,52	N
	3	13,41	16,9	3,6	20,0	46,04	N	23,8	25,8	11,7	32,5	28,06	N
Após a irrigação	4	15,89	18,6	4,7	22,2	37,69	N	28,5	29,5	16,7	38,3	23,04	N
	5	15,72	18,3	4,5	22,0	38,07	N	27,8	29,0	16,2	36,8	22,95	N
	6	15,38	18,0	4,3	21,5	38,59	N	27,5	28,7	16,0	35,9	22,94	N
	7	14,78	17,2	4,5	21,5	37,48	N	25,8	27,1	13,9	33,1	23,61	N
	8	14,65	17,0	4,2	21,0	39,45	N	26,6	27,6	14,7	34,7	23,69	N
	9	15,25	18,2	4,4	21,5	38,68	N	26,9	28,2	15,1	34,2	23,14	N
	10	14,98	17,9	4,3	21,5	39,77	N	26,2	28,1	14,9	34,3	23,87	N
	11	14,46	17,4	4,1	20,5	39,93	N	25,9	27,7	14,1	34,0	24,72	N
	12	14,97	17,5	4,4	21,2	38,04	N	27,3	30,1	14,1	34,8	25,30	N
	13	14,72	17,6	4,4	20,9	39,09	N	26,2	27,4	14,6	34,8	24,34	N
	14	14,54	17,3	4,8	20,7	38,35	N	25,6	26,6	14,3	32,9	24,36	N
	15	14,19	16,6	4,0	20,3	39,29	N	24,5	26,2	13,8	32,6	24,86	N
	16	13,45	15,8	3,4	18,1	40,08	N	23,1	24,8	11,9	30,3	26,54	N

CV= Coeficiente de variação; N=distribuição Normal

Na Figura 22 estão representados os box-plots com a distribuição espacial e temporal dos dados de umidade obtidos. Para a variabilidade espacial, foram

considerados os dados sensores (n=11) em cada setor para plotagem dos gráficos. No caso da variabilidade espacial, considerou-se os valores de umidade ao longo dos diferentes horários de monitoramento (n=16), também nos dois setores. Segundo Capela & Capela (2012), esse tipo de gráfico permite avaliar a simetria dos dados, sua dispersão e a existência ou não de *outliers* (valores discrepantes), sendo utilizado especialmente com o intuito de comparar dois ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias de uma variável. Nota-se que o setor sem cobertura apresenta uma distribuição de dados mais simétrica quando comparado ao sem cobertura, o que pode ser comprovado ao comparar os valores de média e mediana, que são mais semelhantes.

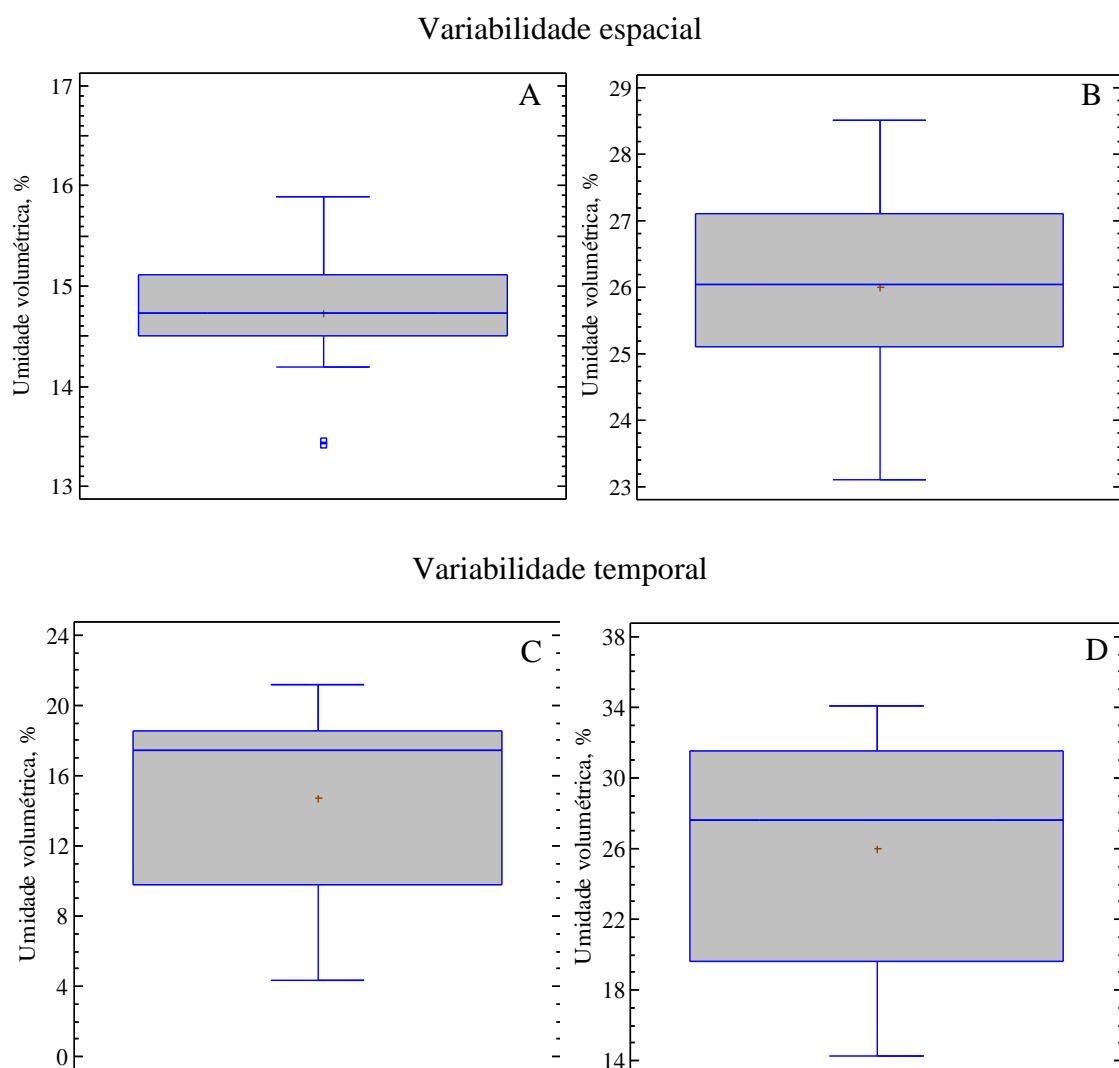


Figura 22. Box-plots para a umidade volumétrica do solo, nos setores com e sem cobertura morta. A; C – com cobertura; B; D – sem cobertura.

A ocorrência de *outliers*, que são valores extremamente altos ou extremamente baixos em relação aos demais observados, pode indicar tanto amostragem inadequada ou incorreta quando uma boa amostragem, com dados válidos, mas que necessitam de

atenção especial. Na situação avaliada, foram encontrados dados discrepantes para a variabilidade espacial de umidade no setor com cobertura, valores extremos de 13,41% e 13,45%.

Quanto à umidade do solo, nos dois setores (Figura 23), observa-se que a área que não recebeu cobertura morta apresentou valores de umidade mais elevados em todas as posições e instantes de monitoramento. Ainda que a cobertura auxilie na redução da evapotranspiração, contribuindo com a manutenção e retenção de água no solo (SINKEVIČIENĖ et al., 2009; RESENDE et al., 2005; KUMAR et al., 2014; ARAGUÉS et al., 2014), o material pode ter interceptado a água oriunda dos aspersores e atuado como uma barreira. Assim, parte da água pode ter sido evaporada antes de entrar em contato com a superfície do solo ou mesmo não houve tempo suficiente para que ela entrasse em contato com este, o que não ocorreu no setor sem cobertura vegetal, onde a água incidiu diretamente sobre a superfície, incrementando a umidade mais rapidamente. Durante o período de coleta de dados não houve precipitação, de modo que o aumento do conteúdo de água no solo deve-se apenas à irrigação realizada às 7h20 do segundo dia de monitoramento.

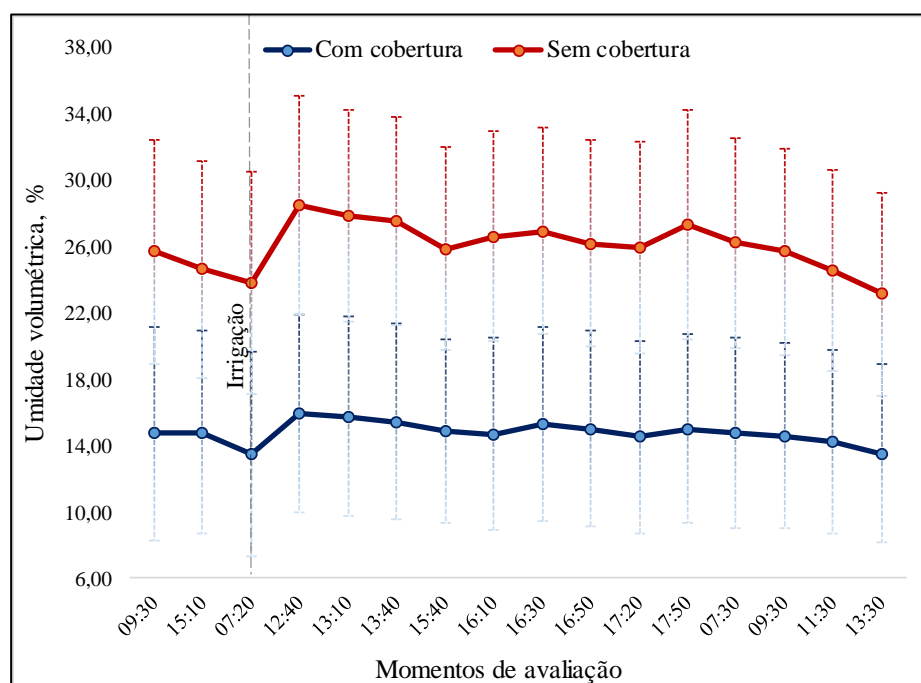


Figura 23. Comparação entre a umidade volumétrica média (%) no solo nos setores com cobertura e sem cobertura morta, em todos os horários de monitoramento.

A umidade sofreu acréscimo significativo após evento de irrigação, realizado a partir da terceira avaliação (07:20 h), atingindo picos que foram reduzindo lentamente ao

longo da tarde e no dia seguinte, onde não houve mais aplicação de lâmina até o final do monitoramento. Esse é um comportamento normal, visto que, nas camadas superficiais, os processos relacionados à movimentação da água, como a infiltração, evaporação, drenagem, redistribuição e absorção pelas plantas ocorrem de forma mais intensa, o que ocasiona redução e alteração no conteúdo de água (LIMA et al., 2012). Além disso, houve significativa variação entre os sensores (Figura 24), possivelmente relacionada à granulometria do solo, que apresenta variações, com incremento nos teores de argila em um sentido da área experimental. Melo & Montenegro (2015), avaliando o comportamento espacial e temporal da umidade em escala de bacia hidrográfica, identificaram a sensível relação da umidade com o tipo de solo e a cobertura vegetal, evidenciando variações na dinâmica da água, tanto em épocas secas quanto em estações chuvosas, com valores médios de umidade mais elevados em solos mais argilosos.

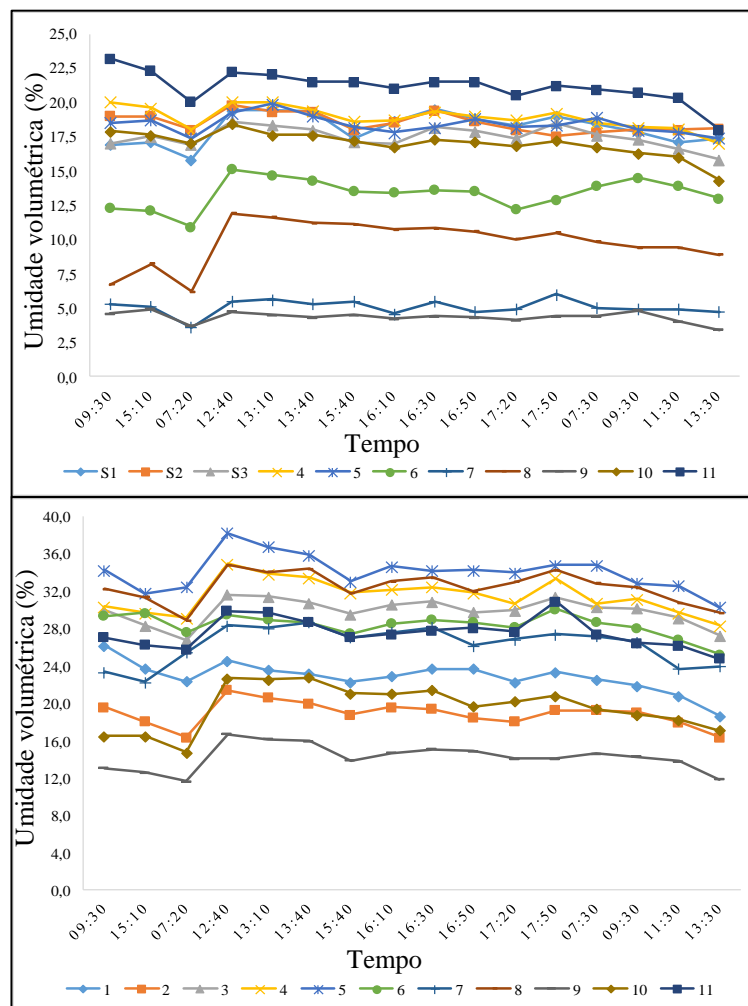


Figura 24. Comparação entre a umidade no solo nos setores com cobertura (A) e sem cobertura morta (B), nos diferentes pontos (sensores) e instantes de medição.

No que concerne à relação existente entre o coeficiente de variação (CV) e a umidade do solo, Chen et al. (2010), estudando a dinâmica da umidade em uma área declivosa no sudoeste da China, identificaram que os valores de CV se mostraram flutuantes do longo do tempo e espaço. Na Figura 25 está representada a relação entre CV e umidade volumétrica média do solo, temporalmente e espacialmente. Assim como identificado por Chen et al. (2010), valores de umidade mais elevados estão geralmente associados a coeficientes de variação menores, o que sugere que os valores de CV tendem a decrescer com o incremento do conteúdo de água.

Essa relação é importante do ponto de vista agrícola, pois demonstra que, quanto maior for o conteúdo de água no solo, mais uniforme é a sua distribuição, com menores desvios e variação tanto no espaço quanto no tempo. Conforme a umidade vai reduzindo por fatores diversos, essas variações no conteúdo de água vão se tornando mais expressivas, o que pode interferir em práticas de manejo da cultura, principalmente ligadas à irrigação.

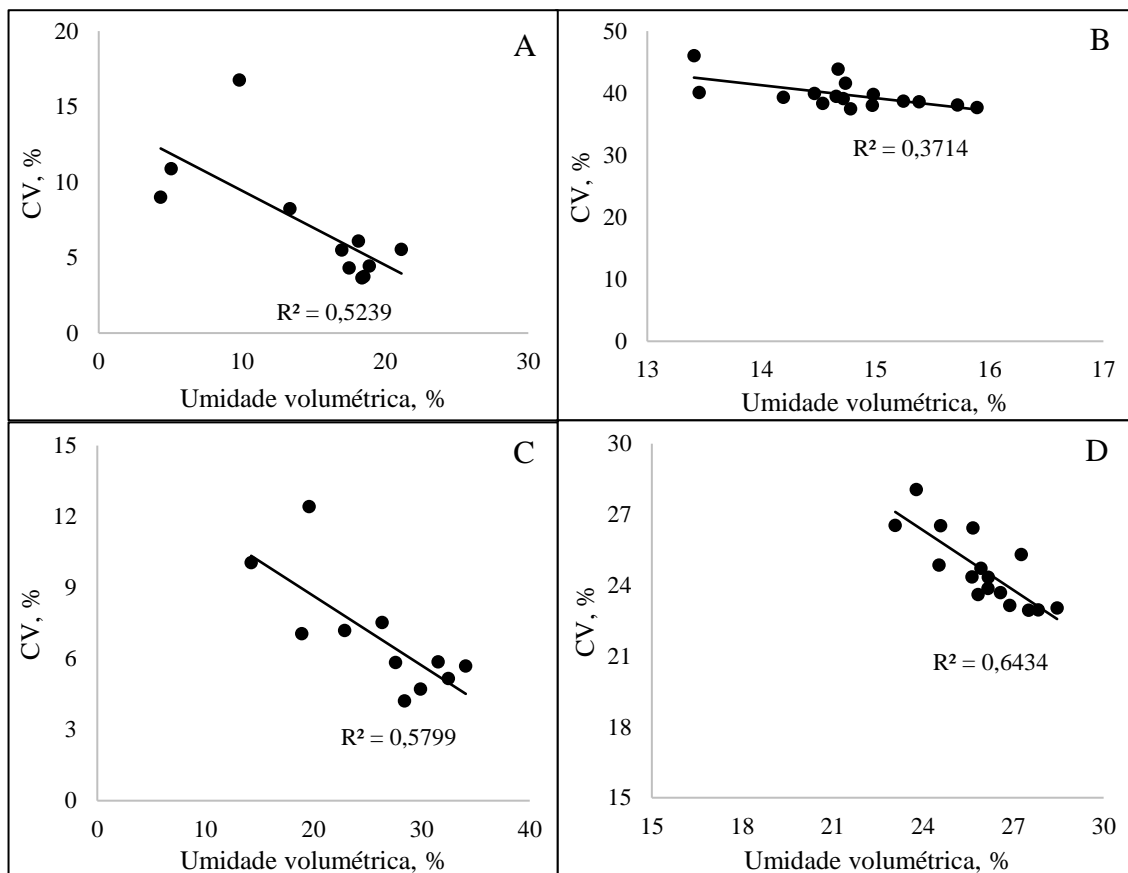


Figura 25. Relação linear entre coeficiente de variação (CV) e umidade do solo, no setor com cobertura, temporalmente (A) e espacialmente (B), e no setor sem cobertura, temporalmente (C) e espacialmente (D).

Nas tabelas 9 e 10 estão representados os coeficientes de correlação de Spearman para o conteúdo de água no solo, em todos os horários de monitoramento e para os dois setores. A maioria dos coeficientes obtidos estão próximos de 1, sendo bastante elevados e com correlação significativa a 0,05 de probabilidade (StatSoft. Inc, 2001), indicando a possível existência de estabilidade temporal. O menor coeficiente de correlação foi 0,81, no setor com cobertura ($p < 0,05$). Assim, todos os intervalos de monitoramento apresentaram uma correlação significativa para os setores estudados. Resultados semelhantes foram observados por Gonçalves et al. (1999) ao avaliar a estabilidade temporal da umidade em área irrigada por pivô central, onde os valores de coeficientes de correlação tenderam a aumentar com o decorrer das avaliações. Souza et al. (2011), trabalhando em área próxima na mesma região e com as mesmas condições climáticas, também notaram essa característica natural de as correlações se tornarem mais fortes com o tempo.

Tabela 9. Coeficientes de correlação da umidade do solo entre os horários de monitoramento para o setor sem cobertura morta.

HORÁRIO	09:30	15:10	07:20	12:40	13:10	13:40	15:40	16:10	16:30	16:50	17:20	17:50	07:30	09:30	11:30	13:30
09:30	1,000	0,984	0,973	0,964	0,973	0,963	0,966	0,964	0,964	0,982	0,982	0,973	0,982	0,973	0,982	0,982
15:10		1,000	0,975	0,929	0,943	0,933	0,945	0,948	0,948	0,966	0,966	0,943	0,966	0,957	0,966	0,966
07:20			1,000	0,964	0,955	0,954	0,980	0,964	0,964	0,973	0,973	0,955	0,973	0,973	0,973	0,973
12:40				1,000	0,991	0,982	0,984	0,964	0,964	0,982	0,982	0,991	0,982	0,955	0,982	0,982
13:10					1,000	0,991	0,975	0,973	0,973	0,991	0,991	1,000	0,991	0,964	0,991	0,991
13:40						1,000	0,984	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,982	0,991	0,991
15:40							1,000	0,989	0,989	0,989	0,989	0,975	0,989	0,980	0,989	0,989
16:10								1,000	1,000	0,991	0,991	0,973	0,991	0,991	0,991	0,991
16:30									1,000	0,991	0,991	0,973	0,991	0,991	0,991	0,991
16:50										1,000	1,000	0,991	1,000	0,982	1,000	1,000
17:20											1,000	0,991	1,000	0,982	1,000	1,000
17:50												1,000	0,991	0,964	0,991	0,991
07:30													1,000	0,982	1,000	1,000
09:30														1,000	0,982	0,982
11:30															1,000	1,000
13:30																1,000

Tabela 10. Coeficientes de correlação da umidade do solo entre os horários de monitoramento para o setor com cobertura morta.

HORÁRIO	09:30	15:10	07:20	12:40	13:10	13:40	15:40	16:10	16:30	16:50	17:20	17:50	07:30	09:30	11:30	13:30
09:30	1,000	1,000	0,989	0,936	0,918	0,920	0,964	0,900	0,838	0,907	0,891	0,845	0,900	0,961	0,964	0,861
15:10		1,000	0,989	0,936	0,918	0,920	0,964	0,900	0,838	0,907	0,891	0,845	0,900	0,961	0,964	0,861
07:20			1,000	0,925	0,897	0,906	0,948	0,884	0,836	0,886	0,870	0,820	0,884	0,947	0,952	0,872
12:40				1,000	0,964	0,998	0,964	0,991	0,961	0,970	0,973	0,936	0,936	0,984	0,991	0,925
13:10					1,000	0,970	0,982	0,973	0,916	0,998	0,991	0,955	0,991	0,984	0,973	0,879
13:40						1,000	0,961	0,998	0,968	0,979	0,984	0,952	0,943	0,979	0,984	0,916
15:40							1,000	0,955	0,893	0,975	0,964	0,900	0,973	0,989	0,982	0,893
16:10								1,000	0,970	0,984	0,991	0,964	0,945	0,970	0,973	0,902
16:30									1,000	0,934	0,948	0,925	0,902	0,920	0,929	0,943
16:50										1,000	0,998	0,966	0,984	0,979	0,970	0,881
17:20											1,000	0,973	0,973	0,970	0,964	0,879
17:50												1,000	0,927	0,925	0,918	0,811
07:30													1,000	0,970	0,955	0,893
09:30														1,000	0,998	0,916
11:30															1,000	0,925
13:30																1,000

Quanto à estabilidade temporal, a Figura 26 apresenta as diferenças relativas e os respectivos desvios-padrão, para as áreas com e sem cobertura. Esses dados permitem visualizar qual ou quais pontos de monitoramento mais se aproximam da média da umidade em toda a área de estudo, sendo possíveis de serem escolhidos como referência amostral (MELO FILHO & LIBARDI, 2005; SOUZA et al., 2011). Na área com cobertura, o ponto de medição que apresentou a DR mais próxima de zero foi o 6, com valor de $-7,47 (\pm 4,43\%)$. Para o setor sem cobertura, o ponto mais representativo foi o 7, com DR de $2,40 (\pm 2,54\%)$. Assim como os pontos que mais se aproximaram da média, a DR também permite estimar aqueles locais que subestimam ou superestimam a umidade. Neste caso, os pontos que mais se afastaram da média da umidade foram o 7 e o 9, com valores de DR e desvio padrão de $-65,24 (\pm 2,28\%)$ e $-44,4 (\pm 2,27\%)$, para os setores com e sem cobertura, respectivamente.

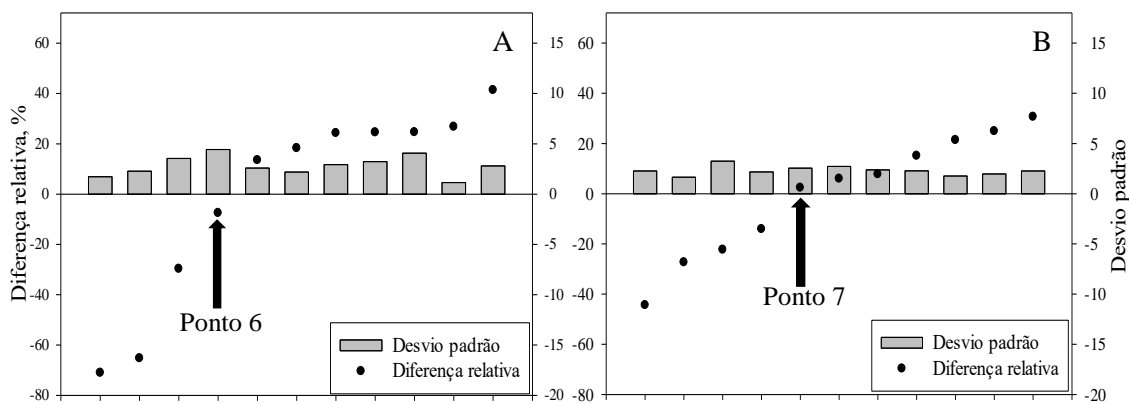


Figura 26. Diferença relativa média e desvio-padrão para a umidade do solo nos setores com (A) e sem cobertura morta (B). Valores em destaque indicam os pontos que mais se aproximaram e se afastaram da média em qualquer tempo.

Salvador et al. (2012), trabalhando em uma área de 1500 m² cultivada com feijão e aveia-preta em alternância, com malha regular de 60 pontos espaçados entre si em 5 m, encontraram valores semelhantes de desvios-padrão, assim como Souza et al. (2011) ao avaliar a estabilidade temporal em cultivo de cenoura com e sem cobertura morta, nas mesmas condições de clima e solo, com valores de DR de -0,28 ($\pm 2,86\%$) para o setor sem cobertura e 0,21 ($\pm 3,69\%$) para o setor com cobertura. Os valores de DR mais próximos de zero podem ter sido favorecidos pela maior quantidade de avaliações ao longo do tempo, realizadas pelo período de 94 dias. Já para os pontos que mais subestimaram ou superestimaram a média da umidade, valores mais discrepantes de DR foram encontrados, com médias de -32,55 ($\pm 16,90\%$) e 17,64 ($\pm 4,67\%$), no setor que não recebeu o resíduo. Vale destacar que, segundo Vachaud et al. (1985), o ponto a ser escolhido para futuras observações deve ser o que apresentar DR igual ou muito próxima a zero, associada a um baixo desvio-padrão.

Após a identificação dos locais que melhor representaram o padrão da umidade ao longo do tempo, foram plotados gráficos comparativos (Figura 27), com o ponto que apresentou DR mais próxima de zero e menor desvio-padrão, visando validar os resultados obtidos com a técnica das diferenças relativas. O setor com cobertura obteve uma média de umidade levemente distante do ponto identificado como mais estável ao longo do tempo, ao passo que o setor sem cobertura obteve valores mais semelhantes em todos os horários, indicando que a metodologia proposta por Vachaud et al. (1985) pode ser utilizada na área, fornecendo resultados ainda mais precisos aumentando-se o intervalo temporal entre os monitoramentos, de modo a englobar condições mais distintas de umidade.

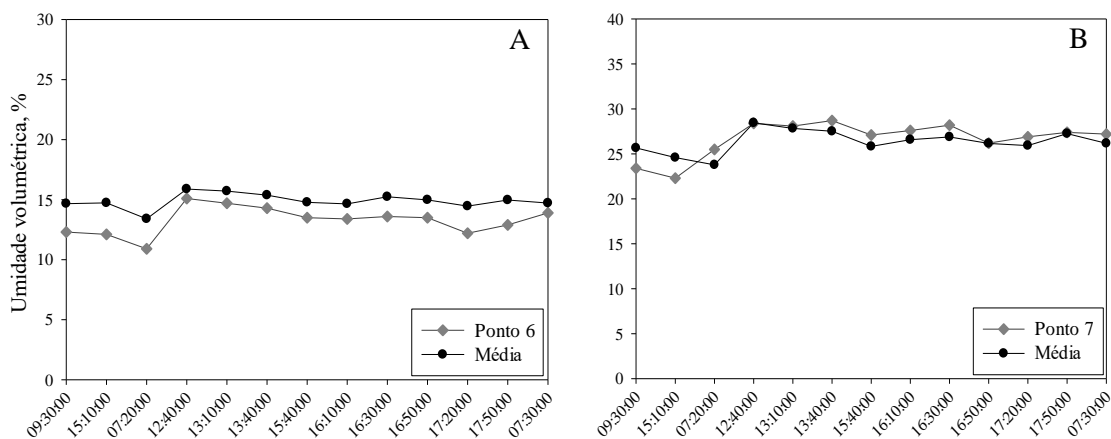


Figura 27. Comparação entre os teores médios de umidade no solo e os teores de umidade nas posições com estabilidade temporal nos horários de amostragem, nos setores com (A) e sem cobertura (B).

A identificação de um ponto de monitoramento estável ao longo do tempo tem importância primordial no manejo da irrigação. Sendo assim, no setor sem cobertura, o ponto 7, identificado como estável temporalmente, pode ser utilizado como referência amostral para coleta de dados de umidade na área, reduzindo o tempo de monitoramento e evitando gastos com a manutenção dos outros sensores, que podem ser utilizados para outras finalidades. No caso do setor com cobertura, apesar do comportamento similar, o ponto mais próximo da estabilidade temporal apresenta leve tendência de subestimar os dados de umidade, gerando desvios quanto à média da umidade representativa da área.

4. CONCLUSÕES

1. A umidade do solo variou em função da cobertura morta, apresentando valores mais elevados nos locais onde não houve aplicação do resíduo;
2. A utilização da cobertura morta deve levar em conta o tipo de resíduo e o sistema de irrigação implantado, considerado a forma de lançamento e distribuição de água, que pode ser interceptada ou não pela superfície da cobertura, dificultando o contato com a superfície do solo;
3. A metodologia das diferenças relativas e do teste correlação de Spearman mostraram-se promissoras para a localização de pontos amostrais com estabilidade temporal, especialmente na condição com ausência de cobertura, evidenciando a

importância da execução de trabalhos utilizando a técnica, de modo que sejam reduzidos gastos com a instalação de equipamentos e otimizado o tempo com o monitoramento.

5. REFERÊNCIAS

- ARAGUÉS, R.; MEDINA, E.T.; CLAVERÍA, I. Effectiveness of inorganic and organic mulching for soil salinity and sodicity control in a grapevine orchard drip-irrigated with moderately saline waters. **Span J Agric Res** (2014) 12(2): 501-508.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:1801-1810, 2011.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARNDER, W. R. **Física de Suelos**. 1. ed. México: U.T.E.H.A. , 1972, cap. 7: Régimen térmico de los suelos. p. 267-298. 1973.
- BELTRAME, A. DA V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 112 p., 1994.
- BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. **Water Resources Research**, vol. 46, W02516, doi:10.1029/2009WR008016, 2010.
- COSH, M. H.; JACKSON, T. J.; MORAN, S.; BINDLISH, R. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed. **Remote Sensing of Environment** 112, 304–313, 2008.
- EMBRAPA – **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3º Ed. rev. Ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- FELTRIN, R. M.; FELTRIN, R. M.; PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D; SARI, V.; BRITES, L. S. Seasonal variation in soil water content for forest and pasture in southern Brazil. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Transactions, v. 56, p., 2013.
- GILL, K.; KEMBLOWSKI, M.; MCKEE, M. Soil moisture data assimilation using support vector machines and ensemble Kalman filter. **JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.**, 43, 1004–1015. 2007.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:155-164, 1999.
- HASSAN-ESFAHANI, L.; TORRES-RUA, A.; JESSEN, A.; McKEE, M. Assessment of Surface Soil Moisture Using High-Resolution Multi-Spectral Imagery and Artificial Neural Networks. **Remote Sens**, 7, 2627-2646. 2015.
- HEATHMAN, G. C., LAROSE, M., COSH, M. H., BINDLISH, R. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA. **Catena** 78, 159–169. 2009.
- KOSTER, R. D. et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation, **Science**, 305(5687), 1138–1140, doi:10.1126/science. 1100217. 2004.
- KUMAR, R.; SOOD, S.; SHARMA, S.; KASANA, R. C.; PATHANIA, V. L.; SINGH, B.; SINGH, R. D. Effect of plant spacing and organic mulch on growth, yield and quality of natural sweetener plant Stevia and soil fertility in western Himalayas. **International Journal of Plant Production** 8 (3), July 2014.

- LI, Q., ZHONG, R., HUANG, J., GONG, H. Comparison of two retrieval methods with combined passive and active microwave remote sensing observations for soil moisture. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, p. 1181–1193, 2011.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; KOIDE, S.; SANTOS, R. M. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de latossolos do cerrado em condições de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17 n.1 - Jan/Mar 2012, 23-32.
- MATÍNEZ-FERNÁNDES, J.; CEBALLOS, A. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. **Journal of Hydrology**, vol. 312, Issues 1–4, 10, pages 28–38, 2005.
- MELO FILHO, J.F. & LIBARDI, P.L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transecção. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, 29:497-506, 2005.
- MELO, R. O.; MONTENEGRO, A. A. A. Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 20 no .2 Porto Alegre abr./jun. 2015 p. 430 – 441.
- MOHAMED, Y. A., BASTIAANSEN, W. G. M., SAVENIJE, H. H. G. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. **Hydrol.**, v. 289, p. 145-164, 2004.
- MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R.; PINTO, E. J. A.; LIMA, J. E. S. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em uma bacia intermitente no semiárido de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 17 n.3, 101-113, Jul/Set 2012.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** vol.10, no.1. Campina Grande, 2006.
- OLIVEIRA, R. C.; CUNHA, F. N.; SILVA, N. F.; IORI, P.; TEIXEIRA, M. B.; COELHO, R. D. Spatial variation in soil subsurface drip irrigation in cane sugar. **Academic Journals**, vol. 9(44), pp. 3291-3299, 2014.
- RESENDE, F. V.; SOUZA, L. S.; OLIVEIRA, P. S. R.; GUALBERTO, R. Uso de cobertura morta vegetal no controle da umidade e temperatura do solo, na incidência de plantas invasoras e na produção da cenoura em cultivo de verão. **Ciênc. agrotec.** vol.29 no.1 Lavras Jan./Feb. 2005
- SALVADOR, M. M. S.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; MOREIRA, N. B. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da distribuição da armazenagem de água no solo numa sucessão feijão/aveia-preta. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.36, n.5, pp, 2012.
- SALVADOR, M. M. S.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; MOREIRA, M. B. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da distribuição da armazenagem de água no solo numa sucessão feijão/aveia-preta. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:1434-1447, 2012.
- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JUNIOR, V. P.; SILVA, J. J. N. **Efeito do manejo do solo na contenção do escoamento superficial no semiárido**. In...: 6o. Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva Belo Horizonte, MG, 09-12 de julho de 2007.

- SILVA, A. N.; MONTENEGRO, A. A. A.; MOURA, G. B. A. Efeito das mudanças climáticas no armazenamento de água em diferentes solos do agreste pernambucano. In: **SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, 9., 2008. Salvador. Anais... Salvador: ABRH, 2008. CD-ROM.
- SINKEVIČIENĖ, A.; JODAGIENĖ, D.; PUPALIENĖ, R.; URBONIENĖ, M. The influence of organic mulches on soil properties and crop yield. **Agronomy Research** 7(Special issue I), 485–491, 2009.
- SOUZA, E. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G.; MATOS, J. A. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 99, 26– 32. 2011.
- STATSOFT, 2001. STATISTICA: Data Analysis Software System. Version 6. [S. L.]. Timm, L.C., Pires, L.F., Roveratti, R., Arthur, R.C.J., Reichardt, K., Oliveira, J.C.M., Bacchi, O.O.S., 2006. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Sci. Agricola** 63, 55–64.
- VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 49, 822–828, 1985.
- VANDERLINDEN, K., VERECKEN, H., HARDELAUF, H., HERBST, M., MARTÍNEZ, G., COSH, M.H., PACHEPSKY, Y.A., 2011. Temporal stability of soil water contents: a review of data and analyses. **Vadose Zone J**, 11(4), 2012.
- WAGNER, W. et al. temporal stability of soil moisture and radar backscatter observed by the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). **Sensors**, 8, 1174-1197, 2008.
- ZHANG, P.; SHAO, M. Temporal stability of surface soil moisture in a desert área of northwestern China. **Journal of Hydrology** 505, 91–101, 2013.
- CAPELA, M. V.; CAPELA, J. M. V. **Elaboração de Gráficos Box-Plot em Planilhas de Cálculo**. Anais do I Congresso de Matemática Aplicada e Computacional da Região Sudeste – ICMAC Sudeste. 2012.
- CHEN H.S., ZHANG W., WANG K.L., FU W. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China. **Environ Earth Sci.**2010; 61:1105–1111. doi: 10.1007/s12665-009-0428-3.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escassez de estudos em regiões semiáridas ainda é um fator limitante ao entendimento da dinâmica dos processos hidrológicos nessas regiões. Levando em conta a irregularidade das precipitações e sua má distribuição temporal, é importante conhecer o máximo de informações possível acerca do ciclo hidrológico, visando gerir de maneira mais eficiente e adequada os recursos hídricos nesses locais.

Esse estudo possibilitou entender a dinâmica da umidade do solo durante período com escassez de chuvas e a sua relação com atributos de solo e vegetação, atividade importante para auxiliar no planejamento e execução de práticas que possam potencializar o uso da água. É necessário compreender que a tomada de decisões torna-se mais precisa quanto maior for a quantidade de informação disponível. Assim, trabalhar com coletas de dados de forma regular e constante é fundamental para enriquecer os dados da rede de monitoramento da região.

Além da importância do ponto de vista especial, a umidade do solo requer atenção quanto ao seu comportamento temporal, sendo assim, estudos ligados à estabilidade e persistência temporal da umidade do solo tornam-se cada vez mais comuns, tanto em macro (bacias hidrográficas) quanto em microescala (pequenas e médias áreas produtoras). Assim, considerando que na região semiárida do Nordeste Brasileiro ainda há presença marcante de pequenas áreas cultivadas esporadicamente, e levando em conta que a disponibilidade de recursos financeiros por vezes pode ser fator limitante ao manejo da produção, estudos desse tipo são essenciais na redução de custos e mão-de-obra, trazendo resultados de grande relevância ao produtor, especialmente no que concerne ao manejo da irrigação. Além desse benefício, essas informações possuem importância ambiental, visto que favorecem o correto uso da água e auxiliam na redução do uso indevido deste recurso.