

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – DEAGRI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

JOSÉ ROBERTO LOPES DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA DOS PROCESSOS  
HIDROLÓGICOS E SEDIMENTOLÓGICOS EM ESCALA DE  
PARCELA NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO**

RECIFE-PE  
2015

JOSÉ ROBERTO LOPES DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA DOS PROCESSOS  
HIDROLÓGICOS E SEDIMENTOLÓGICOS EM ESCALA DE  
PARCELA NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Engenharia de Água e Solo.

<http://www.pgea.ufrpe.br/>

**Orientador:** Prof. Ph.D. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

**Co-Orientador:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>.Sc. Thais Emanuelle Monteiro dos Santos

RECIFE, PE, BRASIL  
2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

S586i Silva, José Roberto Lopes da  
Investigação da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela no semiárido de Pernambuco / José Roberto Lopes da Silva. -- Recife, 2015.  
129 f. : il.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.  
Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, 2015.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Dinâmica de umidade 2. Estabilidade temporal 3. Conservação do solo 4. Modelagem hidrológica 5. Dinâmica de temperatura no solo I. Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção, orientador  
II. Título

CDD 631

JOSÉ ROBERTO LOPES DA SILVA

INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS E  
SEDIMENTOLÓGICOS EM ESCALA DE PARCELA NO SEMIÁRIDO DE  
PERNAMBUCO

Tese defendida e aprovada em 28 de Julho de 2015 pela banca examinadora:

---

Profº Abelardo A.A. Montenegro (orientador)

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

---

Profº Edivan Rodrigues de Souza

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

---

Profº Ênio Farias de França e Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

---

Profº João Audifax César de Albuquerque Filho

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

---

Profº Jorge Enoch Furquim Werneck Lima

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Cerrados

## DEDICO

Aos meus verdadeiros orientadores “minha mãe Doralice Guedes que está sempre presente, apoiando e dando força para superar os obstáculos da vida, e em memória ao meu pai Raimundo Lopes, que mesmo na ausência física, se faz presente de forma espiritual todos os dias, sendo sempre um referencial na  
minha vida”

À minha querida e amada esposa Mary, que compreendeu e me apoiou nas diversas viagens de campo, madrugadas, feriados e fins de semana que fiquei trabalhando e não pude dar a total atenção, e a minha filha Regininha, que me enche de energia e alegria com apenas um sorriso, que me fortalece com apenas  
uma palavra “papai”

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”*

*(Marthin Luther King)*

*“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”*

*(George Bernard Shaw)*

## **AGRADECIMENTOS**

Desejo primeiramente agradecer a Deus por sempre iluminar meus caminhos e estar sempre presente na minha vida.

Aos meus pais “Raimundo e Doralice” pelos ensinamentos, educação, pelo apoio nos momentos difíceis e exemplo de vida.

Às minhas irmãs, Rosimere e Rosely pela confiança depositada, respeito e companheirismo de irmãos.

Aos sogros Abílio e Mônica pelos momentos em família. Aos cunhados Leandro, Pedro e Deyse, pelo respeito e amizade. Aos sobrinhos David, José, Rayssa, Pietro e Melissa “nova integrante” pelo carinho recíproco.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida.

Ao coordenador Mario Rolim, e aos professores do programa de pós-graduação que fizeram parte da minha formação.

Aos amigos e colegas de pós-graduação pelos momentos de alegria, descontração, aprendizagem em grupo e confraternização.

À CAPES/CNPq, pela bolsa concedida durante o curso.

À FINEP/REHIDRO pelo apoio financeiro ao Projeto “Estudos Hidrológicos e Sedimentológicos em Bacias Experimentais e Representativas do Semiárido e Cerrado” que custeou parte das atividades de campo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro ao Projeto “Conservação de Água e Solo e difusão de Tecnologias para Convivência com o Semiárido”, Edital MCT-INSA/CNPq-CTHIDRO, que custeou parte dos trabalhos de campo.

Às pessoas que fazem parte do grupo de pesquisa do Laboratório de Água e Solo (LABAS) que participaram direta ou indiretamente, e que de certa forma acabam sendo uma segunda família pelo convívio cotidiano, pelos trabalhos de campo, de laboratório e produção científica. Pelos momentos de companheirismo, troca de experiências, estresse, aprendizagem e descontração. (Prof<sup>o</sup> Abelardo Montenegro, Adriana Guedes, Adriano Normandia, Prof<sup>a</sup> Ana Marinho, Carlyne Andrade, Carollyna Fragoso, Célia Silva, Cleene Agostinho, Daniella Pereira, Fred Mikhail, João Loreto, Liliane Pinheiro, Mariana Lima, Myrta Stherphanny, Renato Augusto, Roberta Queiroz, Robertson Fontes, Thayná Almeida, Sonny Mateus, Valdemir Junior, Vânia Israel). E antigos integrantes que também fizeram parte (Adriana Figueiredo, Eduardo Silva, Henrique Vasconcelos, Laiana Maia, Lilian Danielle, Júlio José, Paulo Duarte, Rogério Melo, Thais Farias).

Agradeço em especial a Edivaldo Ferreira “meu amigo Bira”, pelo apoio nos trabalhos de campo e coletas dos eventos de chuvas, sendo uma pessoa fundamental para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao senhor Malaquias pela disponibilidade da área experimental, e pelo apoio nos trabalhos de campo.

Agradeço em especial ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Abelardo Montenegro pela oportunidade, incentivo, confiança depositada e orientação durante o processo construtivo dessa Tese, até a conclusão da mesma.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo com destaque para unidade experimental investigada.....	29
Figura 2. Mapa de solos da Bacia Representativa do Alto Ipanema, com delimitação da Bacia do Mimoso (Fonte: adaptada da EMBRAPA, 2000) .....	30
Figura 3. Vista parcial de uma unidade experimental no momento de sua instalação em 2009 .....	31
Figura 4. Vista parcial das diferentes condições de coberturas das parcelas de erosão .	32
Figura 5. Vista da instrumentação utilizada para monitoramento das variáveis meteorológicas, (A) estação climatológica; (B) pluviômetro automático.....	37
Figura 6. Vista parcial do sistema de coleta de dados, vertedor para medição de vazão e caixa de coleta de enxurrada após um evento erosivo em março de 2012 .....	39
Figura 7. Vista parcial da área e representação esquemática do processo de monitoramento: sensores termopares, câmera infravermelha, condições de cobertura do solo (palha seca de capim-elefante, folhas secas de cajueiro e pó de coco) em estruturas móveis.....	41
Figura 8. (A) Monitoramento da umidade do solo através de sonda de nêutrons; (B) vista parcial da instalação de sonda TDR e (C) croqui da parcela com disposição dos tubos de acesso para leitura da sonda de nêutrons.....	42
Figura 9. Curva característica do Argissolo Amarelo Distrófico típico .....	47
Figura 10. Distribuição do total mensal de chuva na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	52
Figura 11. Variabilidade temporal da radiação solar diária na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	53
Figura 12. Variação temporal da velocidade do vento média diária na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	54
Figura 13. Variação da temperatura do ar média diária ao longo do tempo na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	55
Figura 14. Variação da umidade relativa do ar ao longo do tempo na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	56
Figura 15. Correlação entre as variáveis meteorológicas; (A) umidade relativa x Temperatura; (B) umidade relativa x radiação solar; e (C) radiação solar x temperatura	

na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	57
Figura 16. Variação temporal da evapotranspiração de referência diária na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	58
Figura 17. Correlação entre da evapotranspiração de referência com a umidade relativa (A), radiação solar (B) e com a temperatura (C) na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 .....	60
Figura 18. Resposta do escoamento superficial em relação à precipitação para as diferentes condições de cobertura do solo estudado.....	61
Figura 19. Concentração de Sedimento (A); e Produção de Sedimento Total (B) em resposta ao escoamento superficial por evento de chuva para as diferentes condições de coberturas de solo estudadas.....	63
Figura 20. Discretização dos eventos de chuva acumulado a cada 5 minutos nos dias 14 e 19 de março de 2013 .....	65
Figura 21. Resposta de nível no vertedor no final da parcela descoberta, dia 14/03/2013 (A) e 19/03/2013 (B) .....	67
Figura 22. Correlação entre a precipitação e escoamento superficial, (A) Parcela com Cobertura Natural; (B) Parcela Descoberta; (C) Parcela com Cobertura Morta e (D) Parcela com Barramento de Palma.....	69
Figura 23. Correlação entre os escoamentos; (A) Parcela com Cobertura Natural x Parcela Descoberta; (B) Parcela com Cobertura Morta x Parcela Descoberta; e (C) Parcela com Barramento de Palma x Parcela Descoberta .....	71
Figura 24. Temperatura da superfície do solo registrada pelos sensores termopares no período de 31/10/2014 a 04/11/2014 para as diferentes condições de cobertura: capim elefante seco ao ar (A), folhas secas de cajueiro (B) e pó de coco (C) .....	72
Figura 25. Variação média diária da temperatura de superfície do solo das diferentes condições de cobertura morta em relação ao solo descoberto registrada pelo termopar no período diurno e noturno .....	74
Figura 26. Box plot dos dados de temperatura da superfície do solo registrado pelo termopar para as diferentes condições de cobertura e quantidades .....	75
Figura 27. Termogramas da superfície do solo para as diferentes condições de cobertura do solo, registrados às 10h e 14h.....	76

Figura 28. Variação diária da diferença entre a temperatura da superfície do solo coberto com as diferentes coberturas ( $T_{MS}$ ) e temperatura da superfície do solo para a condição do solo descoberto ( $T_{BS}$ ). Os dados (média espacial) foram extraídos a partir dos termogramas .....	78
Figura 29. Dinâmica temporal de umidade do solo nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm no Argissolo Amarelo Distrófico típico, para condições de parcela descoberta (PD), parcela com cobertura morta (PCM), parcela com barramento de palma (PBP) e parcela com cobertura natural (PCN) por meio de sonda de nêutrons no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014.....	80
Figura 30. Variação diária da umidade do solo das diferentes condições de cobertura na profundidade de 20 cm, medida por TDR no ano de 2014.....	83
Figura 31. Análise de estabilidade temporal da umidade do solo nas diferentes camadas e coberturas, através da diferença relativa média no tempo e seus respectivos desvios padrão máximo e mínimo .....	85
Figura 32. Correlação entre os dados de umidade do solo dos pontos estáveis e da média dos demais pontos para diferentes coberturas e profundidades.....	88
Figura 33. Umidade do solo média diária em cada mês para diferentes condições de cobertura estimada através de sonda TDR durante o período de 2011 a 2014.....	89
Figura 34. Precipitação e evapotranspiração de referência diária .....	92
Figura 35. Dinâmica de umidade da parcela com cobertura natural (PCN) e solo descoberto (PD) medidas pela TDR .....	94
Figura 36. Comparação entre os valores de umidade do solo medida e simulada no ano de 2012 na profundidade de 20 cm; (A) Parcela de Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta .....	96
Figura 37. Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados para o ano de 2012; (A) Parcela com Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta .....	96
Figura 38. Comparação entre os valores de umidade do solo medida e simulada no ano de 2013 na profundidade de 20 cm; (A) Parcela de Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta .....	97
Figura 39. Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados para o ano de 2013; (A) Parcela com Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Característica física e hidráulica do Argissolo Amarelo Eutrófico típico .....	33
Tabela 2. Histórico de uso das parcelas de erosão das unidades experimentais .....	35
Tabela 3. Equações de calibração da sonda de nêutrons (modelo CPN 503DR) nas diferentes profundidades, e da sonda TDR para profundidade d 20 cm.....	43
Tabela 4. Classes de Precipitação (CP) e perdas por interceptação média (% da precipitação total) .....	46
Tabela 5. Parâmetros de ajuste estimados pela equação de van Genuchten (1980) e coeficiente de determinação entre a unidade de laboratório e ajustada pelo modelo....	48
Tabela 6. Parâmetros de calibração do modelo para as diferentes condições de cobertura .....	48
Tabela 7. Valores de índice de área foliar para os diferentes períodos .....	50
Tabela 8. Caracterização dos eventos extremos dos dias 14 e 19 de março de 2013.....	64
Tabela 9. Descrição dos eventos de chuva, escoamento, concentração de sedimentos e perda de solo.....	66
Tabela 10. Percentuais de volume escoado e infiltrado após os dois eventos investigados .....	68
Tabela 11. Termografia da superfície do solo, variação e incremento de temperatura para diferentes condições de coberturas, registrados em dois horários 10h e 14h no dia 31 de outubro de 2014 .....	77
Tabela 12. Valores médios diários da umidade volumétrica do solo na profundidade de 20 cm para diferentes condições de cobertura, medida por TDR.....	84
Tabela 13. Valores de referência de umidade volumétrica do solo para cada mês e condição de cobertura investigada.....	91
Tabela 14. Índices de avaliação do desempenho do modelo Hydrus-1D.....	100

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xi
RESUMO .....	14
ABSTRACT .....	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. HIPÓTESES .....	18
3. OBJETIVOS.....	19
3.1.1. Objetivo geral .....	19
3.1.2. Objetivos específicos.....	19
4. REVISÃO DE LITERATURA .....	20
4.1. Aspectos hidrológicos de regiões semiáridas .....	20
4.2. Processos hidrossedimentológicos e conservação de água e solo no semiárido 22	
4.3. Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal.....	25
4.4. Modelagem da umidade do solo utilizando o modelo Hydrus .....	27
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
5.1. Área de estudo .....	29
5.1.1. Unidade experimental e histórico de uso.....	31
5.2. Monitoramento dos dados meteorológicos .....	37
5.3. Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos em escala de parcela.....	38
5.4. Efeito da cobertura morta sobre a temperatura superficial do solo .....	39
5.4.1. Sensores termopares e câmera termográfica .....	40
5.4.2. Instalação e condições de cobertura do solo.....	40
5.5. Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal.....	42
5.5.1. Dinâmica de umidade ao longo do tempo .....	42
5.5.2. Análise de estabilidade temporal da umidade .....	43
5.6. Modelagem da dinâmica de umidade no solo por meio do Hydrus-1D .....	44
5.6.1. Modelo Hydrus 1-D.....	45
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	52
6.1. Aspectos climáticos .....	52
6.2. Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos em escala de parcela.....	61

6.3.	Efeito da cobertura morta sobre a temperatura superficial do solo .....	72
6.4.	Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal.....	79
6.5.	Modelagem da dinâmica de umidade sob diferentes condições de cobertura do solo através do modelo Hydrus-1D .....	92
6.5.1.	Dinâmica das variáveis climáticas e da umidade do solo.....	92
6.5.2.	Calibração e ajuste do modelo.....	95
6.5.3.	Validação e avaliação de desempenho do modelo .....	97
7.	CONCLUSÕES .....	102
7.1.	Aspectos climáticos local.....	102
7.2.	Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos em escala de parcela.....	102
7.3.	Efeito da cobertura morta sobre a temperatura superficial do solo .....	102
7.4.	Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal.....	103
7.5.	Modelagem da dinâmica de umidade sob diferentes condições de cobertura do solo através do modelo Hydrus-1D .....	104
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
9.	APÊNDICES .....	118

## RESUMO

A região semiárida do Nordeste Brasileiro é caracterizada por apresentar variabilidade espaço-temporal das variáveis meteorológicas e hidrológicas, e nos últimos anos vem-se verificando um aumento de áreas degradadas na região em função do uso intensivo do solo e ausência de práticas de conservação. O mau uso do solo associado às variações climáticas vem desencadeando e acelerando os processos de desertificação. A caracterização da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos nessas regiões tornam-se essenciais, uma vez que existe grande carência de um banco de dados em bacias hidrográficas do semiárido, que possam dar suporte à gestão de recursos hídricos e a conservação do solo, e fornecer subsídios para utilização de modelos e geração de cenários futuros. Dentro deste contexto a presente pesquisa visa avaliar a eficiência das práticas conservacionistas alternativas e de baixo custo na redução da perda de solo e água, bem como na manutenção da umidade do solo e dinâmica de temperatura superficial, através da investigação dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela sob diferentes condições de uso e cobertura vegetal em região semiárida, a fim de subsidiar ações voltadas para o manejo e conservação da água e do solo. A pesquisa foi desenvolvida no Município de Pesqueira, região Agreste do Estado de Pernambuco. A dinâmica de umidade, as perdas de água e solo foram quantificadas nas condições de: Parcela com Cobertura Natural (PCN), Parcela com solo Descoberto (PD), Parcela com Barramento de Palma forrageira (PBP) e Parcela com Cobertura Morta (PCM). Os resultados encontrados mostraram que o uso da cobertura morta em comparação ao solo descoberto promoveu redução da temperatura da superfície do solo durante o dia e acréscimo durante a noite. A cobertura morta foi eficiente na redução do escoamento superficial e no controle da erosão. O uso do barramento com palma forrageira apresentou eficiência na redução da perda de solo, e mostrou ser uma técnica conservacionista promissora para a região. Dentre as condições de coberturas avaliadas, a parcela com solo descoberto foi a que apresentou a maior correlação entre a precipitação e o escoamento superficial. De forma geral a parcela com barramento de palma forrageira (PBP) apresentou níveis de umidade acima dos demais tratamentos, mostrando-se ser um sistema de captação *in situ* eficiente para as condições locais avaliadas, principalmente após o estabelecimento da chuva. A estabilidade temporal da umidade foi identificada, e os pontos estáveis apresentaram boa correlação com a média global, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,90, podendo os mesmos ser utilizados de forma precisa na estimativa da umidade do solo em medições futuras. O modelo Hydrus-1D foi capaz de simular de forma satisfatória a dinâmica de umidade no solo ao longo do tempo para as condições de solo descoberto e cobertura natural, na profundidade de 20 cm. Com base no banco de dados do período analisado foi possível apresentar valores mensais de referência da umidade do solo para condições investigadas, e desta forma subsidiar estudos de modelagem hidrológica e sedimentológica na região.

**Palavras-chave:** dinâmica de umidade, estabilidade temporal, conservação do solo, modelagem hidrológica, dinâmica de temperatura no solo.

## ABSTRACT

The semiarid region of Brazilian Northeast is characterized by presenting spatio-temporal variability of meteorological and hydrological variables, and in recent years comes to checking an increase of degraded areas in the region because of intensive soil use and absence of conservation practices. The inappropriate use of soil associated with climate change is unleashing and accelerating desertification processes. The characterization of the dynamics of hydrological and sedimentological processes in these regions become essential, since there is great shortage for a database in the semiarid watersheds that can support the management of water resources and soil conservation and provide subsidies for the use of models and generate future scenarios. Within this context the present research aims to evaluate the efficiency of conservation practices alternative and low cost in reducing soil loss and water as well as in maintaining soil moisture and dynamic surface temperature, through the investigation of hydrological and sedimentological processes in plot scale under different conditions of use and vegetation cover in semiarid region, in order to subsidize actions for the management and conservation of water and soil. The research was conducted in the County of Pesqueira, Agreste region of Pernambuco. Moisture dynamics, water loss and soil were evaluated in the following conditions of use: Plot with Natural Cover (PCN), Plot with Bare Soil (PD), Plot with Barrier of forage Palm (PBP) and Plot with Mulching (PCM). The results showed that the use of mulching as compared to bare soil promoted reduction of soil surface temperature during the day and increase overnight. The mulch was effective in reducing runoff and erosion control. The use of the barrier with forage palm was efficient in reducing soil loss, and proved to be a promising technique for conservation region. Among the conditions of covers evaluated the plot with bare soil was the one with the higher correlation between precipitation and runoff. In general the portion with forage palm (PBP) had moisture levels above the other treatments, showing to be a catchment system in situ efficient for the evaluated local conditions, mainly after the establishment of rain. The temporal stability of the moisture has been identified, and the stable points correlated well with the global average, with coefficients of determination ( $R^2$ ) above 0.90, the same can be used accurately to estimate soil moisture measurements in future. The Hydrus-1D model was able to simulate successfully moisture dynamics in the soil over time for the conditions of bare soil and natural cover, at a depth of 20 cm. Based on the analyzed period database it has been possible to present monthly values of soil moisture reference to investigated conditions, and thus subsidize studies of hydrological and sedimentological modeling in the region.

**Keywords:** moisture dynamics, temporal stability, soil conservation, hydrological modelling, soil temperature dynamics.

## 1. INTRODUÇÃO

A região semiárida do Nordeste brasileiro apresenta limitada disponibilidade de recursos hídricos, devido a dois fatores preponderantes: solos rasos com baixa capacidade de retenção de água e regime pluviométrico irregular, com chuvas mal distribuídas temporal e espacialmente. Nessa região, os solos apresentam alta susceptibilidade à erosão e à salinização, particularmente nas áreas com cultivos agrícolas, com degradação de solos das encostas e agregação de solos nos vales.

Trabalhos na área de conservação de solo e água vêm sendo desenvolvidos em bacias experimentais, com o propósito de utilizar técnicas conservacionistas a fim de minimizar os efeitos da degradação do solo devido à erosão em áreas de encosta e de exploração agrícola, bem como o aumento da disponibilidade hídrica por meio de técnicas de captação *in situ*. Entretanto, vale destacar a carência de estudos que analisem a efetividade de procedimentos e de práticas conservacionistas que venham a proporcionar o incremento na renda de agricultores familiares, bem como assegurar a recuperação e/ou manutenção de uma área produtiva.

Nos últimos anos verifica-se um aumento de áreas degradadas na região semiárida em função do uso intensivo do solo e da ausência de práticas de conservação. Tal exploração tem promovido a perda de sua capacidade produtiva, redução da biodiversidade, entre outros impactos, desencadeando processos desertificatórios. Os estudos em escala de bacia hidrográfica apresentam-se como uma alternativa para combater os avanços da degradação ambiental, pois a bacia hidrográfica é considerada uma unidade física bem definida, conforme a política nacional e estadual dos recursos hídricos.

A carência de dados hidrológicos em pequenas bacias brasileiras gera incertezas que podem comprometer o gerenciamento dos recursos hídricos e a avaliação da disponibilidade hídrica, limitando o seu aproveitamento. A disponibilidade de água associada à degradação do solo são fatores limitantes para o desenvolvimento de uma região.

O empobrecimento e a perda da capacidade produtiva do solo são geralmente ocasionados por processos erosivos de diversas magnitudes. A região semiárida apresenta-se como um ambiente “frágil”, com solos susceptíveis à desagregação e

caracterizada por apresentar eventos de chuva de alta intensidade. Adicionalmente, o uso intenso e inadequado do solo e o desmatamento da caatinga aceleram tais processos. Alternativas de convivência em regiões semiáridas do Nordeste do Brasil têm sido apresentadas e colocadas em prática, porém ainda de forma pontual.

A adoção de práticas conservacionistas alternativas e de baixo custo é uma condição viável para minimizar os processos erosivos, bem como potencializar a captação de chuva *in situ*, aumentando desta forma o armazenamento de água no solo e reduzindo uma série de problemas relacionados à erosão do solo. Adicionalmente, a manutenção da vegetação natural e a implementação de sistemas produtivos integrados e sustentáveis tornam-se primordiais para a região, que apresenta elevada variabilidade climática, solos predominantemente rasos e vulnerabilidade social acentuada.

Os processos hidrológicos nas regiões semiáridas são complexos, em função principalmente da variabilidade e da dinâmica das variáveis envolvidas. E dentro deste contexto, a pesquisa avaliou a eficiência de práticas conservacionistas simplificadas na redução da perda de água e solo, bem como na manutenção de umidade e na sua estabilidade temporal. Avanços científicos relevantes foram obtidos, dentre eles o efeito da cobertura morta no controle da temperatura de superfície do solo.

Adicionalmente, pretende-se construir um banco de dados de processos hidrológicos e sedimentológicos na região semiárida, especificamente no município de Pesqueira-PE, somando-se as pesquisas anteriores realizadas na área de estudo, dentre elas a de Santos (2010) e Borges (2013), que investigaram a eficiência das práticas de conservação do solo na manutenção de umidade, no desenvolvimento da cultura e redução de perda de solo, enquanto Silva (2010) investigou as características físico-hídricas dos solos para suporte à modelagem hidrológica, porém ainda existe carência de informações confiáveis e de longo prazo na região.

Em síntese, a investigação dos processos erosivos de chuva natural e a dinâmica hidrológica em escala de parcela, com destaque para umidade e temperatura do solo tornam-se relevantes e poderão fornecer subsídios para aplicação de modelos e geração de cenários futuros, além de dar suporte à gestão de recursos hídricos e à conservação do solo na região semiárida.

## 2. HIPÓTESES

i) Existe redução da perda de água e do solo em função do uso da cobertura morta e do cordão vegetativo de palma forrageira em relação às outras condições de coberturas estudadas;

ii) A combinação entre o tipo de cobertura morta (pó de coco, capim elefante seco e folhas secas de cajueiro) e a densidade aplicada (2, 4 e 8 t ha<sup>-1</sup>) promovem redução da temperatura da superfície do solo e sua variação ao longo do dia em relação ao solo descoberto;

iii) É possível identificar pontos estáveis para umidade nas condições de cobertura do solo estudadas (PD, PCN, PCM e PBP), influenciam na estabilidade temporal da umidade do solo nas profundidades de 20 e 40 cm;

iv) O modelo Hydrus é capaz de simular com boa eficiência a dinâmica de umidade do solo para condições de Parcela com Cobertura Natural e Parcela com Solo Descoberto ao longo do tempo na profundidade de 20 cm.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1.1. Objetivo geral

Avaliar a eficiência de práticas conservacionistas alternativas na redução da perda de solo e água, e na manutenção da umidade do solo, bem como investigar a influência da cobertura morta no controle da temperatura superficial do solo em região semiárida, a fim de subsidiar ações voltadas para o manejo e conservação da água e do solo.

#### 3.1.2. Objetivos específicos

- ✓ Quantificar a perda de solo e água em parcelas de erosão com diferentes condições de cobertura sob chuva natural em região semiárida;
- ✓ Avaliar a eficiência e a viabilidade de uso da palma forrageira como técnica conservacionista de água e solo em região semiárida;
- ✓ Caracterizar a dinâmica de umidade do solo sob diferentes condições de cobertura vegetal e uso, bem como avaliar a sua estabilidade temporal;
- ✓ Avaliar a aplicabilidade do modelo Hydrus-1D na simulação da dinâmica de variação de umidade do solo para as condições de cobertura natural e solo descoberto ao longo do tempo na camada de 20 cm em região semiárida do Brasil;
- ✓ Avaliar o efeito de diferentes tipos de cobertura (pó de coco, capim elefante seco e folhas secas de cajueiro) e densidades (2, 4 e 8 t ha<sup>-1</sup>) no controle da temperatura superficial do solo.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1. Aspectos hidrológicos de regiões semiáridas**

As regiões semiáridas são caracterizadas por apresentar irregularidade e/ou escassez de chuvas, com ocorrência de eventos de alta intensidade e curta duração, além de elevada taxa de evapotranspiração. Em função desses fatores, o conhecimento do comportamento climático de uma região, bem como dos processos hidrológicos envolvidos, tornam-se indispensáveis para gestão dos recursos naturais e hídricos. Montenegro e Ragab (2010) comentam que a escassez de recursos hídricos e a erosão dos solos são um dos principais entraves naturais para o desenvolvimento da região semiárida do Brasil, uma vez que a mesma é altamente vulnerável aos processos de desertificação, à variabilidade climática e à desigualdade social.

De acordo com Montenegro e Montenegro (2012), dentre as regiões submetidas a cenários de escassez de água, destacam-se as zonas semiáridas, sujeitas às chuvas de distribuição irregular no tempo e no espaço, produzindo períodos de estiagem aguda, e ao mesmo tempo, concorrendo para eventos de enchentes. É também nas zonas semiáridas que ocorrem fluxos elevados de evapotranspiração, acentuando os déficits hídricos nos períodos sem chuvas. Consequentemente, as incertezas associadas à disponibilidade de água para os mais diversos usos tendem a ser elevadas, dificultando significativamente o planejamento voltado ao uso racional dos recursos hídricos.

Face à vasta extensão de regiões semiáridas (e áridas) no mundo, é essencial aprofundar o conhecimento dos processos hidrológicos nessas regiões. E dentro deste contexto, o entendimento do comportamento hidrológico depende da disponibilidade de dados e da manutenção de redes de monitoramento, já que nessas regiões a situação é agravada pela necessidade de medições contínuas, de forma a representar eventos climatológicos não frequentes (Monte-Mor et al., 2013).

Conforme Montenegro e Ragab (2012), as regiões semiáridas apresentam características hidrológicas diferentes das encontradas em regiões úmidas e áridas. As precipitações são escassas e de alta variabilidade, pouco frequentes, com presença de eventos de alta intensidade e curta duração. Os períodos de seca, clima e mudanças de uso da terra potencializam a complexidade hidrológica dessas regiões. Entender a

hidrologia sob aspectos climáticos e mudanças de uso da terra atuais e futuras torna-se essencial para a gestão e planejamento de recursos hídricos.

As variabilidades temporais e espaciais das precipitações pluviométricas constituem uma característica marcante do clima da região Nordeste do Brasil, em particular sobre a porção semiárida, em que a irregularidade temporal e espacial das chuvas constituem um fator relevante, se não mais do que os totais pluviométricos sazonais propriamente ditos, em especial para a agricultura de sequeiro, que depende da manutenção da umidade do solo durante o período de cultivo (Marengo et al., 2011).

Os processos hidrológicos nas regiões semiáridas estão diretamente associados às condições climáticas, à vegetação, aos processos de formação do relevo e aos padrões de uso do solo com predomínio de um processo sobre outro e de acordo com a época do ano, período seco ou chuvoso (Araújo, 2011). A chuva representa a única fonte de realimentação da umidade do solo, do fluxo dos rios e dos aquíferos da região Nordeste. Em termos práticos, a umidade do solo constitui uma reserva localizada de água, em determinado tempo (Rebouças, 1997).

A vegetação caatinga, característica de regiões semiáridas, apresenta uma enorme variabilidade espacial e temporal, e estas variações produzem os mais diversos impactos no ciclo hidrológico (Cunha et al., 2014). A produção de escoamento em ambientes semiáridos é geralmente dominada por componentes de escoamento rápido de superfície, durante e imediatamente após a chuva. Dentro deste contexto, a umidade do solo torna-se um fator-chave na determinação da resposta do escoamento superficial para um dado evento de precipitação, sendo uma variável de estado natural da superfície terrestre que apresenta dinâmica espaço-temporal sobre a área da bacia (Monte-Mor et al., 2013).

De acordo com Araújo Neto et al. (2013), o raleamento da caatinga potencializa o crescimento do extrato herbáceo, que contribui para o aumento do tempo de oportunidade de infiltração, com conseqüente redução do escoamento superficial, levando a uma condição de maior retenção de água no solo. Conforme Cantalice et al. (2008), a estrutura e a densidade de cobertura vegetal da caatinga (arbustivo-arbórea) potencializam a interceptação da chuva (interceptação vegetal) e, por conseguinte, reduzem ou retardam o escoamento superficial, o que possibilita uma maior permanência da lâmina de água sobre o solo, favorecendo a infiltração.

A cobertura vegetal e os tipos de uso do solo, além de seus efeitos sobre as condições de infiltração, exercem importante influência na interceptação da água advinda da chuva. Quanto maior a porcentagem de cobertura vegetal, da rugosidade da superfície do solo e da evapotranspiração da cultura, maiores serão as taxas de infiltração quando ocorrer uma chuva e, conseqüentemente, menores serão as perdas por escoamento superficial (Pruski et al., 2003).

Conforme Santos et al. (2012), o semiárido brasileiro é um ambiente natural frágil e a compreensão dos processos hidrossedimentológicos é essencial para sua preservação, uma vez que os processos erosivos podem causar graves prejuízos econômicos e ambientais na região. A irregularidade pluviométrica, somada à fragilidade do solo, à declividade do terreno e à intensificação do uso do solo pela agricultura e pecuária na região, favorecem a erosão dos solos na região semiárida.

#### **4.2. Processos hidrossedimentológicos e conservação de água e solo no semiárido**

A escassez de recursos hídricos e a erosão dos solos são um dos principais entraves naturais para o desenvolvimento da região semiárida do Brasil, uma vez que a mesma é altamente vulnerável aos processos de desertificação, variabilidade climática, desigualdade social, e caracterizada por solos pouco intemperizados (pouco profundos) e pequena produção de massa vegetal (Montenegro e Ragab, 2010; Aguiar et al., 2006). Esses entraves tornam-se ainda mais acentuados em função da crescente demanda por produtos agrícolas e florestais, na qual a sua exploração tem sido feita através do desmatamento da caatinga, do uso e ocupação desordenados do solo e de queimadas sucessivas com manejo agrícola inadequado, com conseqüente degradação do solo em função da aceleração dos processos erosivos (Albuquerque et al., 2001; Brasileiro, 2009).

A erosão do solo é um processo complexo que envolve vários fatores, de forma e magnitude variáveis, conforme o local de ocorrência, sendo provocada principalmente por ações da chuva e do vento (Carvalho et al., 2009; Pruski, 2009). É um fenômeno extremamente variável, temporal e espacialmente, e essa variabilidade deve-se às diferenças nas condições de rugosidade da superfície do solo que desempenham papel primordial na mesma (Silva e Santos, 2012; Volk et al., 2004). É o resultado da ação do impacto das gotas da chuva e do escoamento superficial combinados com a

erodibilidade do solo, caracterizada pelas fases de desagregação, transporte e deposição (Bertol et al., 2002; Cardoso et al., 2012; Oliveira, et al., 2012).

A erosão hídrica quando associada ao uso não racional do solo, tem sido a causa principal da queda da produtividade dos solos tropicais pelo carreamento dos nutrientes e da matéria orgânica, bem como pela redução da espessura do solo, causando a diminuição da capacidade de retenção e redistribuição da água no perfil do solo, gerando, como consequência, maiores escoamentos superficiais e, por vezes, maiores taxas de erosão e redução da qualidade ambiental do solo, causando prejuízos econômicos não só para a exploração agropecuária, mas também para diversas outras atividades econômicas, problemas ambientais e sociais (Campos Filho et al., 1991; Martins et al., 2003; Santos et al., 2010; Cardoso et al., 2012; Telles et al., 2011).

A compreensão e a quantificação do escoamento superficial e da perda de solo são um grande desafio para o planejamento ambiental e gestão de recursos hídricos, uma vez que os processos hidrológicos e sedimentológicos são complexos e interdependentes e são influenciados por ações antrópicas. O conhecimento da dinâmica dos processos possibilita a utilização das práticas mais adequadas para conservação do solo e da água, principalmente em regiões semiáridas onde ocorrem com frequência precipitações de alta intensidade e curta duração (Zokaib e Naser, 2012; Montenegro et al., 2013b; Portela et al., 2011; Santos et al., 2008; Santos e Montenegro, 2012; Santos et al., 2010).

Diversos são os fatores que regulam os processos de escoamento superficial e da perda de solo, destacando-se as condições climáticas, a cobertura vegetal e o manejo do solo como os principais (Santos et al., 2007; Santos et al., 2009; Mendes et al., 2011; Silva e Santos, 2012; Barbosa et al., 2012; Chamizo et al., 2012). As perdas de água seguem a mesma tendência das perdas de solo, porém são menos influenciadas pelo sistema de manejo do solo (Bertol e Miquelluti, 1993; Bertol et al., 2004).

Os padrões de chuva e a umidade antecedente desempenham um importante papel na infiltração e no desempenho e transporte de partículas de solo (Montenegro et al., 2013a). Pode-se dizer que a relação dos eventos de chuva com as perdas de solo pode ser avaliada considerando a duração deles, e não somente o volume de precipitação, pois volumes iguais de precipitações em diferentes tempos de ocorrência provocam processos erosivos diferenciados (Mendes et al., 2011).

O declive do terreno é outro fator que influencia fortemente as perdas de solo e de água por erosão hídrica, pois, à medida que ela aumenta, aumentam o volume e a velocidade da enxurrada e diminui a infiltração de água no solo. Com isso, aumenta a capacidade de transporte das partículas de solo, assim como a própria capacidade desta de desagregar solo, por ação de cisalhamento, principalmente quando concentrada nos sulcos direcionados no sentido do declive do terreno (Cogo et al., 2003). A profundidade efetiva do solo limita fortemente a quantidade de água infiltrada no perfil e aumenta o risco de erosão (Bertol e Almeida, 2000).

A vegetação pode regular o escoamento superficial e a perda de solo, porém as culturas agrícolas não podem desempenhar um papel vital no controle da erosão do solo, uma vez que as culturas anuais são cultivadas no início das chuvas, e durante o seu crescimento ocorre o período mais vulnerável para geração de escoamento e perda de solo, havendo a necessidade de utilização de técnicas que minimizem tais impactos (Zhao et al., 2014), porém vale salientar que as culturas perenes podem atenuar as perdas de solo.

A erosividade da chuva associada ao estágio de crescimento das culturas podem provocar maiores perdas de solo (Cogo et al., 2003), porém tais perdas podem ser minimizadas pelo uso de práticas conservacionistas, e dentre elas o uso de cobertura morta tem sido indicada (Barbosa et al., 2012; Costa et al., 2013; Montenegro et al., 2013a).

A constante redução da produtividade dos solos tem sido atribuída principalmente à erosão hídrica e ao manejo inadequado do solo (Martins et al., 2003). As operações de preparo do solo podem acelerar o processo de erosão hídrica das áreas cultivadas, uma vez que alteram a estrutura, o microrrelevo e reduz a cobertura do solo, promovendo a exposição da superfície à ação erosiva da chuva (Panachuki et al., 2011).

Os impactos positivos das práticas conservacionistas na redução das perdas de solo e água e na melhoria da qualidade ambiental do solo têm sido amplamente discutidos (Liu et al., 2013). A adoção das práticas conservacionistas proporcionam melhorias nas características físicas, hidráulicas, químicas e biológicas do solo, com consequente aumento da capacidade produtiva e sustentabilidade do sistema. Os sistemas conservacionistas vêm se tornando mais frequentes na paisagem, recuperando áreas degradadas e aumentando a renda aos agricultores (Andrade et al., 2010).

### **4.3. Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal**

A umidade do solo é um componente crucial na determinação da disponibilidade de água para atmosfera e desempenha papel importante nos processos hidrológicos e transporte de sedimentos devido à sua relevante participação na separação da precipitação em infiltração e escoamento superficial. Além disso, exerce influência na interação solo-planta-atmosfera, especialmente na evapotranspiração e na interferência dos processos vinculados à erosão hídrica, sendo, portanto, de grande utilidade para extensa faixa de aplicações, visando à conservação do solo e da água (Sur et al., 2013; Botteron et al., 2013; Ávila et al., 2010; Ávila et al., 2011).

O conhecimento da dinâmica de umidade, mais precisamente dos processos de umedecimento e secamento do solo, é essencial para fomentar estudos voltados para hidrologia e ecologia em diferentes escalas. Dentro deste contexto, o monitoramento da umidade do solo torna-se indispensável nas pesquisas ecohidrológicas (Schneider et al., 2008), principalmente porque a umidade apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, sendo dependente de vários fatores, dentre eles: precipitação antecedente, textura do solo, densidade, estrutura, manejo, condutividade hidráulica, vegetação, topografia e atividades antrópicas em diferentes escalas (Schneider et al., 2008; Santos et al., 2011; Lei et al., 2011; Sur et al., 2013).

Yang et al. (2015) reforçam que a vegetação tem influência significativa na umidade do solo e na sua variabilidade espaço-temporal, que tornam-se ainda mais acentuada em regiões semiáridas, onde a vegetação apresenta elevada dinâmica temporal e os processos hidrológicos apresentam maiores incertezas, sendo o teor de água no solo um fator limitante para produção agrícola, sustentabilidade e restauração do ecossistema (Cosh et al., 2008; Brocca et al., 2009; Souza et al., 2011; Yang et al., 2014; Lei et al., 2014 ).

A capacidade de armazenamento e de retenção de água no solo garante a regulação hídrica de uma bacia hidrográfica, especialmente em longos períodos de alta ou baixa precipitação, afetando significativamente os processos hidrológicos e dentro deste contexto a compreensão da dinâmica de água no solo torna-se crucial (Gutierrez-Lopez et al., 2014).

Em termos práticos, a investigação da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo pode-se constituir em uma ferramenta valiosa para produção agrícola

em diferentes escalas e para estudos associados à gestão de recursos hídricos, planejamento ambiental, modelagem hidrológica, conservação do solo, manejo agrícola e agricultura de precisão (Schneider et al., 2008; Lin et al., 2005; Souza et al., 2013). Porém a grande variabilidade de solos requer a coleta de muitas amostras de uma área para extrair informações suficientes da umidade do solo, o que é dispendioso em tempo e recurso financeiro (Gao e Shao, 2012).

Vachaud et al. (1985), buscando representar adequadamente a umidade do solo, com reduzido esforço amostral, propuseram o conceito de estabilidade temporal. Esse conceito pode ser definido como a associação constante entre a localização espacial e as medidas estatísticas que caracterizam uma determinada propriedade do solo ao longo do tempo (van Wesenbeeck e Kachanoski, 1988). Para avaliar a estabilidade temporal, Vachaud et al. (1985) analisaram as diferenças entre os valores em cada posição e o valor médio no espaço, ao longo do tempo. O conceito é realístico para umidade, na medida em que existe alta probabilidade de que uma posição mais úmida em um instante permaneça assim em outros momentos.

A estabilidade temporal possibilita a identificação de pontos no campo que refletem o comportamento médio de uma variável, independentemente do nível de umidade do solo, ou seja, pontos que apresentam valores semelhantes ao valor médio. A identificação deles é fundamental no manejo da irrigação e no planejamento de programas de monitoramento de variáveis hidrológicas, pois permite a redução de custos relacionados à mensuração de dados de campo (Gonçalves et al. 1999; Ávila et al., 2010).

Dentro deste contexto, a avaliação da persistência temporal nos pontos mais estáveis torna-se extremamente necessária para diminuir o número de pontos amostrais, mantendo informações precisas e com reduzida incerteza (Melo Filho e Libardi, 2005; Schneider et al., 2008; Souza et al., 2011). É necessário um número mínimo de medições ao longo do tempo para identificar a localização mais estável, e esse número pode ser obtido por índices disponíveis para avaliar o grau de estabilidade temporal da umidade em uma escala de pontos. Se a estabilização for alcançada após um determinado número de ocasiões de medição, esse número de medição será mínimo necessário para identificar esse local de tempo estável (Souza et al., 2011; Hu et al., 2012; Fontes Júnior et al., 2013).

#### **4.4. Modelagem da umidade do solo utilizando o modelo Hydrus**

Considerando a relevância do conhecimento da dinâmica da umidade, principalmente em áreas onde a disponibilidade de água no solo se torna restritiva, o monitoramento hídrico do solo adquire maior significância (Araújo et al., 2001). Conforme Elaiuy et al. (2009), o método de quantificação da água no solo deve proporcionar resposta direta, rápida e precisa.

Rivera et al. (2008) destacam que os altos custos envolvidos nas pesquisas de campo e os avanços computacionais têm contribuído para ampliar a utilização dos modelos matemáticos, possibilitando a simulação do movimento de água e soluto no solo. Porém, vale ressaltar que as medições de campo são indispensáveis, uma vez que os modelos matemáticos necessitam de calibrações e validações locais.

Nas últimas décadas, tem-se observado um considerável progresso na compreensão e na descrição de processos físicos que regem os fenômenos do movimento da água e o transporte de solutos na região não saturada do solo (Pinho e Miranda, 2014), e uma grande variedade de modelos analíticos e numéricos para prever os processos de transferência e o movimento de água e solutos no solo (Gonçalves et al., 2007).

Šimůnek et al. (2009) comentam que o surgimento dos diversos modelos se deve ao progresso na compreensão conceitual das descrições matemáticas dos processos de transporte de solutos e movimento de água no solo em região não saturada. Esses modelos são baseados na equação de Richards para o fluxo saturado/insaturado da água no solo e na equação de convecção-dispersão (CDE) para o transporte de solutos.

O aumento da utilização dos modelos desenvolvidos, em condições variadas de laboratório e de campo, além de possibilitar melhorias para as rotinas computacionais, fornece informações acerca dos processos para os quais os modelos podem ser aplicados com confiança (Pinho e Miranda, 2014).

De acordo com Chaves (2009), o modelo matemático Hydrus é um dos mais usados na estimativa do processo de percolação de água e lixiviação de compostos químicos na zona vadosa do solo, particularmente em estudos de recarga e contaminação de aquíferos.

Conforme Šimůnek et al. (2009), o modelo Hydrus-1D pode ser utilizado para analisar o movimento de água e solutos em meios não saturados, parcialmente saturados e/ou totalmente saturados, podendo a região de fluxo ser composta de solos não uniformes. O fluxo é controlado pelas condições de contorno (carga hidráulica, condições atmosféricas e drenagem livre) e as equações que regem o fluxo e o transporte são resolvidas numericamente por elementos finitos.

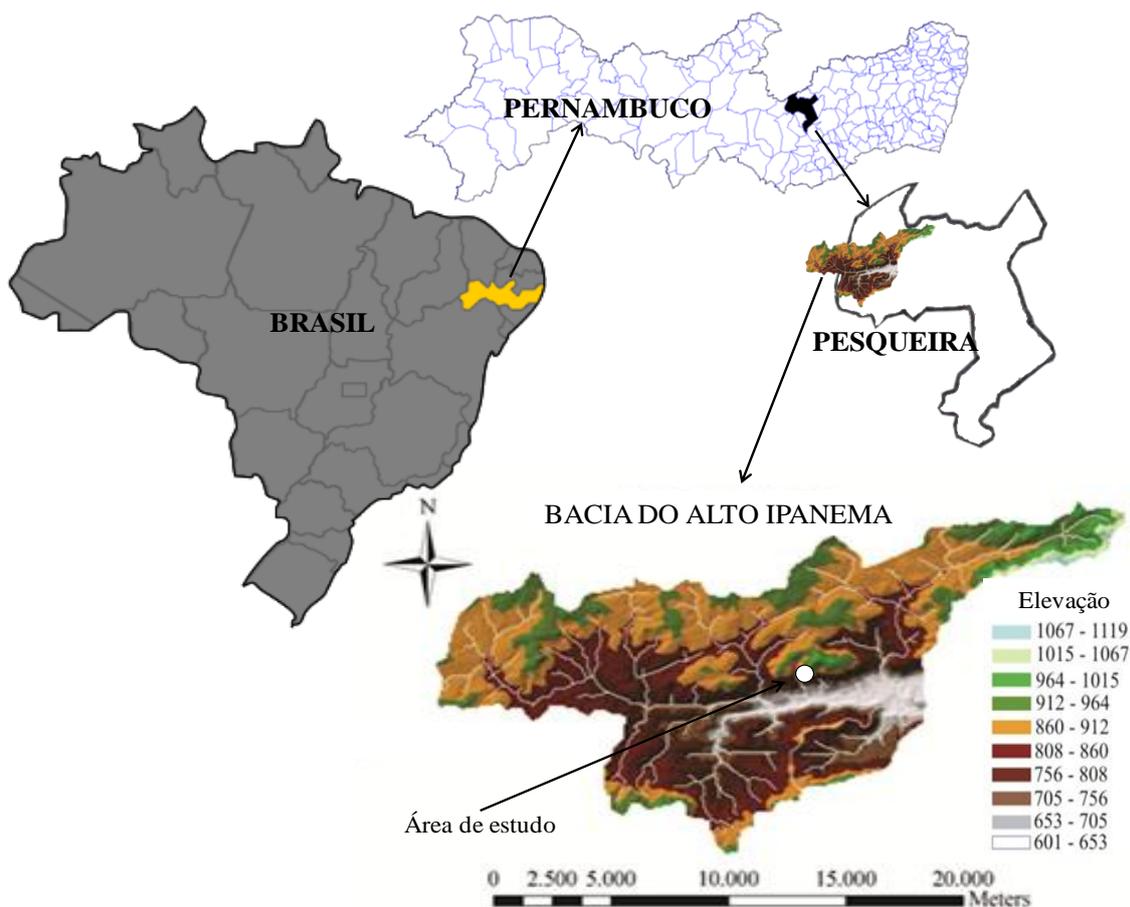
Kanzari et al. (2012) utilizaram o modelo Hydrus-1D para investigar o risco de salinização e a dinâmica de umidade em região semiárida da Tunísia. Adicionalmente, Zeng et al. (2013) aplicaram o Hydrus-1D na análise de lixiviação de sais em área irrigada na China. Pinho e Miranda (2014) avaliaram o modelo Hydrus-1D na simulação do transporte de água e potássio em condição de laboratório e observaram de forma geral que os valores de umidade do solo simulados foram superiores àqueles observados. Monteiro et al. (2009) conduziram um estudo em um vale aluvial suscetível à salinização e avaliaram o efeito combinado de diferentes lâminas de lixiviação e da precipitação pluviométrica na redução da salinidade do solo, adotando-se lisímetros irrigados com água moderadamente salina, além de utilizarem o modelo HYDRUS-1D como ferramenta computacional determinística, calibrado ao experimento de campo.

O modelo Hydrus-1D vem sendo utilizado mais frequentemente em estudos de dinâmica de água e solutos em colunas de solo. Poucos trabalhos têm sido desenvolvidos em condições experimentais de campo. Vale ressaltar que a região semiárida, em particular, ainda é carente de informações da dinâmica de água no solo sob diferentes condições de uso, e que o monitoramento e a modelagem ao longo do tempo podem se tornar ferramentas importantes para subsidiar ações de manejo e conservação do solo e água, e para quantificar os componentes do balanço hídrico.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1. Área de estudo

A presente pesquisa foi conduzida no Município de Pesqueira, Região Agreste do Estado de Pernambuco-Brasil, mais precisamente na Bacia Hidrográfica do Mimoso (nas coordenadas UTM: 0733983 e 9071150, 639 m, Zona 24), que é uma sub-bacia da Bacia Representativa do Alto Ipanema. A Bacia Representativa do Alto Ipanema é uma sub-bacia do sistema do Rio Ipanema, em sua porção ocidental mais a montante, e abrange parte dos municípios de Arcoverde e de Pesqueira, do Estado de Pernambuco-Brasil, em uma área de aproximadamente 195 km<sup>2</sup> (Figura 1).



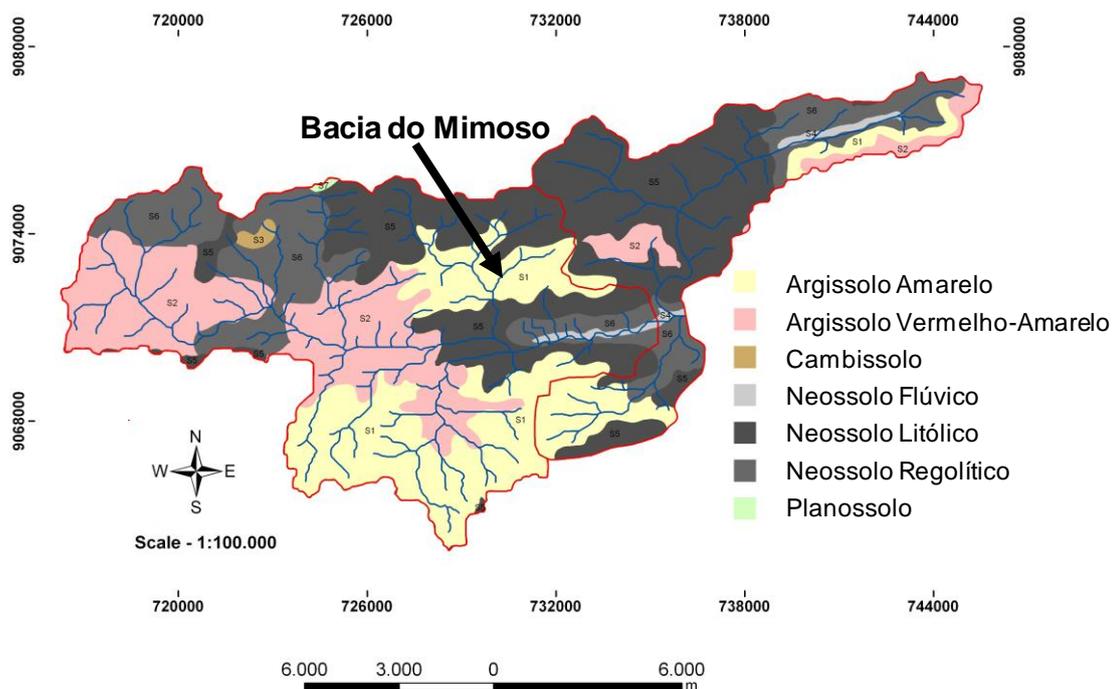
**Figura 1.** Localização da área de estudo com destaque para unidade experimental investigada

Conforme a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo BSsh (extremamente quente, semiárido). A precipitação média anual conforme dados

histórico local (1910 a 2014) é de 686,30 mm. De acordo com a normal climatológica a temperatura média de 24,7 °C, média máxima de 29,0 °C e média mínima de 18,5 °C.

A umidade relativa média anual é de 75%, onde os valores mais elevados situam-se logo após a estação chuvosa (maio/julho) e as mais baixas na estação seca (setembro/novembro). As chuvas apresentam alta variabilidade espaço-temporal, concentrando-se no primeiro semestre (janeiro a julho), quando ocorre, em média, mais de 75% da precipitação total anual (Figueiredo et al., 2009). A vegetação predominante é a caatinga hipoxerófila, cactáceas e bromeliáceas (Montenegro e Montenegro, 2004).

Os solos de referência da Bacia Representativa do Alto Ipanema são: Argissolos Amarelo, Argissolos Vermelho-Amarelo, Neossolos Flúvicos, Regolíticos e Litólicos, conforme EMBRAPA (2000) (Figura 2).



**Figura 2.** Mapa de solos da Bacia Representativa do Alto Ipanema, com delimitação da Bacia do Mimoso (Fonte: adaptada da EMBRAPA, 2000)

### 5.1.1. Unidade experimental e histórico de uso

A unidade experimental situada nas coordenadas UTM: 0733983 e 9071150, 639 m, Zona 24, é dotada de cinco parcelas de erosão, com dimensões de 4,5 m de largura por 11 m de comprimento (sentido do declive), delimitadas por alvenaria de tijolos perfazendo uma área de 49,5 m<sup>2</sup> (Santos, 2010). Na parte inferior das parcelas existe um sistema coletor de enxurrada composto por dois tanques. Cada tanque possui em média, uma área de 9504,0 cm<sup>2</sup> (Santos, 2010). O volume total escoado durante a enxurrada, nas parcelas, após cada evento de chuva, fica depositado nesses tanques de sedimento (Figura 3).



**Figura 3.** Vista parcial de uma unidade experimental no momento de sua instalação em 2009

A concepção experimental implementada nas parcelas para monitoramento da perda de solo e água na região foi composta por: Parcela com cobertura natural e/ou espontânea (PCN) (caatinga herbácea composta por “Pega-Pinto” (*Boerhavia*), “Ervanço” (*Alternanthera tenella colla*), “Jureminha” (*Desmanthus virgatus*) e arbustiva, com presença de “Jurema-Preta” (*Mimosa hostilis* Benth.) e “Marmeleiro” (*Croton sonderianu*)), Parcela com solo descoberto (PD), Parcela para cultivo agrícola em curva de nível com presença de cordão vegetativo de palma forrageira (PBP) (com espaçamento de 0,25 x 0,5 x 3,0 m), Parcela para cultivo agrícola em curva de nível com presença de cobertura morta (PCM) e Parcela para cultivo agrícola em sistema convencional e morro abaixo (PMA) (Figura 4). As parcelas estavam dispostas lado a lado, com distância de 0,50 m entre as mesmas. Em cada parcela foram instalados oito tubos de acesso de PVC, distanciados de 2 m, para determinação do conteúdo de água

do solo nas camadas de 20 e 40 cm utilizando sonda de nêutrons (Santos, 2010). Adicionalmente, a unidade experimental possui um sistema automático para monitoramento da chuva e umidade do solo utilizando pluviômetro automático e sondas TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), respectivamente. As sondas TDRs encontram-se instaladas na camada de 20 cm, sendo duas sondas em cada condição de cobertura.



**Figura 4.** Vista parcial das diferentes condições de coberturas das parcelas de erosão

A unidade experimental está instalada em área de encosta com declividade média de 5%, onde ocorre predominância de exploração agrícola de sequeiro. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo Eutrófico típico cujas características físicas do solo foram descritas por Santos (2010), e a condutividade hidráulica do solo saturado estimada por Silva et al. (2012) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Característica física e hidráulica do Argissolo Amarelo Eutrófico típico

Horiz.	Horiz. (cm)	Areia (g kg <sup>-1</sup> )	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Silte (g kg <sup>-1</sup> )	AN (g kg <sup>-1</sup> )	GF (g kg <sup>-1</sup> )	Dp (g m <sup>-3</sup> )	Ds (g m <sup>-3</sup> )	PT (g m <sup>-3</sup> )	Ksat (mm h <sup>-1</sup> )
Ap	0 - 17	342,4	290,9	366,7	135,3	0,535	2,66	1,73	0,350	133,9
Bt <sub>1</sub>	17 - 92	249,1	404,3	346,7	192,0	0,525	2,70	1,74	0,356	73,2
Bt <sub>2</sub>	92 - 150	182,4	430,9	386,7	185,3	0,570	2,72	1,75	0,357	81,5

Obs: Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado foram determinados por meio de Permeômetro de Guelph, parte dos dados foram obtidos por Silva et al. (2012), \* não houve medida em profundidades inferiores a 15 cm e superiores a 100 cm.

AN – Argila Natural; GF – Grau de Flocculação; Dp – densidade das partículas; Ds – densidade do solo; PT – Porosidade Total; Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado.

A instalação da unidade experimental ocorreu no ano de 2009, na qual realizou-se a caracterização e classificação do solo. O histórico de uso ao longo do tempo pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 2.** Histórico de uso das parcelas de erosão das unidades experimentais

Ano	Unidades Experimentais				
	PCN	PD	PCM	PBP	PMA
	Instalação (área desmatada)	Instalação (área desmatada)	Instalação (área desmatada)	Instalação (área desmatada);	Instalação (área desmatada)
<b>2009</b>					
<b>2010</b>	- Manutenção da parcela em condição de cobertura natural e/ou espontânea;	- Manutenção da parcela em condição descoberta;	- Plantio de feijão de corda no mês de março em curva de nível com introdução de 3,2 Mg ha <sup>-1</sup> de palha de feijão como cobertura morta e barramento de pedra com aproximadamente 8 cm de altura e 10 cm de largura, com distância entre os barramentos de 1 m; - Em pousio o resto do ano após a colheita;	- Plantio dos cordões vegetativos de palma forrageira;  - Plantio de feijão de corda no mês de março em nível;	- Plantio de feijão morro abaixo no mês de março;  - Em pousio o resto do ano após a colheita;
<b>2011</b>	- Manutenção da parcela em condição de cobertura natural e/ou espontânea;	- Manutenção da parcela em condição descoberta;	- Plantio de milho no mês de abril em curva de nível com introdução de 7 Mg ha <sup>-1</sup> de restolho de capim elefante como cobertura morta e barramento de pedra com aproximadamente 8 cm de altura e 10 cm de largura, com distância entre os barramentos de 1 m;  - Em pousio o resto do ano	- Plantio de milho em nível no mês de abril;  - Em pousio o resto do ano após a colheita;	- Plantio de milho morro abaixo no mês de abril;  - Em pousio o resto do ano após a colheita;

			após a colheita;		
<b>2012</b>	- Manutenção da parcela em condição de cobertura natural e/ou espontânea;	- Manutenção da parcela em condição descoberta;	Manutenção da cobertura morta, com introdução de 10 Mg ha <sup>-1</sup> de casca de arroz no mês de março (não houve plantio) e retirada do barramento de pedra; - Em pousio o resto do ano;	Pousio – escassez de chuva	Pousio – escassez de chuva
<b>2013</b>	- Manutenção da parcela em condição de cobertura natural e/ou espontânea;	- Manutenção da parcela em condição descoberta;	- Tentativa de cultivo mínimo de milho e feijão, porém houve perda da cultura por conta da escassez de chuva; - Manutenção da cobertura morta, com introdução de 8 Mg ha <sup>-1</sup> de pó de coco (mês de março); - Em pousio o resto do ano;	- Tentativa de plantio direto de milho e feijão, porém houve perda da cultura por conta da escassez de chuva; - Renovação da palma em janeiro; - Em pousio o resto do ano;	Preparada para cultivo morro abaixo de milho e feijão, porém houve perda da cultura por conta da escassez de chuva;  - Em pousio o resto do ano
<b>2014</b>	- Manutenção da parcela em condição de cobertura natural e/ou espontânea;	- Manutenção da parcela em condição descoberta;	- Incremento de 20 t ha <sup>-1</sup> no mês de junho de material orgânico (cama de frango) como fonte de entrada carbono no sistema;	- Incremento de 20 t ha <sup>-1</sup> no mês de junho de material orgânico (cama de frango) como fonte de entrada carbono no sistema;	-Revolvimento manual do solo e posterior incremento de 20 t ha <sup>-1</sup> no mês de junho de material orgânico (cama de frango) como fonte de entrada carbono no sistema;

## 5.2. Monitoramento dos dados meteorológicos

As variáveis meteorológicas foram medidas por uma Estação Climatológica Total Automática (Campbell Scientific) instalada nas proximidades da área, nas coordenadas UTM (0735105 e 9067786, 612m), Zona 24. A estação é dotada de um conjunto de sensores e uma interface de comunicação para transferência de dados, que incluem: um anemômetro para medir a velocidade e direção do vento (a 2 metros de altura do solo), um pluviômetro, um sensor de temperatura e umidade relativa do ar e um piranômetro para medir a radiação. Os dados foram registrados com intervalo horário. A evapotranspiração de referência diária foi estimada por meio da equação de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998). Adicionalmente, a precipitação foi monitorada utilizando um pluviômetro automático (TB4 Tipping Bucket Rain Gauge da Campbell Scientific), instalado na unidade experimental.



**Figura 5.** Vista da instrumentação utilizada para monitoramento das variáveis meteorológicas, (A) estação climatológica; (B) pluviômetro automático

O período de caracterização das variáveis meteorológicas no presente estudo compreendeu de janeiro de 2011 a dezembro de 2014. Foram analisados os dados meteorológicos diários de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. Adicionalmente estimou-se a evapotranspiração de referência. Os dados foram submetidos à análise estatística de modo a se estabelecer os níveis de confiança, a frequência da ocorrência de eventos, a aleatoriedade e a incertezas das variáveis hidrológicas investigadas.

### 5.3. Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos em escala de parcela

Conforme comentado anteriormente, a unidade experimental era dotada de cinco parcelas de erosão, com duas caixas coletoras de enxurrada no final de cada parcela. Após cada evento de chuva, realizava-se uma leitura do nível da caixa, e de posse da área da mesma determinou-se o volume total escoado por m<sup>2</sup> (Cogo et al., 1978).

A estimativa da perda de solo constou na coleta de solo e água em potes plásticos, após a ocorrência de eventos pluviométricos erosivos, seguindo o procedimento descrito por Cogo et al. (1978). Tal procedimento buscou obter as taxas de perdas de solo e a concentração de sedimentos, bem como correlacionar os níveis de erosão com padrões de uso do solo, e proporcionar o entendimento dos processos hidrológicos envolvidos (Figura 6).

Adicionalmente, instalou-se um vertedor triangular no final da Parcela para cultivo agrícola em curva de nível com presença de cobertura morta (PCM) e na parcela de solo descoberto (PD), a fim de caracterizar o processo de resposta chuva-vazão de forma automática por meio de um sensor de pressão, conforme equação abaixo.

$$Q = 1,4H^{5/2} \tag{1}$$

Em que, Q é a vazão em (m<sup>3</sup>/s) e H é a altura da lâmina (m)



**Figura 6.** Vista parcial do sistema de coleta de dados, vertedor para medição de vazão e caixa de coleta de enxurrada após um evento erosivo em março de 2012

#### 5.4. Efeito da cobertura morta sobre a temperatura superficial do solo

A fim de orientar estudos futuros buscou-se verificar o efeito de três tipos de cobertura morta e três diferentes densidades (2, 4 e 8 toneladas por hectare) sobre a temperatura superficial do solo, que interfere diretamente nos processos hidrológicos, tais como: umidade do solo, infiltração e perda de água para atmosfera. O monitoramento da temperatura da superfície do solo foi realizado por técnica termográfica (câmera termográfica digital) e por meio de cabos flexíveis (dispositivos elétricos) constituídos por fios de cobre puro, como termoelemento positivo, e “Constantan”, como termoelemento negativo (termopares). O cabo foi soldado na extremidade, a fim de estabelecer uma força eletromotriz nos termoelementos ao serem submetidos a diferentes temperaturas.

#### 5.4.1. Sensores termopares e câmera termográfica

A temperatura do solo foi mensurada usando dois métodos: i) Um método convencional composto por sensores termopares modelo T (cobre-constantan) conectados a um registrador de dados (Datalogger CR1000 da Campbell Scientific); e ii) Por técnica termográfica usando uma câmera infravermelha de mão portátil (modelo E6 da Flir Systems) com uma resolução óptica de 19200 (160 × 120), precisão ± 2% e sensibilidade térmica <0,06 °C. Os registros termográficos foram realizados a uma distância vertical de 1,5 m da superfície do solo.

Os sensores de termopares foram programados para registrar e armazenar os dados de temperatura da superfície do solo a cada 10 minutos. Os dados foram armazenados no datalogger e, em seguida, transferidos para análises. Enquanto que as imagens térmicas foram registradas a cada hora no intervalo das 10h às 17h, e posteriormente analisados.

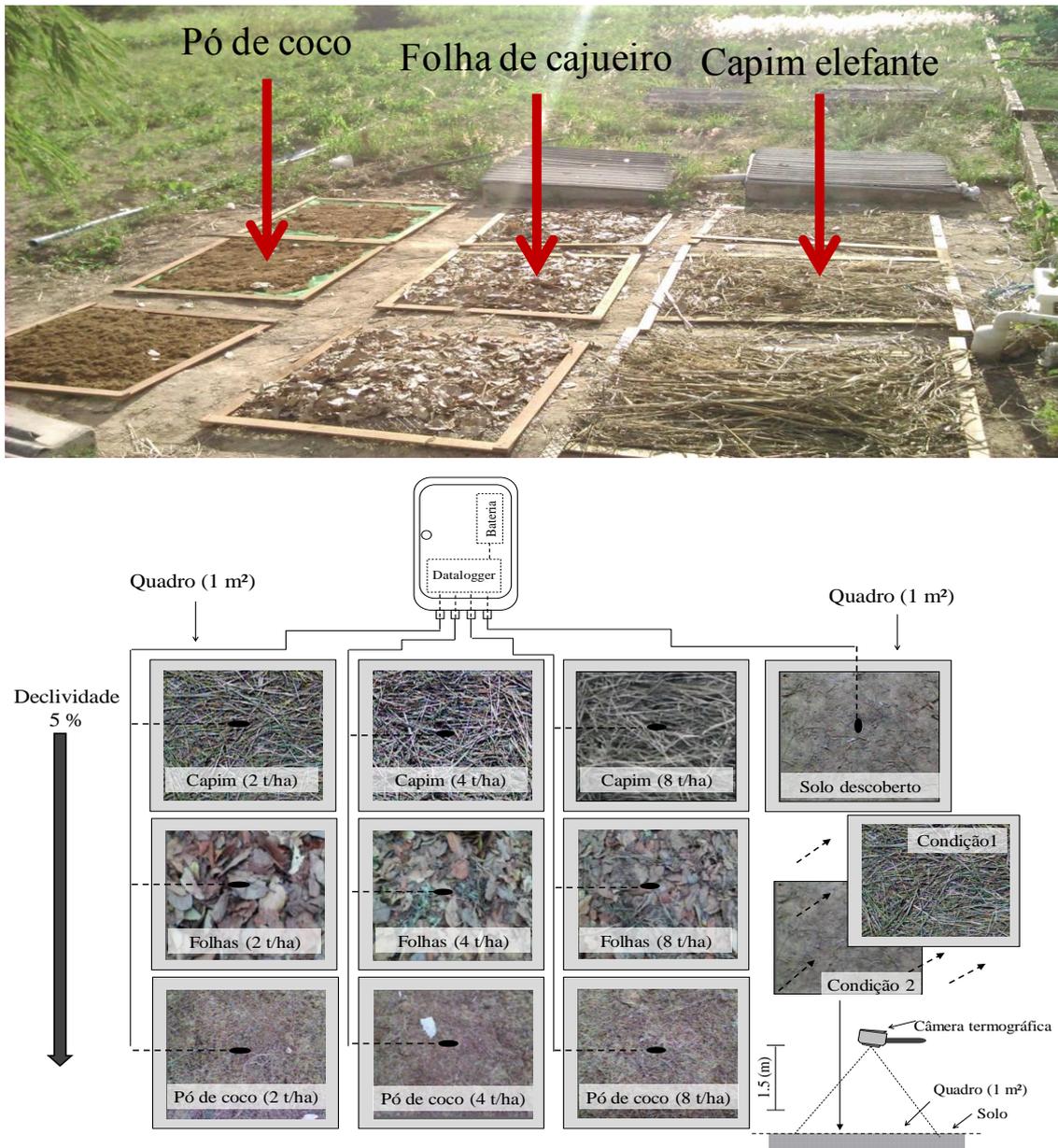
#### 5.4.2. Instalação e condições de cobertura do solo

A variabilidade temporal da temperatura na superfície do solo foi avaliada sob dez condições de cobertura do solo: uma com condição de solo descoberto e três tipos de cobertura com três diferentes densidades de 2, 4 e 8 t ha<sup>-1</sup>. Os tipos de cobertura utilizados para tal avaliação foram: capim elefante seco ao ar, folhas secas de cajueiro e pó de coco (Figura 7).

A cobertura morta não foi diretamente espalhada no solo. Logo, para tal avaliação foram confeccionados nove quadros de madeira com área de 1m<sup>2</sup> e fixada uma tela plástica com abertura de 2×2 cm; no caso do pó de coco, foi necessário utilizar uma tela de malha um pouco mais fina para evitar que o material passasse pela mesma. As diferentes densidades foram aplicadas, e posteriormente as estruturas foram colocadas sobre a superfície do solo (Figura 7).

A confecção dos quadros teve por objetivo obter uma estrutura móvel, que permitiu a obtenção de vários termogramas da superfície do solo abaixo da cobertura morta ao longo do dia, uma vez que, a cada hora, as estruturas com cobertura morta eram retiradas, fazia-se o registro termográfico e em seguida, reposicionava-se

novamente a estrutura sem afetar a superfície do solo, e mantendo-se a mesma densidade (Condição 1 e 2, conforme Figura 7). As estruturas foram posicionadas lado a lado, de modo a obter as mesmas condições experimentais para todas as densidades de cobertura morta (por exemplo, as características do solo, declividade e radiação incidente). Os sensores termopares foram instalados na superfície do solo em ambas as condições de cobertura e solo nu.



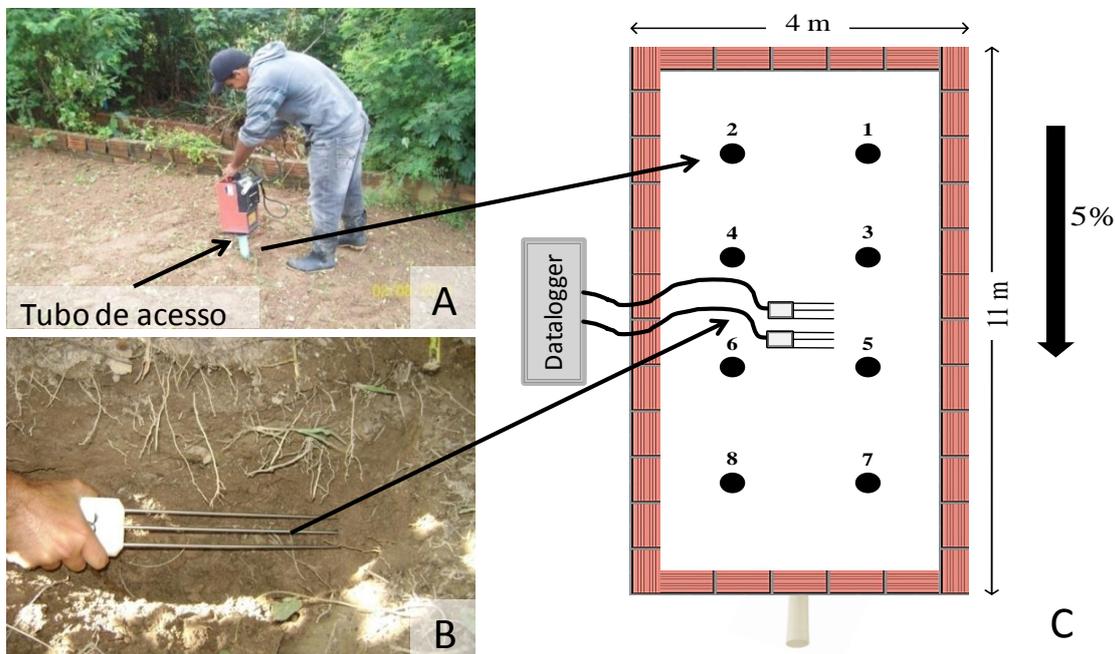
**Figura 7.** Vista parcial da área e representação esquemática do processo de monitoramento: sensores termopares, câmera infravermelha, condições de cobertura do solo (palha seca de capim-elefante, folhas secas de cajueiro e pó de coco) em estruturas móveis

## 5.5. Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal

### 5.5.1. Dinâmica de umidade ao longo do tempo

A investigação da dinâmica temporal da umidade do solo foi realizada por dois métodos indiretos (Sondas de Nêutrons e TDRs). Ambos os métodos oferecem vantagens por serem não destrutivos, possibilitam medidas rápidas e que podem ser repetidas no mesmo ponto, e são amplamente utilizados (Staub et al., 2010).

O monitoramento com a sonda de nêutrons (modelo CPN 503 DR) foi realizado nas camadas de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm de profundidade por meio de oito tubos de acesso instalados em cada parcela de erosão, com monitoramento em escala mensal no período seco, e quinzenal no período chuvoso utilizando sonda de nêutrons (Figura 8). O período experimental compreendeu de janeiro de 2011 a dezembro de 2014, totalizando 52 campanhas de campo. Já o monitoramento em escala horária e de forma contínua na profundidade de 20 cm foi realizado por meio de sondas TDRs (Reflectometria no Domínio do Tempo).



**Figura 8.** (A) Monitoramento da umidade do solo através de sonda de nêutrons; (B) vista parcial da instalação de sonda TDR e (C) croqui da parcela com disposição dos tubos de acesso para leitura da sonda de nêutrons

A calibração das sondas utilizadas para estimativa da umidade do solo foi realizada em campo por meio de método gravimétrico. As equações de calibração das sondas de nêutrons e TDR podem ser vistas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Equações de calibração da sonda de nêutrons (modelo CPN 503DR) nas diferentes camadas, e da sonda TDR para profundidade de 20 cm

Método	Prof. (cm)	Equação	R <sup>2</sup>
Sonda de Nêutrons	0 a 20	Y = 0,4061x - 0,0307	0,958
	20 a 40	Y = 0,4685x - 0,0565	0,989
*TDR	20	Y = 0,0229x - 0,0431	0,900

\*Fonte: Santos et al. (2011)

A escolha dos diferentes métodos teve por objetivo aprofundar a investigação tanto na escala espacial quanto na temporal. A investigação na escala temporal foi mais efetiva utilizando a TDR que permite leitura contínua. Já com relação à escala espacial na presente pesquisa o uso da sonda de nêutrons permitiu medir a umidade do solo em oito diferentes pontos ao longo da parcela, enquanto que a TDR em apenas em dois pontos posicionados praticamente no mesmo local e em uma única camada (20 cm).

Com base nos dados de umidade de TDR realizou-se uma comparação entre as médias dos tratamentos, adotou-se o teste de Tukey ao nível de significância de 5%. O programa utilizado foi Assistência Estatística – ASSISTAT 7.7 beta.

### 5.5.2. Análise de estabilidade temporal da umidade

Para a análise de estabilidade temporal foi utilizada a técnica proposta por Vachaud et al. (1985), baseada no cálculo da diferença relativa a qual permite a análise dos desvios entre os valores observados individualmente no espaço e a média entre eles (Equação 2).

$$\delta_{ij} = \frac{(\theta_{ij} - \bar{\theta}_j)}{\bar{\theta}_j} \quad (2)$$

Em que,

$\theta_{ij}$  é o valor de umidade na posição  $i$  no momento  $j$ ;

$\bar{\theta}_j$  é a umidade média de todas as posições no espaço, no momento  $j$ ;

Onde a média da variável no instante  $j$ , foi calculada pela Equação 3:

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{ij} \quad (3)$$

Para cada posição  $i$ , será calculada a média dos valores de diferença relativa (Equação 4). Em que  $m$  é o número de meses analisados.

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (4)$$

Enquanto que o desvio-padrão em torno dessa média, em cada posição, será determinado pela Equação 5.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2} \quad (5)$$

As diferenças relativas médias, expressas em termos percentuais, associadas ao respectivo desvio-padrão no tempo e ordenadas da menor para a maior, permitiram a identificação da posição cujos valores se aproximam da média no espaço, em qualquer momento. Quanto menor o desvio padrão, maior a confiabilidade da medida naquele ponto para estimar a média geral.

A validação do ponto de medição de umidade mais estável foi realizada através da análise da correlação entre a média da resposta do ponto estável e a média de todos os demais pontos de monitorados (Souza et al., 2011; Hu et al., 2012; Fontes Júnior et al., 2013).

## 5.6. Modelagem da dinâmica de umidade no solo por meio do Hydrus-1D

A metodologia descrita neste item encontra-se na íntegra no artigo “Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano”, publicado na Revista Brasileira de Ciências Agrárias como parte da presente tese (em anexo).

A modelagem da dinâmica de umidade do solo foi realizada com uso de dados de sondas TDR (CS616 da Campbell Scientific), instaladas na profundidade de 20 cm. A utilização das sondas TDR permitiu um monitoramento diário contínuo. O período de investigação foi de 01 de Janeiro de 2012 a 31 de Maio de 2013. A modelagem foi realizada para duas diferentes condições de cobertura (Parcela com Cobertura Natural-PCN e Parcela com solo Descoberto-PD). Em cada parcela foram instaladas duas sondas TDR. No presente trabalho, foram considerados os valores médios.

O sistema de coleta e armazenamento de dados foi composto por equipamentos da Campbell Scientific (TDR100, multiplexador SDMX50 e um datalogger CR1000). E o software adotado para modelagem dos dados foi o Hydrus-1D.

### 5.6.1. Modelo Hydrus 1-D

#### A) Formulação matemática

O modelo Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2009) simula fluxo de água e transporte de solutos, em meios porosos parcialmente saturados, em regime permanente ou transiente. O modelo Hydrus-1D resolve uma versão modificada da equação de Richards, conforme a Equação 6:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (6)$$

em que, K é a condutividade hidráulica, h é o potencial matricial (L),  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água no solo ( $L^3L^{-3}$ ), t é o tempo (T), x é a coordenada espacial (L),  $\alpha$  é o ângulo de direção do fluxo e o eixo vertical ( $\alpha = 0^\circ$  para fluxo vertical,  $\alpha = 90^\circ$  para fluxo horizontal, e  $\alpha = 0^\circ < \alpha < 90^\circ$  para fluxo inclinado) e S é o termo de extração de água ( $L^3L^{-3}T^{-1}$ ).

O modelo utiliza a equação de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) para determinar a relação entre condutividade hidráulica não saturada, a umidade volumétrica e o potencial mátrico do solo, como segue (Equação 7):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[ 1 + (\alpha|h|^n) \right]^m} \quad (7)$$

em que  $\theta_r$  é a umidade residual ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\theta_s$  a umidade na saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), e  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são os parâmetros de ajuste do modelo.

O parâmetro empírico de ajuste da curva  $m$  é obtido pela relação  $m = 1 - \frac{1}{n}$ , proposta por Mualem (1976) e van Genuchten (1980). A função de condutividade hidráulica é escrita como:

$$K = K_s S_e^\ell [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (8)$$

em que  $\ell$  é o parâmetro de inclinação (Mualem, 1976), adotado igual a 0,5, para a maioria dos solos,  $S_e$  é a saturação efetiva e  $K_s$  é a condutividade hidráulica do solo saturado.

#### B) Dados de entrada e calibração do modelo

Consideraram-se as perdas por interceptação e escoamento superficial, na parcela com cobertura de caatinga. Para estimativa da interceptação, utilizou-se as Classes de Precipitação (CP) e perdas por interceptação média (% da precipitação total) proposta por Izídio et al. (2013) (Tabela 4).

**Tabela 4.** Classes de Precipitação (CP) e perdas por interceptação média (% da precipitação total)

Classes de Precipitação (CP)	Interceptação (%)	Interceptação adotada (%)
CP > 10 mm	27,6 ± 18,3	20,0
10 ≤ CP < 20 mm	9,9 ± 7,5	9,9
20 ≤ CP < 40 mm	12,3 ± 7,5	10,0
CP ≥ 40 mm	14,4 ± 8,8	14,4

Fonte: Izídio et al. (2013)

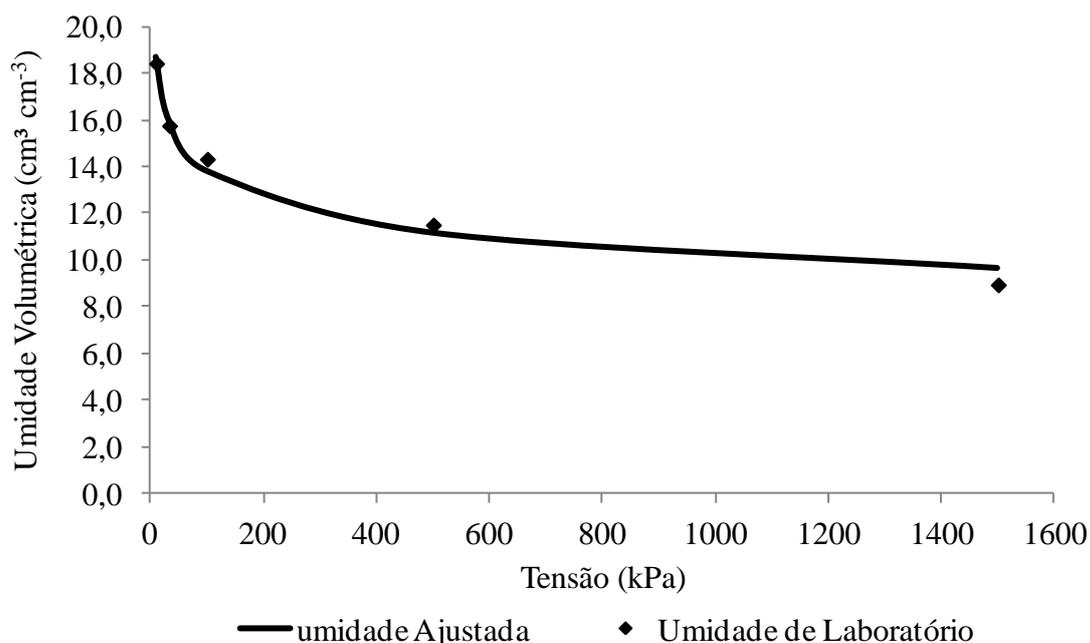
A estimativa do volume escoado foi realizada utilizando caixas coletoras de enxurrada instaladas no final de cada parcela experimental. Após um evento de chuva

realizava-se a leitura do nível da caixa, e de posse da área da mesma, encontrava-se o volume total escoado por m<sup>2</sup>. Logo, a precipitação efetiva que chegou ao solo foi determinada pela Equação 9.

$$P_{\text{efetiva}} = P_{\text{total}} - I - ES \quad (9)$$

em que P é a precipitação (mm), I é a interceptação (mm) e ES é o escoamento superficial (mm).

As medidas de campo de condutividade hidráulica do solo saturado foram determinadas por Silva et al. (2012), utilizando o permeâmetro de Guelph (Tabela 1). A curva de retenção de água no solo foi determinada em laboratório por meio do extrator de Richards e ajustada pelo modelo de van Genuchten (Figura 9).



**Figura 9.** Curva característica do Argissolo Amarelo Distrófico típico

Os parâmetros de ajuste estimados para o modelo de van Genuchten (1980), podem ser vistos na Tabela 5.

**Tabela 5.** Parâmetros de ajuste estimados pela equação de van Genuchten (1980) e coeficiente de determinação entre a umidade de laboratório e ajustada pelo modelo

$\theta_s$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	$\theta_r$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	$\alpha_{vG}$ kPa <sup>-1</sup>	n	m	R <sup>2</sup>
0,30	0,02	3,631	1,132	0,116	0,982

$\theta_s$  - umidade de saturação;  $\theta_r$  - umidade residual;  $\alpha_{vG}$  - parâmetro alfa de van Genuchten; n e m - parâmetros de ajuste experimental

As simulações nas parcelas experimentais foram realizadas para um período de um ano e cinco meses (2012 a 2013). Foram utilizados 366 dias para calibração e ajuste (ano de 2012) e 151 dias para validação (ano de 2013).

Com base nos dados de campo (textura do solo, curva característica e condutividade hidráulica do solo saturado), realizou-se o processo de calibração do modelo. Os parâmetros calibrados podem ser vistos na Tabela 6. Para condição de contorno superior, utilizou-se fluxo variável de eventos diários de chuva e de evapotranspiração, para condição de contorno inferior considerou-se a drenagem livre e para inicialização do modelo utilizou-se a primeira leitura umidade medida pela sonda TDR. Para discretização dos dados, considerou-se apenas a camada subsuperficial (0–30 cm). De acordo com Santos et al. (2011), a área experimental apresenta declividade média de 5%. Os dados de textura apresentados na Tabela 1 foram inseridos no Hydrus-1D. Posteriormente, realizou-se a calibração por meio de ajustes dos parâmetros do modelo de van Genuchten, e da condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 6).

**Tabela 6.** Parâmetros de calibração do modelo Hydrus para as diferentes condições de cobertura

Cobertura	Ano	$\theta_r$ (cm cm <sup>-1</sup> )	$\theta_s$ (cm cm <sup>-1</sup> )	$\alpha_{vG}$ (kPa <sup>-1</sup> )	n	Ks (cm dia <sup>-1</sup> )	T
Solo	2012	0,028	0,38	0,028	1,489	180	0,5
Descoberto	2013	0,028	0,38	0,028	1,489	180	0,5
Cobertura	2012	0,028	0,38	0,028	1,489	200	0,5
Natural	2013	0,028	0,38	0,028	1,489	200	0,5

$\theta_r$  – umidade residual do solo,  $\theta_s$  – umidade de saturação do solo,  $\alpha_{vG}$  e n – parâmetros da equação de van Genuchten, Ks – Condutividade hidráulica do solo saturado, T – parâmetro de tortuosidade da função de condutividade hidráulica.

### C) Considerações para estimativa de fluxo na superfície

A condição de contorno superior foi especificada conforme a precipitação, e os valores particionados da evapotranspiração em transpiração e evaporação do solo descoberto. Para estimativa da evaporação do solo na condição de cobertura natural, utilizou-se os valores de saída de evaporação acumulada estimada pelo modelo para condição de solo descoberto, e o índice de área foliar. Tais valores foram gerados durante a calibração, na qual utilizou-se os dados de evapotranspiração de referência estimada pelo modelo de Penman-Monteith-FAO. De posse dos dados de evaporação do solo, foi possível dividir os processos de transpiração e evaporação para condição do solo vegetado conforme o modelo proposto por Vanclouster et al. (1994). O modelo estima a evaporação, em função do índice de área foliar (IAF), e da evapotranspiração potencial da cultura, segundo as Equações 10 e 11:

$$E_p = \exp^{(-0.6 \text{ IAF})} ET_C \quad (10)$$

$$T_p = ET_C - E_p \quad (11)$$

em que IAF é o índice de área foliar ( $L L^{-2}$ ),  $ET_C$  é a taxa de evapotranspiração potencial da cultura ( $LT^{-1}$ ),  $E_p$  é a taxa de evaporação potencial ( $LT^{-1}$ ) e  $T_p$  é a taxa de transpiração potencial ( $L T^{-1}$ ).

No presente trabalho, considerou-se diferentes IAF para parcela com cobertura natural, onde foram calibrados valores após os primeiros eventos de chuva, uma vez que a caatinga apresenta sazonalidade do índice de área foliar ao longo do tempo, e a mesma responde rapidamente a eventos chuvosos. A Tabela 7 apresenta os valores calibrados para IAF.

**Tabela 7.** Valores de índice de área foliar para os diferentes períodos

2012		2013	
Dias	IAF (m m <sup>-2</sup> )	Dias	IAF (m m <sup>-2</sup> )
01 a 18	0,30	01 a 72	0,30
19 a 199	0,95	73 a 115	0,95
200 a 243	0,40	116 a 151	0,80
244 a 366	0,70		

Admitindo-se que o solo em condição sem cobertura vegetal perde mais água para atmosfera, para fins de calibração considerou-se que a taxa de evaporação na parcela nessa condição superou a evapotranspiração potencial em 10%.

#### D) Avaliação do desempenho do modelo

O modelo foi avaliado com base na Raiz do Erro Quadrático da Média (RMSE), Índice de Concordância de Willmott (d) e a Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NSE) (Zeng et al., 2013).

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - m| + |P_i - m_e|)^2} \right\} \quad (13)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - m)^2} \quad (14)$$

em que  $O_i$  é o valor observado,  $P_i$  é o valor predito,  $n$  é o número de observações,  $m$  é o valor médio dos dados medidos e  $m_e$  é o valor médio dos dados estimados.

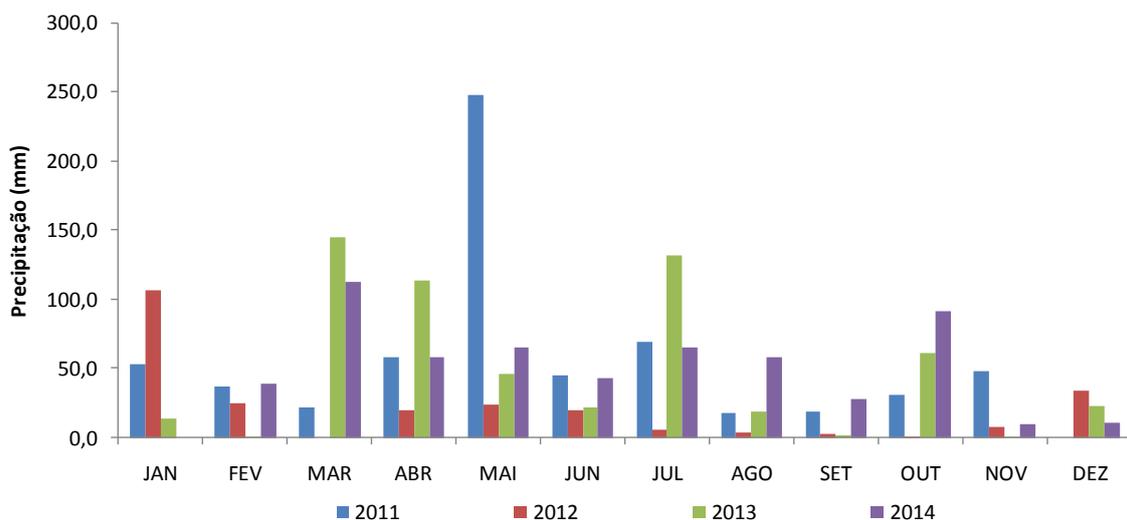
Os valores da Raiz do Erro Quadrático da Média- (RMSE), do Índice de Concordância de Willmott (d) e da Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NS) medem a precisão do modelo, e variam de 0,0 a 1,0. Quanto mais próximo à zero (0) for

o valor de RMSE, mais preciso é o modelo. Já o índice de concordância de Willmott (d) e a Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NS) indicam que o modelo é mais preciso quando os mesmos aproximam-se de um (1).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Aspectos climáticos

A distribuição mensal da precipitação no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 pode ser vista na Figura 10.



**Figura 10.** Distribuição do total mensal de chuva na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

O ano de 2012 apresentou-se extremamente seco, com total anual precipitado de apenas 250,2 mm. Montenegro et al. (2013c) investigaram uma série histórica da Bacia em estudo, e com base nos resultados observados a chuva acumulada no ano de 2012 superou apenas os anos de 1915 (158,0 mm) e 1998 (242,4 mm), sendo esses anos considerados atípicos, e que realmente o período de estiagem é cíclico, sendo de importância para um planejamento e um gerenciamento mais adequado para enfrentamento da seca.

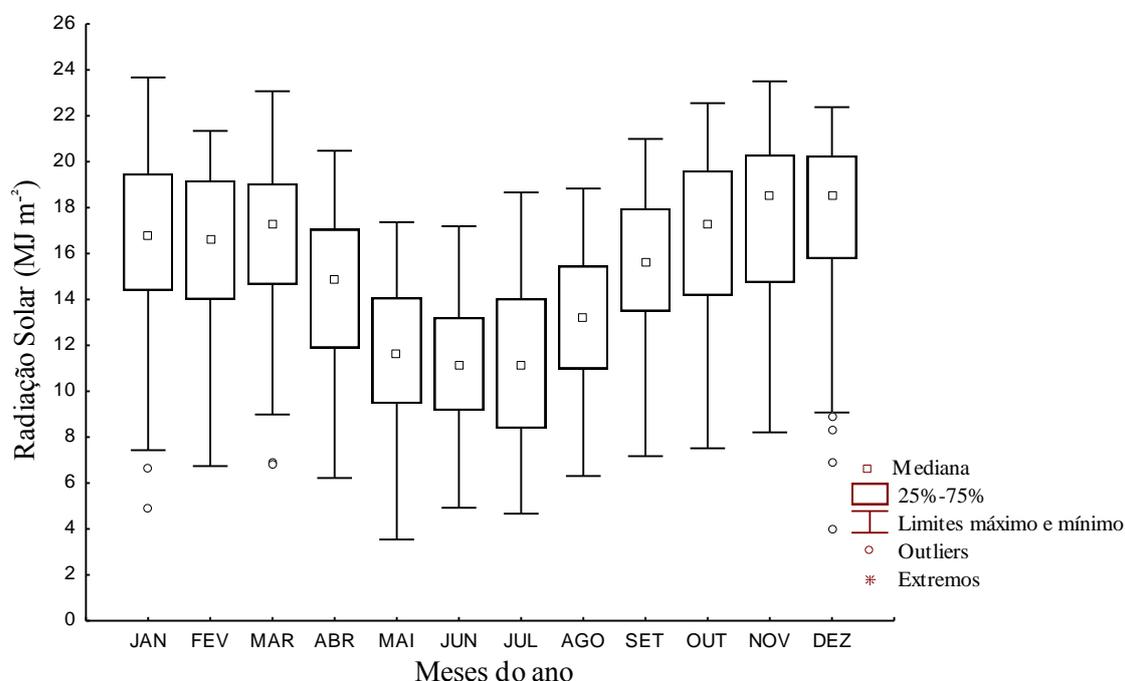
A variabilidade temporal da precipitação fica bastante evidente, tanto entre os meses quanto entre os anos. Tal comportamento é típico da região, em que ocorre má distribuição da chuva com presença de eventos de alta intensidade e curta duração. Pode-se observar que os totais precipitados em 2011 (638,2 mm), 2013 (579,5 mm) e 2014 (586,1 mm) também ficaram abaixo da média histórica da região. Adicionalmente, em 2013 houve uma concentração de eventos chuvosos nos meses de março (145,0 mm) e abril (113,8 mm), que representou 44,7% do total precipitado no ano. Vale ressaltar

que o total precipitado no mês de março correspondeu a 20,0% do total anual, tendo sido concentrado em apenas dois eventos de 71,6 e 73,4 mm.

Os totais precipitados nos anos de 2011 e 2014 apresentaram uma melhor distribuição temporal, com registros de eventos de chuva em todos os meses, com exceção do mês de dezembro no ano de 2011 e de janeiro em 2014. Porém, vale ressaltar que 67,4% do total anual de 2011 ficaram concentrados na quadra chuvosa (março a julho), enquanto que no ano de 2014 para o mesmo período foi de 59,3%.

O ano de 2014 foi o que apresentou a melhor distribuição da precipitação ao longo do ano. A variabilidade da chuva afeta diretamente a disponibilidade de água no solo, bem como a sua dinâmica e padrão temporal. Tais reflexos vêm sendo sentidos na região, que passou por 4 anos com chuvas abaixo da média, o que causa baixa disponibilidade hídrica, colocando em risco principalmente a exploração agrícola de sequeiro. A variabilidade espaço-temporal da precipitação também afeta diretamente os processos hidrológicos, elevando o grau de incerteza dos diferentes processos envolvidos.

A distribuição da radiação solar em escala diária para os diferentes meses no período de 2011 a 2014 pode ser vista na Figura 11.

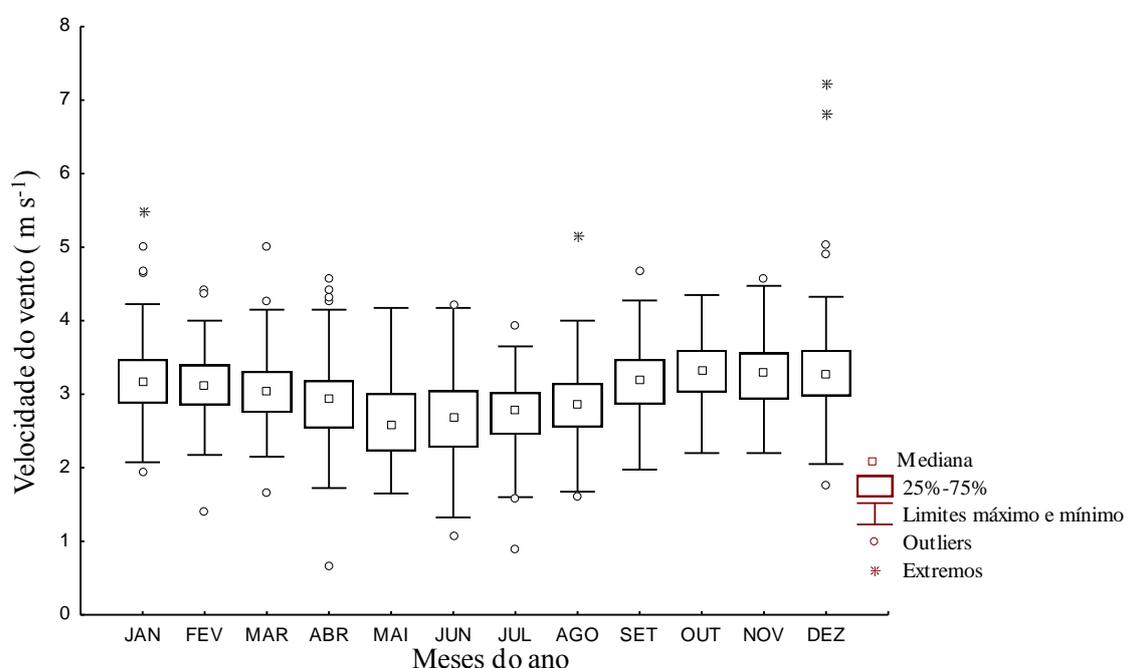


**Figura 11.** Variabilidade temporal da radiação solar diária na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

Valores discrepantes “outlier” foram observados nos meses de janeiro, março e dezembro. Possivelmente tal comportamento pode estar associado à nebulosidade que ocorre nesses meses, antecedendo a ocorrência das chuvas de verão, principalmente nos meses de janeiro e dezembro. O mês de março historicamente é um dos meses mais chuvosos. Em dias nublados e/ou chuvoso, a incidência de radiação solar tende a ser baixa.

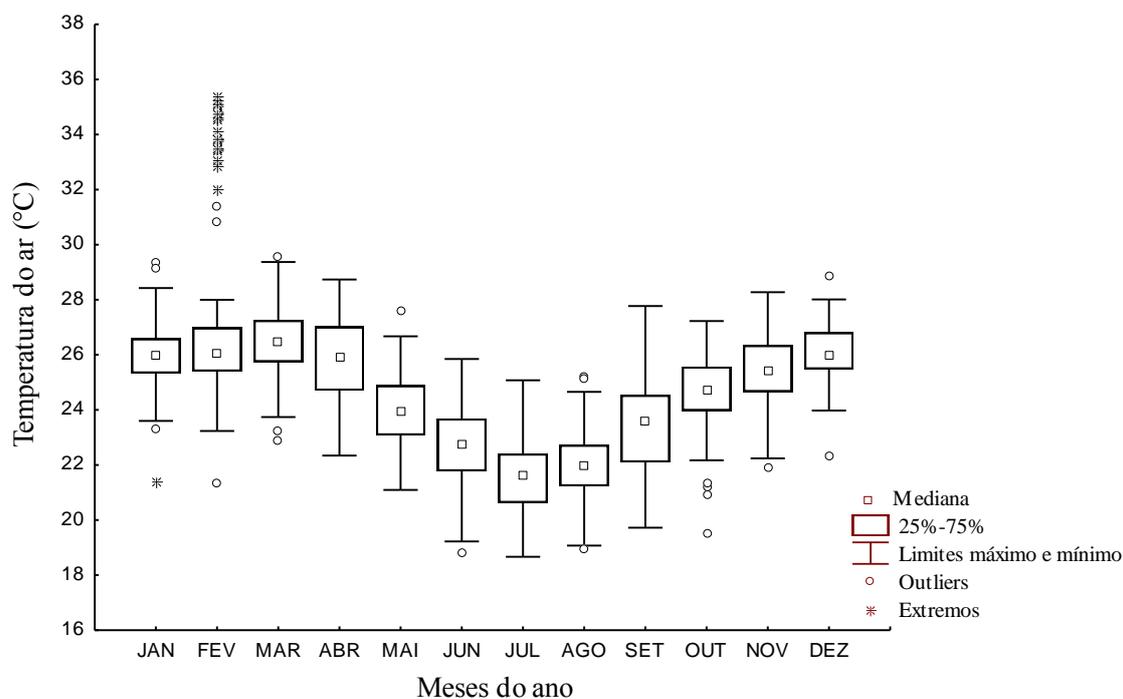
As menores variações da radiação solar ocorrem no mês de junho. A distribuição da radiação solar de uma forma geral apresenta comportamento simétrico, com exceção dos meses de março, abril, outubro, novembro e dezembro, que apresentam distribuição assimétrica negativa. O maior valor de radiação solar diária ocorreu no mês de janeiro ( $23,7 \text{ MJ m}^{-2}$ ) e o menor em maio ( $3,5 \text{ MJ m}^{-2}$ ).

Com base nos valores médios diários da velocidade do vento, observou-se que variação segue a mesma tendência nos diferentes meses, com ocorrência de valores discrepantes praticamente em todos os meses, com exceção de maio e outubro (Figura 12). Além da ocorrência de valores discrepantes, os meses de janeiro, agosto e dezembro apresentaram valores extremos. A maior amplitude da amostra foi observada no mês de junho. Enquanto que a menor ocorreu em fevereiro.



**Figura 12.** Variação temporal da velocidade do vento média diária na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

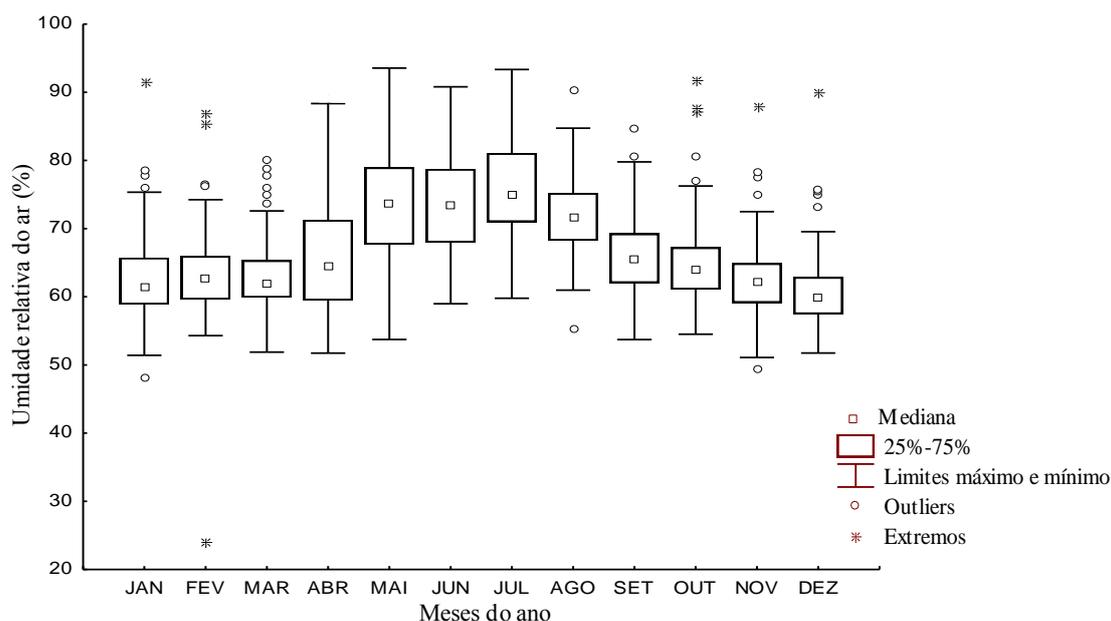
A temperatura do ar é uma variável que apresenta elevada variação ao longo do dia, podendo apresentar amplitudes térmicas superiores a 20 °C. É uma variável de suma importância, uma vez que está relacionada a diversos processos, dentre eles: a evaporação da água e a transpiração da planta. A sua variação ao longo do tempo pode ser vista na Figura 13.



**Figura 13.** Variação da temperatura do ar média diária ao longo do tempo na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

Durante o período investigado (2011 a 2014), o mês de fevereiro foi o que apresentou os maiores valores de temperatura média diária, sendo esses considerados valores atípicos. Valores discrepantes só não foram observados nos meses de abril, julho e setembro. Os meses de abril e setembro não apresentaram valores discrepantes, porém pode-se observar maior variabilidade dos dados, que pode ser confirmada pela diferença entre a distância interquartílica. O período de temperatura mais amena estende-se de junho a agosto, com temperatura média variando entre 17 e 26 °C. A maior variabilidade foi observada no mês de setembro, em que também foi observada a maior amplitude da amostra (diferença entre os limites máximo e mínimo).

A distribuição da umidade relativa em escala diária para os diferentes meses no período de 2011 a 2014 pode ser vista na Figura 14.

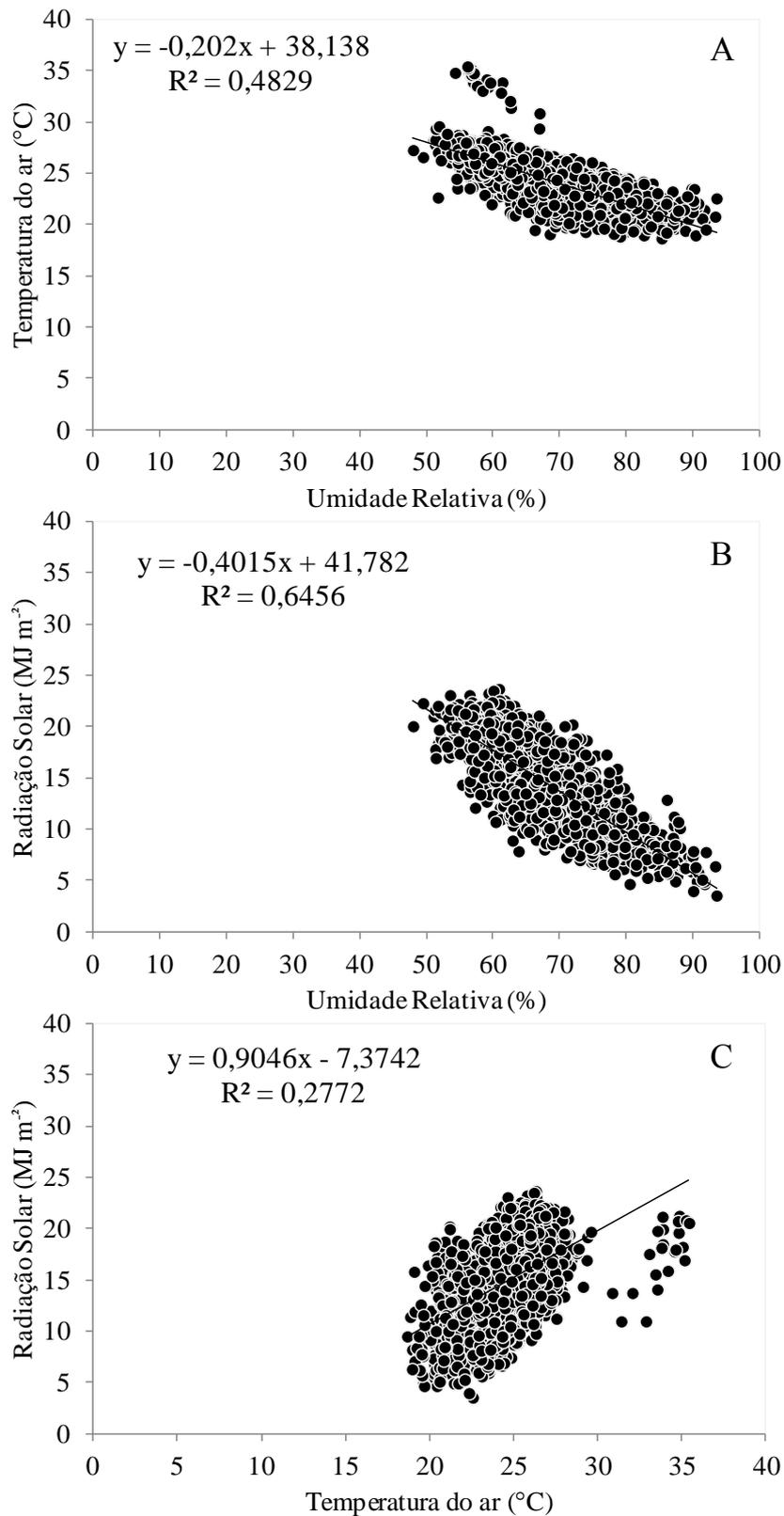


**Figura 14.** Variação da umidade relativa do ar ao longo do tempo na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

Os maiores valores de umidade relativa são observados no período chuvoso (abril a julho). Adicionalmente observa-se que nesse período ocorre a maior variabilidade dos dados, porém não há presença de valores discrepantes.

Valores extremos foram observados nos meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro. Esses períodos são considerados mais secos, porém apresentaram valores de umidade relativa próxima e/ou superior a 90%, sendo esses valores considerados atípicos. Desconsiderando os valores discrepantes (atípicos), pode-se observar que o valor mínimo da umidade relativa média foi superior a 50% em todos os meses. A maior variabilidade da umidade relativa foi observada entre os meses de abril a julho.

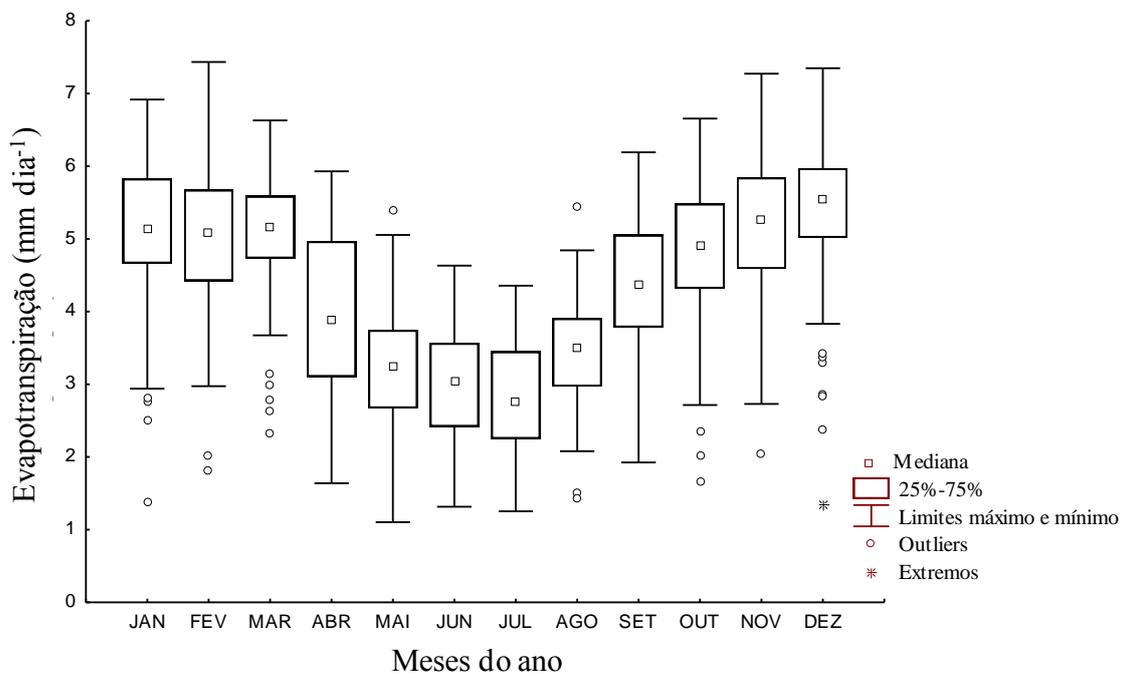
Buscando-se investigar a relação entre as diferentes variáveis meteorológicas realizou-se um diagrama de dispersão cartesiano (x-y), a fim de observar a ocorrência de tendências (lineares ou não) entre duas variáveis, bem como observar a existência de valores discrepantes de uma variável em relação à outra (Figura 15).



**Figura 15.** Correlação entre as variáveis meteorológicas; (A) umidade relativa x Temperatura; (B) umidade relativa x radiação solar; e (C) radiação solar x temperatura na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

O grau de associação entre as variáveis foi realizado a partir de dados diários de janeiro de 2011 a dezembro de 2014. A temperatura do ar apresentou baixo grau de associação com a umidade relativa e com a radiação solar, cujos coeficientes de correlação (R) foram de 0,694 e 0,525, respectivamente (Figura 15). Já a radiação solar e a umidade relativa apresentaram relação moderada, cujo coeficiente de determinação foi igual a 0,802.

Na Figura 16 pode-se observar a variabilidade e a distribuição temporal da evapotranspiração de referência diária estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO. Pode-se observar que a evapotranspiração (ET<sub>o</sub>) apresentou comportamento semelhante a temperatura do ar e a radiação solar, ou seja, menor no período chuvoso e maior no período seco. Esta tendência também acontece com a umidade relativa, porém de forma inversa.

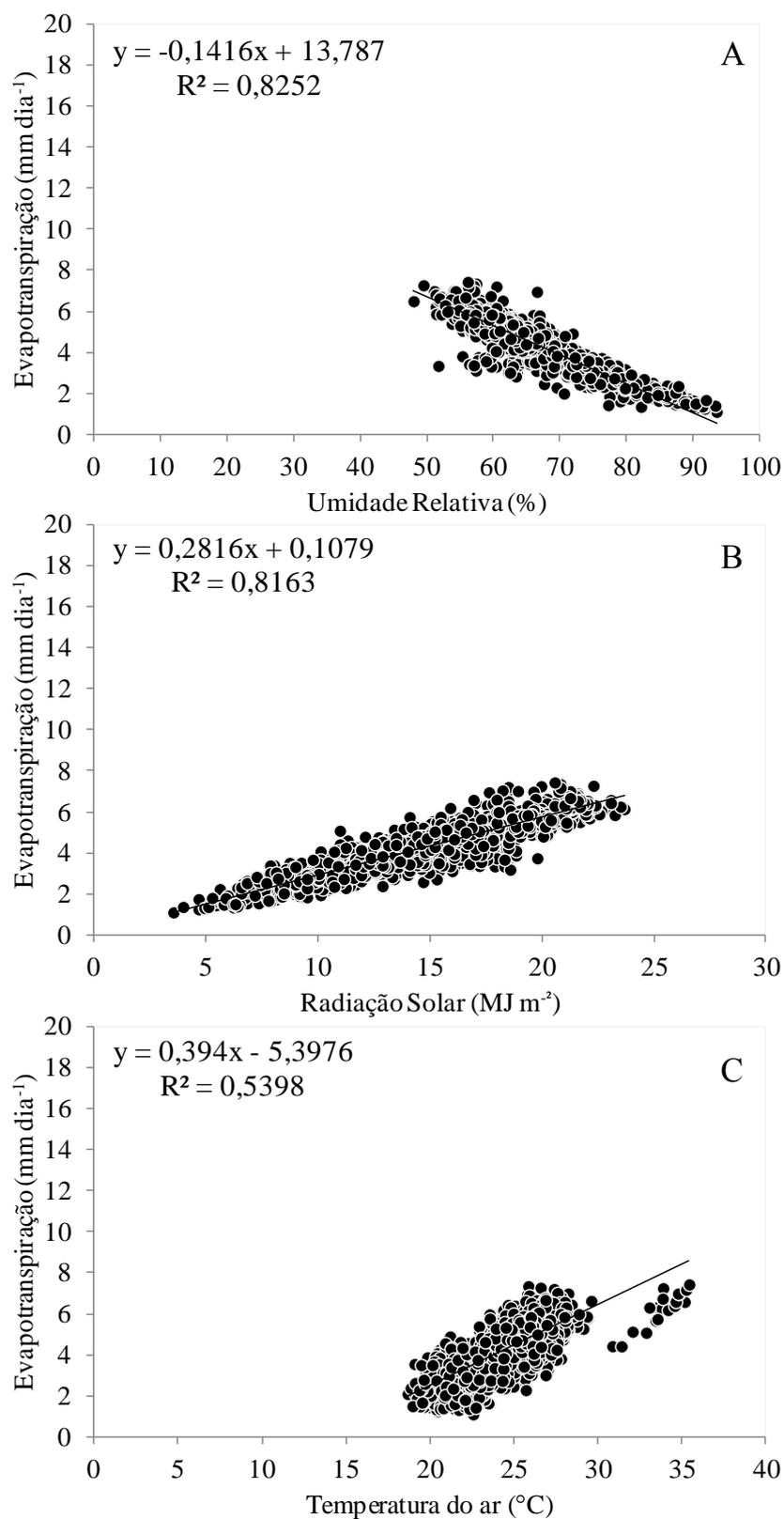


**Figura 16.** Variação temporal da evapotranspiração de referência diária na Bacia do Mimosa, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

A maior variabilidade foi observada no mês de abril, que pode estar associada ao início da estação chuvosa na região, ou seja, é o mês de transição do período seco para o chuvoso. Essa variação também foi observada nos dados de temperatura e umidade relativa. Os menores valores de evapotranspiração foram observados nos meses de

junho e julho. Valores discrepantes ou “outliers” não ocorreram nos meses de abril, junho, julho e setembro.

A estimativa de forma indireta da evapotranspiração de referência diária é sempre de grande interesse no manejo e conservação de água e solo. E sua correlação com variáveis de mais fácil estimativa torna-se desejável. Pode-se observar que a evapotranspiração apresentou tendências, e grau de relacionamento forte com a umidade relativa ( $R^2 = 0,825$ ) e com a radiação solar ( $R^2 = 0,816$ ) (Figura 17).

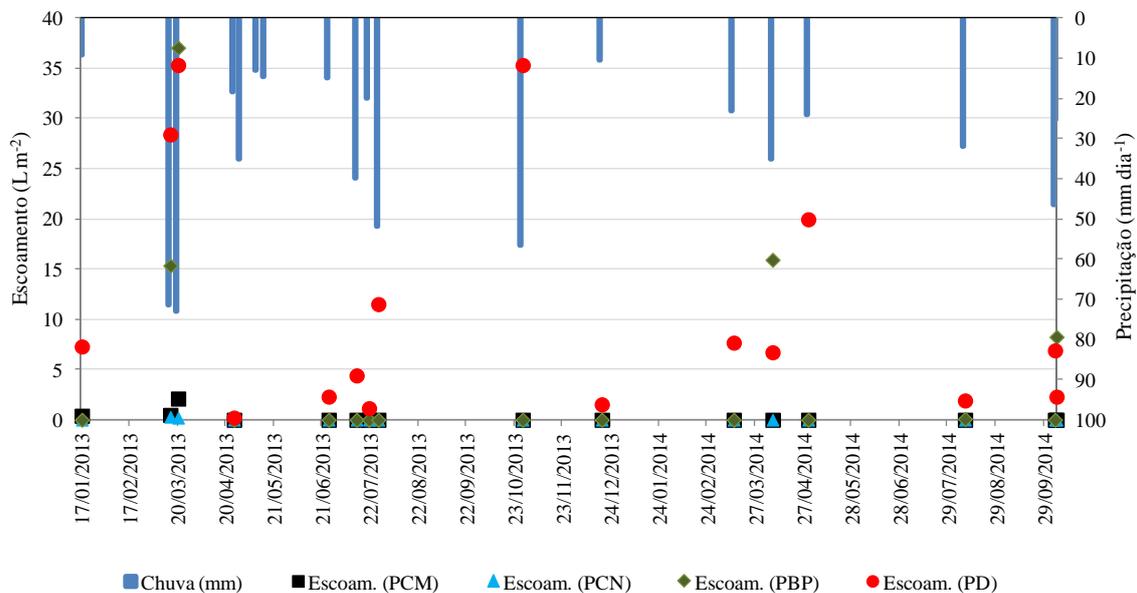


**Figura 17.** Correlação entre da evapotranspiração de referência com a umidade relativa (A), radiação solar (B) e com a temperatura (C) na Bacia do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

Embora com baixos coeficientes angulares. A relação entre a evapotranspiração e a temperatura do ar foi moderada ( $R^2 = 0,539$ ). Os resultados indicam que, na ausência dos parâmetros da equação de Penman-Monteith-FAO é possível fazer uma estimativa da evapotranspiração diária através da radiação solar e/ou da umidade relativa.

## 6.2. Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos em escala de parcela

A mensuração do escoamento superficial para as diferentes condições de coberturas estudadas (Parcela com Cobertura Natural – PCN, Parcela com solo Descoberto – PD, Parcela com Cobertura Morta – PCM e Parcela com Barramento de Palma – PBP) pode ser vista na Figura 18. Durante o período analisado (janeiro de 2013 a dezembro de 2014), 19 eventos que geraram escoamento superficial na parcela descoberta foram coletados. O número baixo de eventos se deve a escassez de chuva no período investigado.



**Figura 18.** Resposta do escoamento superficial em relação à precipitação para as diferentes condições de cobertura do solo estudado

Dos 19 eventos de chuva coletados que geraram escoamento superficial na parcela descoberta, pode-se observar apenas 2 promoveram escoamento nas parcelas com cobertura natural e com cobertura morta, e 5 desses eventos escoaram na parcela com

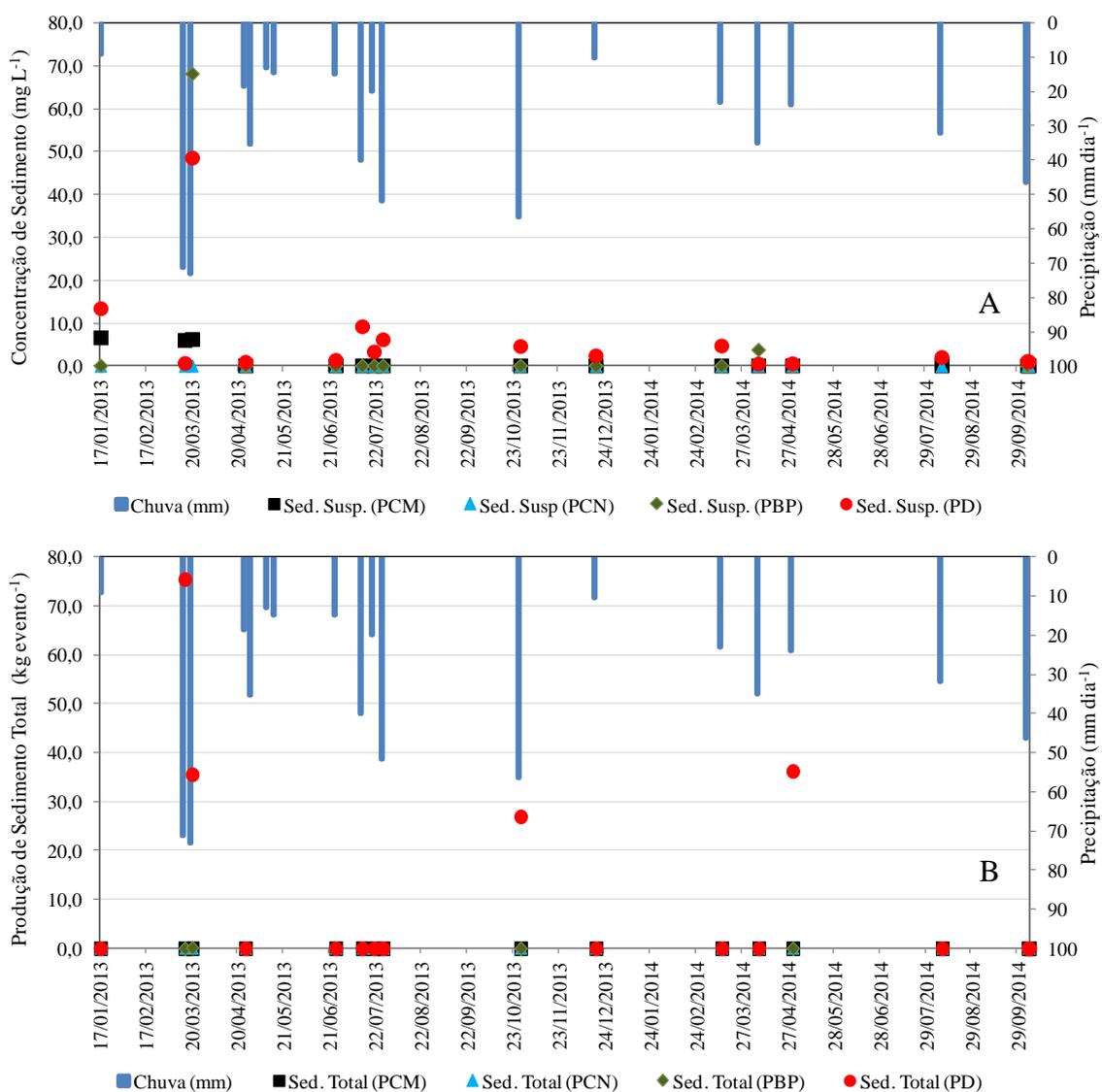
barramento de palma. Os maiores eventos de chuva foram observados nos dias 14/03/2013 (71,4 mm) e 19/03/2013 (73,2 mm).

Pode-se observar que o escoamento superficial em resposta ao evento de chuva do dia 19/03 apresentou ordem de grandeza similar para duas condições de cobertura de solo descoberto e o com barramento de palma. O escoamento um pouco mais elevado na parcela com barramento de palma no dia 19/03/2013 possivelmente está associado à umidade antecedente do solo, que estava mais elevada em função do evento chuvoso ocorrido no dia 14/03/2013.

Os resultados encontrados apontam a eficiência do uso da cobertura morta na redução da geração de escoamento, com consequente manutenção de água no solo ao longo do tempo, sendo esse um fator fundamental para a produção de sequeiro, principalmente em anos com escassez hídrica e a má distribuição da chuva. Resultados corroboram com os observados por Santos et al. (2009); Santos et al. (2010) Santos et al. (2011) e Borges et al. (2013).

A dinâmica de escoamento na parcela com cobertura morta mostrou-se similar à condição de cobertura natural (Figura 18). Adicionalmente, o uso de palma forrageira como barreira física se mostrou com uma técnica promissora, principalmente para região que apresenta escassez de material vegetal que possa manter o solo completamente coberto ao longo do ano e por ser uma cultura resistente à seca. O uso da palma ainda possibilita a utilização da mesma para complementação da alimentação animal.

Nas Figuras 19A e 19B pode-se observar ao longo do tempo a produção de sedimentos em suspensão e o sedimento total em resposta aos eventos de chuva para as condições de coberturas estudadas. De forma geral, pode-se observar baixa produção de sedimento em suspensão para as quatro condições de cobertura do solo, com exceção do pico ocorrido no dia 19/03/2013 nas parcelas com barramento de palma e solo descoberto.



**Figura 19.** Concentração de Sedimento (A); e Produção de Sedimento Total (B) em resposta ao escoamento superficial por evento de chuva para as diferentes condições de coberturas de solo estudadas

Dos 19 (dezenove) eventos de chuva observados que geraram escoamento superficial com consequente produção de sedimentos em suspensão na parcela descoberta, pode-se observar que 4 (quatro) desses eventos produziram também sedimento de fundo. Nas demais condições de cobertura não foram observadas sedimentação de fundo (Figura 19B). Silva Junior (2010), em investigação do escoamento superficial e produção de sedimentos na Bacia em estudo, observou que os valores de concentração instantânea de sedimento suspenso dos eventos de descarga no

Riacho Mimoso, amostrados no ano de 2009 e 2010, variaram entre 58,97 e 550,10 mg L<sup>-1</sup>, com um valor médio de 212,43 mg L<sup>-1</sup>.

Os resultados encontrados apontam que as práticas conservacionistas mostraram eficiência no controle da perda de solo. A perda de solo na condição de cobertura natural para o período estudado foi insignificante. Vale ressaltar que apesar da palma forrageira ter apresentado perda de água em alguns eventos de chuva, conforme figura apresentada anteriormente (Figura 18), a mesma apresentou-se como uma alternativa altamente viável e eficiente no controle da perda de solo para região semiárida.

Diante da importância dos dois eventos extremos de chuva ocorridos nos dias 14 e 19 de março de 2013, buscou-se fazer uma análise mais detalhada dos mesmos. Observou-se uma similaridade na duração dos eventos, bem como no total precipitado. Tal comportamento pode estar associado ao padrão de chuva da região, onde a maioria dos eventos ocorrem no período da tarde para a noite. Tal condição foi evidenciada por Silva et al. (2006), em caracterização de eventos chuvosos na Bacia do Jatobá-PE.

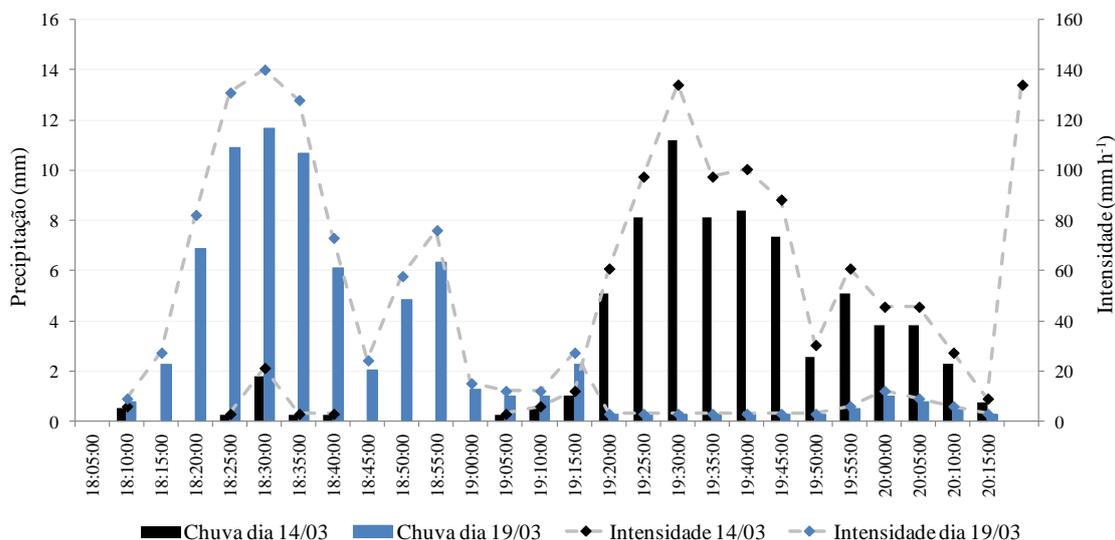
A intensidade de uma chuva é determinada por meio da divisão da lâmina total por sua duração, porém é necessário levar em consideração os picos de intensidade ao longo do evento. Observa-se, na Tabela 8, a variação da intensidade ao longo dos eventos investigados.

**Tabela 8.** Caracterização dos eventos extremos dos dias 14 e 19 de março de 2013

Data	Evento	Início	Término	Chuva (mm)	Tempo (min.)	Tempo (h)	Intensidade (mm/h)
14/03/2013	1	18:05:00	18:10:00	0,51	5	0,083	6,10
	2	18:20:00	18:40:00	2,54	20	0,333	7,62
	3	19:00:00	20:15:00	68,33	75	1,250	54,67
	Único*	18:05:00	20:15:00	71,38	130	2,167	32,94
19/03/2013	1	18:05:00	20:15:00	72,894	130	2,167	33,64
	2	20:20:00	20:25:00	0,254	5	0,083	3,05
	3	23:45:00	23:50:00	0,254	5	0,083	3,05
	Único*	18:05:00	20:25:00	73,148	140	2,333	31,35

\* Considerou-se como evento único quando a soma de separação entre as chuvas era no máximo 30 minutos.

Pode-se perceber diferenças consideradas entre os valores no dia 14/03, em que o evento total apresentou interrupções durante sua duração. A precipitação apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, e sua intensidade muda ao longo de sua ocorrência, tal comportamento ficou evidenciado nos eventos de chuva observados (Figura 20).



**Figura 20.** Discretização dos eventos de chuva acumulado a cada 5 minutos nos dias 14 e 19 de março de 2013

A partir da discretização da chuva e suas respectivas intensidades ao longo do tempo, pode-se verificar que ocorreram picos de intensidade de  $140 \text{ mm h}^{-1}$ . Desta forma, fica evidente a importância do monitoramento da chuva ocorrida em menores intervalos, conforme a proposta por Horner e Jens (1941), que separa o tempo total de duração das chuvas em três partes iguais, ou seja, os padrões estariam entre 0 e 33,3 (padrão avançado); 33,3 e 66,6 (padrão intermediário) e 66,6 e 100% (padrão atrasado) do tempo total de duração das chuvas. Observou-se que a chuva ocorrida no dia 14/03/2013 apresentou padrão intermediário, enquanto a do dia 19/03/2013 apresentou padrão avançado. Observa-se uma queda gradativa após os maiores picos de intensidade.

Na Tabela 9 apresenta-se a descrição dos eventos de chuva, bem como o volume escoado e a produção de sedimentos perdidos e em suspensão.

**Tabela 9.** Descrição dos eventos de chuva, taxa de escoamento, concentração de sedimentos e perda de solo

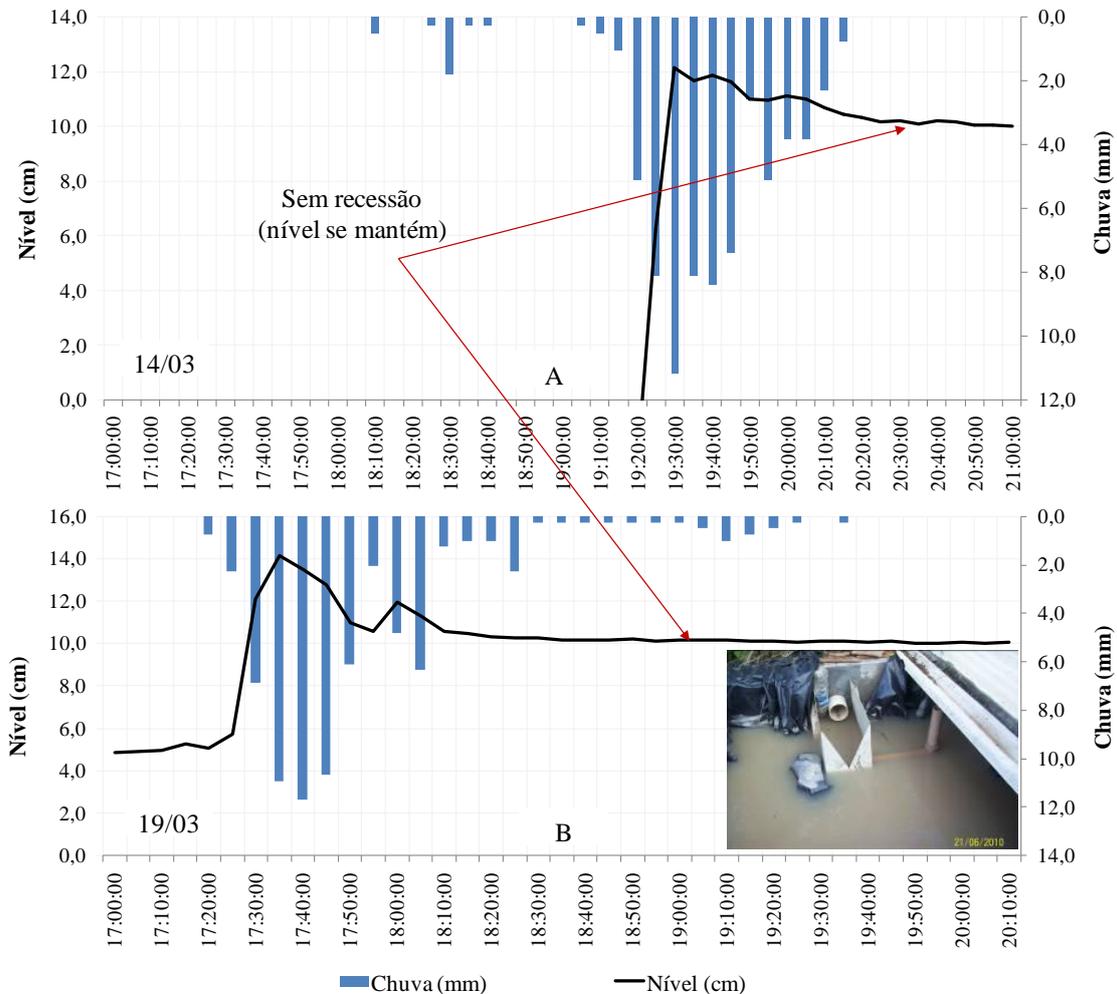
	Variáveis analisadas	Data do evento	
		14/03/2013	19/03/2013
Característica do evento chuvoso/Usado do solo	Volume total (mm)	71,38	73,15
	Duração do evento (h)	2,17	2,33
	Intensidade média (mm h <sup>-1</sup> )	32,94	31,35
PCM	Geração de escoamento (L m <sup>-2</sup> )	0,48	2,11
	Concentração de Sedimento (Mg L <sup>-1</sup> )	5,98	6,19
	Produção de sedimento (kg m <sup>-2</sup> )	0	0
PCN	Geração de escoamento (L m <sup>-2</sup> )	0,29	0,19
	Concentração de Sedimentos (mg L <sup>-1</sup> )	0	0
	Produção de sedimento (kg m <sup>-2</sup> )	0	0
PD	Geração de escoamento (L m <sup>-2</sup> )	28,42	35,33
	Concentração de Sedimento (mg L <sup>-1</sup> )	0,59	48,49
	Produção de sedimento (kg m <sup>-2</sup> )	1,53	0,72
PBP	Geração de escoamento (L m <sup>-2</sup> )	15,36	37,06
	Concentração de Sedimento (mg L <sup>-1</sup> )	0,41	68,11
	Produção de sedimento (kg m <sup>-2</sup> )	0	0

Pode-se observar que as maiores perdas de solo ocorreram na parcela descoberta. As parcelas com adoção de práticas conservacionistas (PCM e PBP) apresentaram eficiência na redução da taxa de perda de solo. Observou-se que na parcela com barramento de palma (PBP), mesmo ocorrendo escoamento superficial, não houve perda de solo, tendo-se verificado apenas sedimentos em suspensão. A concentração de sedimento da parcela com cobertura morta foi superior a da parcela com barramento de palma na chuva do dia 14/03/2013, que pode estar associado ao solo que se encontrava solto no final da parcela e ao baixo volume escoado, o que implica em uma maior concentração de sedimento no volume coletado.

O volume escoado nas PCM e PCN foi insignificante quando comparado com as demais. Apesar do volume precipitado em ambos os dias terem sido semelhantes, o escoamento superficial no dia 19/03/2013 foi superior ao observado no dia 14 (com

exceção da PCN), que pode ser explicado pela umidade do solo, uma vez que o solo encontrava-se mais úmido em função da chuva antecedente de 5 dias.

Na Figura 21 é apresentada a resposta chuva-vazão para os dois eventos investigados. Observa-se que a resposta é instantânea para eventos acima de 4 mm.



**Figura 21.** Resposta de nível no vertedor no final da parcela descoberta, dia 14/03/2013 (A) e 19/03/2013 (B)

Verificou-se que apesar do sensor apresentar boa precisão, não é possível estimar com segurança a vazão gerada durante o evento em função da deposição de sedimento no vertedouro, que acaba influenciando na resposta do sensor. Outro problema é quando a caixa de sedimento enche de água, o que acaba não sendo possível observar a recessão, ou seja, o nível se mantém mesmo depois da chuva cessar como pode ser visto

na Figura 21. A vazão estimada nos picos (19h30 para o dia 14/03/2013 e 17h40 para o dia 19/03/2013) foi de  $7,33 \text{ L s}^{-1}$  e  $10,75 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente.

A geração de escoamento durante os eventos extremos pode ser vista na Tabela 10.

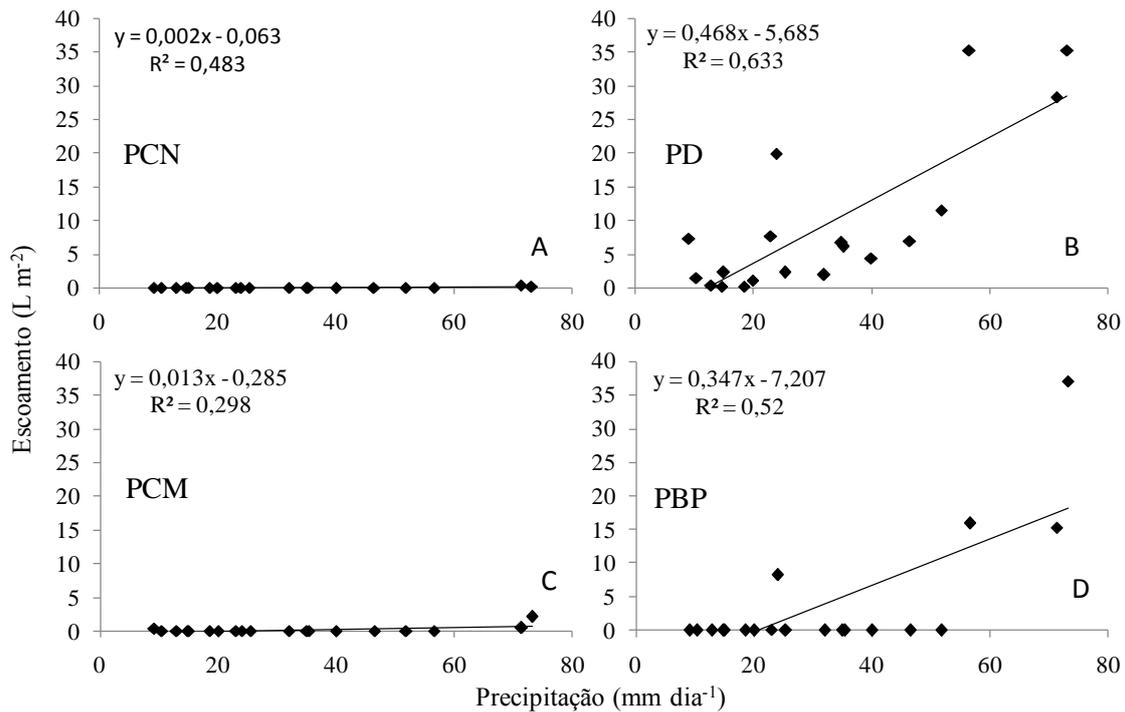
**Tabela 10.** Percentuais de volume escoado e infiltrado após os dois eventos investigados

	Chuva mm	Trat.	Escoamento		Infiltração	
			Mm	%	mm	%
14-03-2013	71,38	PCM	0,48	0,67	70,9	99,33
		PCN	0,29	0,40	71,09	99,60
		PD	28,42	39,81	42,96	60,19
		PBP	15,36	21,52	56,02	78,48
19-03-2013	73,15	PCM	2,11	2,89	71,04	97,11
		PCN	0,19	0,26	72,96	99,74
		PD	35,33	48,30	37,82	51,70
		PBP	37,06	50,66	36,09	49,34

\*Na parcela com cobertura natural o total infiltrado considerado está somado à interceptação

A infiltração foi estimada por meio da diferença entre o total precipitado e escoado. Pode-se perceber que as parcelas com cobertura natural e cobertura morta apresentaram elevada infiltração. Verificou-se que a parcela com barramento de palma apresentou menor infiltração no segundo evento em relação à parcela descoberta. Tal resultado possivelmente está associado à umidade do solo, que estava mais elevada na parcela com barramento com palma, em função da maior infiltração ocorrida da chuva antecedente.

Dentre as condições de cobertura investigadas, a parcela com solo descoberto foi a única que apresentou alguma correlação entre a precipitação e o escoamento superficial, uma vez que não existe barramento físico na superfície, apenas a rugosidade, diferentemente das demais condições (Figura 22).



**Figura 22.** Correlação entre a precipitação e escoamento superficial, (A) Parcela com Cobertura Natural; (B) Parcela Descoberta; (C) Parcela com Cobertura Morta e (D) Parcela com Barramento de Palma

Pode-se observar na Figura 22B que a geração de escoamento superficial não está apenas associada ao volume total precipitado. Tal fato pode ser explicado pela relação do escoamento superficial com a intensidade da chuva e a umidade antecedente do solo. O uso de cobertura morta reduziu em 98,3% a perda de água por escoamento superficial em relação ao solo descoberto, enquanto que o barramento com palma forrageira promoveu redução de 57,3%.

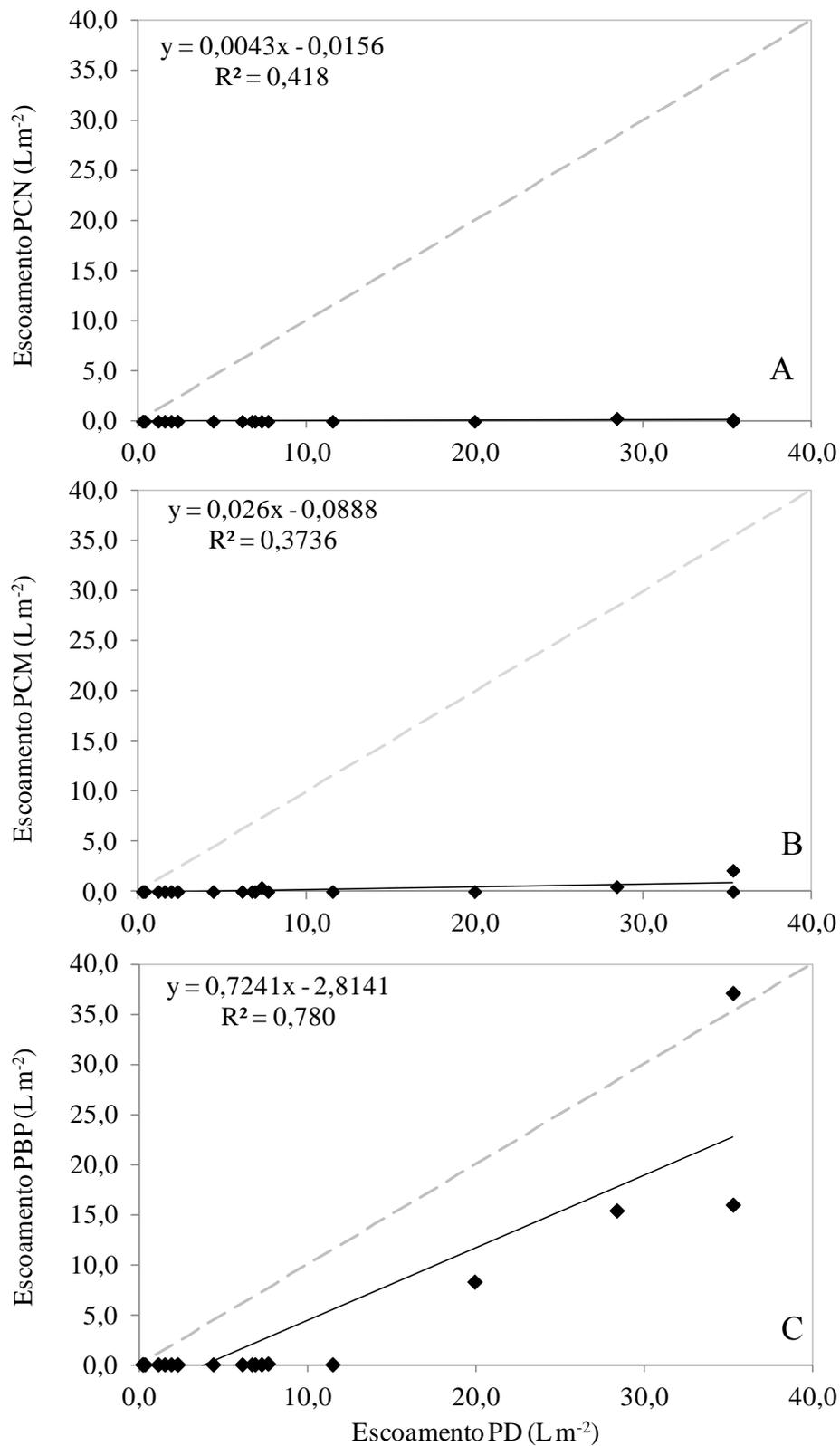
Santos et al. (2007) avaliaram a erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada, e observaram que a adoção da cobertura morta e do cultivo em nível mais barramentos em pedra, reduzem consideravelmente o escoamento superficial em relação à prática do cultivo morro abaixo e a condição de solo descoberto.

Comportamento também observado por Santos et al. (2009), que avaliaram as características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semiárido, e verificaram que entre as práticas conservacionistas estudadas a cobertura morta

produziu significativa redução da erosão do solo em relação às demais práticas, com valores próximos aos da condição ideal de cobertura, que é a condição natural.

Montenegro et al. (2013a) avaliaram o impacto da cobertura morta sobre a dinâmica de solo e água sob chuva simulada, e observaram que a cobertura morta aumenta a taxa de infiltração e reduz o pico de escoamento, bem como prolonga o tempo de início do escoamento.

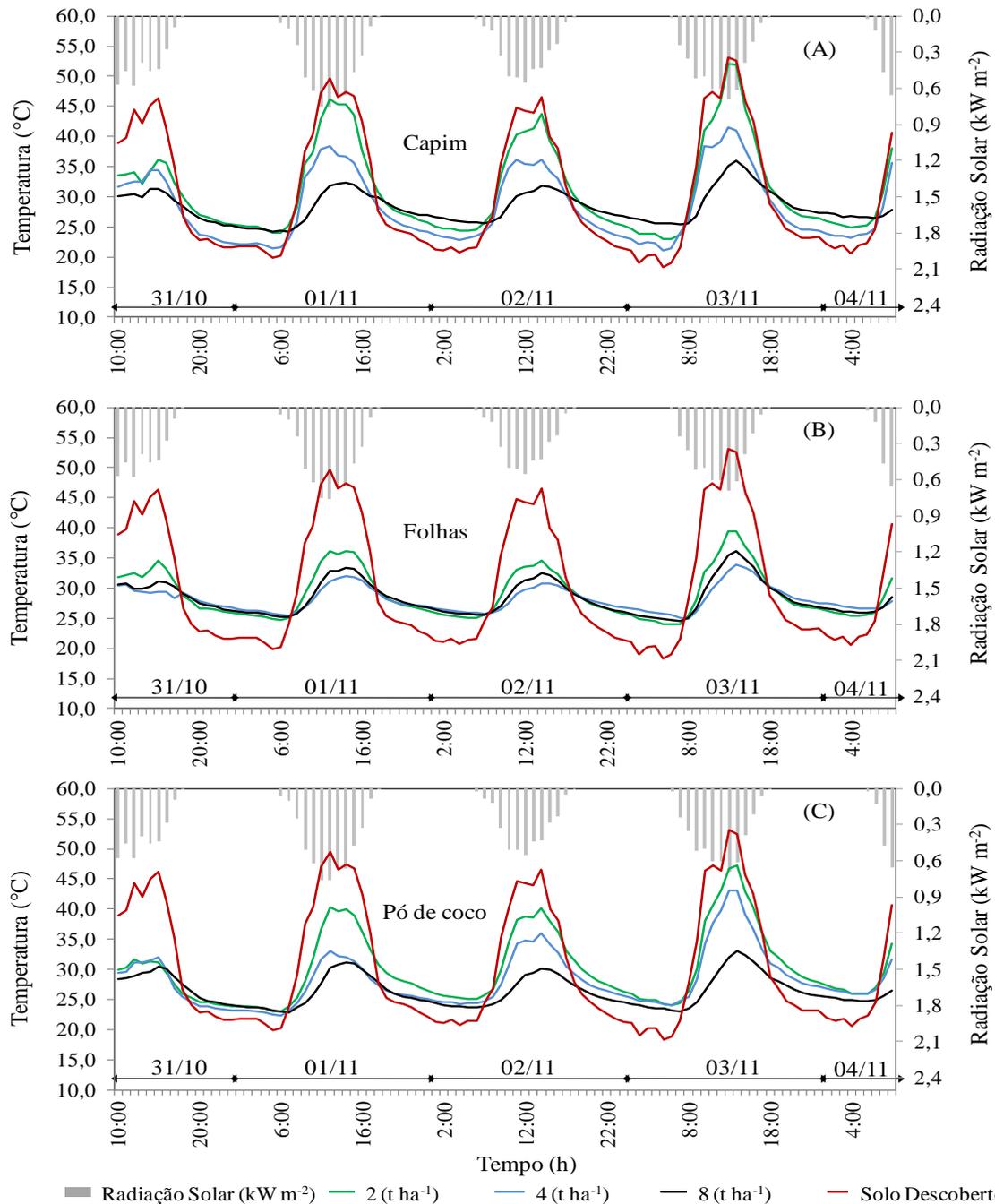
Observa-se nas Figuras 23A e 23B, que existe baixa correlação entre o escoamento gerado na parcela de solo descoberto (PD) e as parcelas com cobertura natural (PCN) e com cobertura morta (PCM), respectivamente. Na Figura 23C pode-se observar que existe correlação entre o escoamento superficial gerado na PD e o escoamento gerado na parcela com barramento de palma (PBP), ou seja, através do escoamento observado na PD é possível estimar o gerado na PBP, com grau de incerteza admissível. Observou-se que a geração de escoamento na PBP só ocorre quando o escoamento superficial iguala ou supera  $20 \text{ L m}^{-2}$  na PD.



**Figura 23.** Correlação entre os escoamentos; (A) Parcela com Cobertura Natural x Parcela Descoberta; (B) Parcela com Cobertura Morta x Parcela Descoberta; e (C) Parcela com Barramento de Palma x Parcela Descoberta

### 6.3. Efeito da cobertura morta sobre a temperatura superficial do solo

A variação da temperatura da superfície do solo ao longo do tempo, para diferentes condições de cobertura do solo e densidades, pode ser vista nas Figuras 24A, 24B e 24C.



**Figura 24.** Temperatura da superfície do solo registrada pelos sensores termopares no período de 31/10/2014 a 04/11/2014 para as diferentes condições de cobertura: capim elefante seco ao ar (A), folhas secas de cajueiro (B) e pó de coco (C)

Observa-se que os três tipos de cobertura morta forneceram uma zona tampão, amortecendo as flutuações de temperatura do solo ao longo do tempo. A condição de solo descoberto foi a que apresentou a maior amplitude térmica ao longo do dia (34,7 °C no dia 03/11/2014), com máxima de 53,1 °C às 13h e mínima de 18,4 °C ocorrendo às 05h. Para a cobertura com palha de capim e pó de coco, a quantidade de 8 t ha<sup>-1</sup> foi a que apresentou a menor flutuação da temperatura ao longo do dia. Enquanto que na cobertura com folha de cajueiro a condição de 4 t ha<sup>-1</sup> foi a de menor variação. As três condições de cobertura reduziram a temperatura da superfície do solo durante o dia quando comparadas a condição de solo descoberto, e aumentaram durante a noite, ou seja, a zona de amortecimento criada pela cobertura impede o aumento de temperatura do solo durante o dia, mas também evita que a temperatura diminua durante a noite.

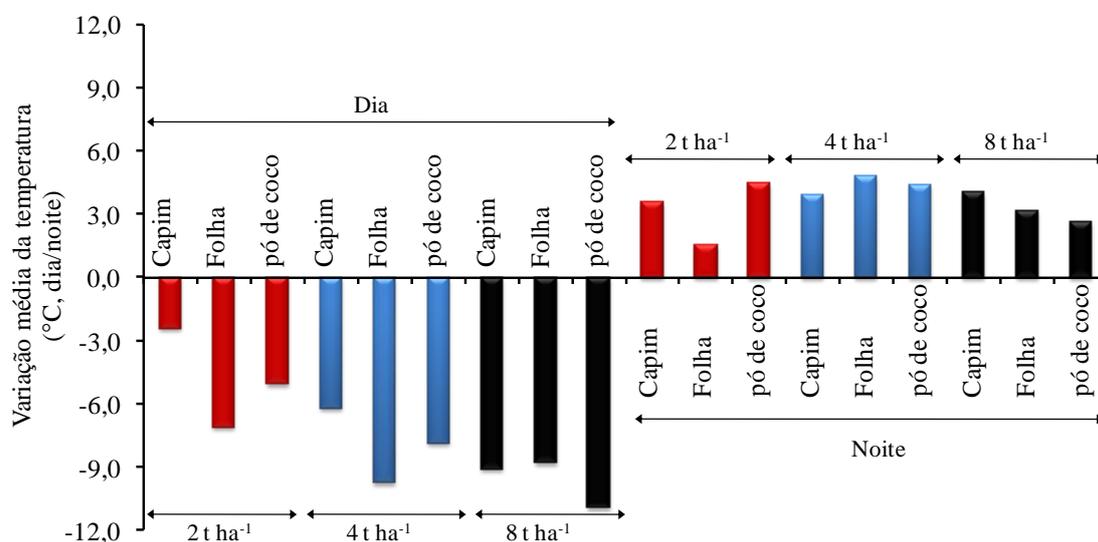
No período diurno as coberturas com palha de capim e pó de coco apresentaram comportamento similar. As maiores quantidades de cobertura apresentaram menor temperatura da superfície do solo. Para cobertura de folha de cajueiro a condição de 4 t ha<sup>-1</sup> foi a que apresentou menor temperatura da superfície do solo, seguida pela condição de 8 t ha<sup>-1</sup>. No período noturno na condição de cobertura com capim, a densidade de 8 t ha<sup>-1</sup> foi a que apresentou maior temperatura (Figura 24A). Para cobertura com folhas de cajueiro a densidade de 4 t ha<sup>-1</sup> apresentou temperatura um pouco mais elevada (Figura 24B). Já para condição de cobertura com pó de coco, a densidade de 2 t ha<sup>-1</sup> manteve o solo mais aquecido durante a noite (Figura 24C).

Dentre as coberturas investigadas, os resultados apontaram que as diferentes quantidades de pó de coco não influenciaram diretamente na dissipação de calor da superfície do solo para atmosfera, ou seja, a temperatura é menor na densidade de 8 t ha<sup>-1</sup> tanto durante o dia quanto durante a noite, e assim sucessivamente para demais densidades. Considerando as questões econômicas e de disponibilidade de material, a cobertura com folha de cajueiro destacou-se em relação às demais coberturas, uma vez, que menores quantidades aplicadas (2 e 4 t ha<sup>-1</sup>) influenciaram nas variações térmicas ao longo do dia e promoveram maiores reduções de temperatura da superfície do solo quando comparada as demais coberturas.

De acordo com Li et al. (2013), a cobertura morta reduz a evaporação e aumenta a disponibilidade de água no solo, bem como regula a temperatura do solo. Odrizola et al. (2014) encontraram variabilidade diária da temperatura do solo em áreas de pastagem, e

sugerem que estas mudanças de curto prazo deve ser consideradas, uma vez que pouca atenção tem sido dada a tais variações.

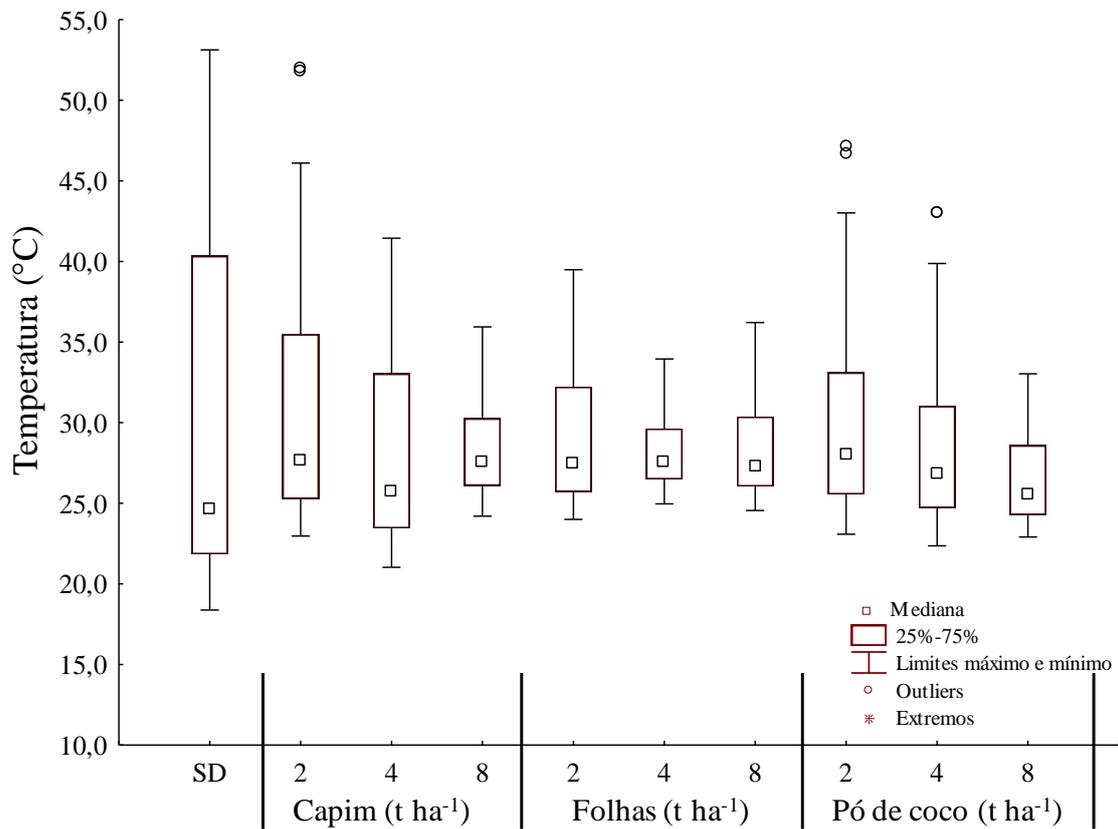
A diferença média diária entre a temperatura para as três condições de cobertura morta e o solo descoberto no período diurno e noturno pode ser vista na Figura 25.



**Figura 25.** Variação média diária da temperatura de superfície do solo das diferentes condições de cobertura morta em relação ao solo descoberto registrada pelo termopar no período diurno e noturno

A folha de cajueiro mostrou-se ser uma cobertura morta promissora, uma vez que, foi mais eficiente que as demais coberturas na redução de temperatura para as quantidades de 2 e 4 t ha<sup>-1</sup> no período diurno de aproximadamente 7,1 e 9,7 °C, respectivamente. O aumento de quantidade de 4 para 8 t ha<sup>-1</sup> de folha de cajueiro reduziu sua eficiência na atenuação da temperatura em comparação as demais coberturas. O uso de 8 t ha<sup>-1</sup> de capim elefante e de pó coco produziram uma redução média diurna de aproximadamente 9,1 e 10,9 °C, respectivamente. No período noturno o efeito tampão influenciado pelas quantidades aplicadas, ficou mais evidente na cobertura com folha de cajueiro, que apresentou incremento médio de temperatura de 1,5, 4,8 e 3,1 °C para as quantidades de 2, 4 e 8 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A aplicação de 8 t ha<sup>-1</sup> de pó de coco como cobertura morta, mostrou-se ser tratamento mais eficiente, uma vez que a zona de amortecimento criada pela cobertura que impede o aumento de temperatura do solo durante o dia, não reduziu a troca de temperatura da superfície com a atmosfera durante a noite, o que resultou no incremento de 2,6 °C.

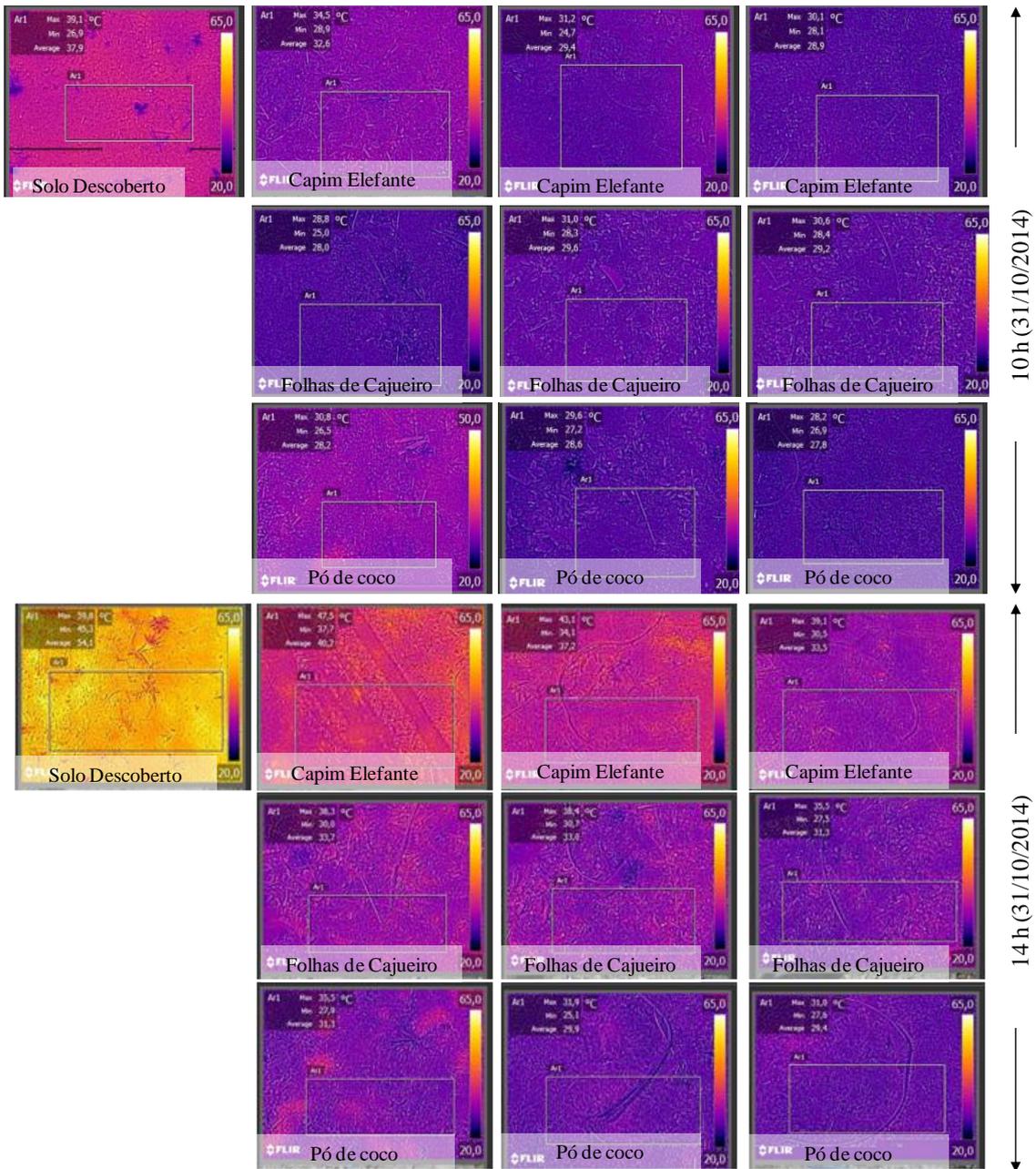
Na Figura 26 apresenta-se o gráfico box plot da temperatura de superfície do solo para as diferentes condições de cobertura e quantidade de palhada. Observa-se que as coberturas com capim elefante (2 t ha<sup>-1</sup>) e com pó de coco (2 e 4 t ha<sup>-1</sup>) apresentaram valores de temperatura acima dos limites superiores (outlier). Os resultados demonstram que os dados apresentam distribuição assimétrica positiva, ou seja, os valores da mediana estão mais próximos do quartil 1 do que do quartil 3. O solo descoberto (SD) é a condição de cobertura com maior variabilidade dos dados, em que 50% dos valores de temperatura registrados estão na faixa de 24,6 a 40,3 °C. As densidades de 8 t ha<sup>-1</sup> reduziram a dispersão dos dados de temperatura para os três tipos de cobertura, porém, o uso de 4 t ha<sup>-1</sup> de folhas de cajueiro foi a que promoveu a menor variação de temperatura de superfície do solo ao longo do dia, dentre as condições investigadas.



**Figura 26.** Box plot dos dados de temperatura da superfície do solo registrado pelo termopar para as diferentes condições de cobertura e quantidades

Os termogramas da superfície do solo (ou seja, abaixo da cobertura morta) das condições de cobertura do solo investigadas, registrados às 10h e 14h, são apresentados

na Figura 27. Adicionalmente, os dados térmicos obtidos a partir dos termogramas são apresentados na Tabela 11.



**Figura 27.** Termogramas da superfície do solo para as diferentes condições de cobertura do solo, registrados às 10h e 14h

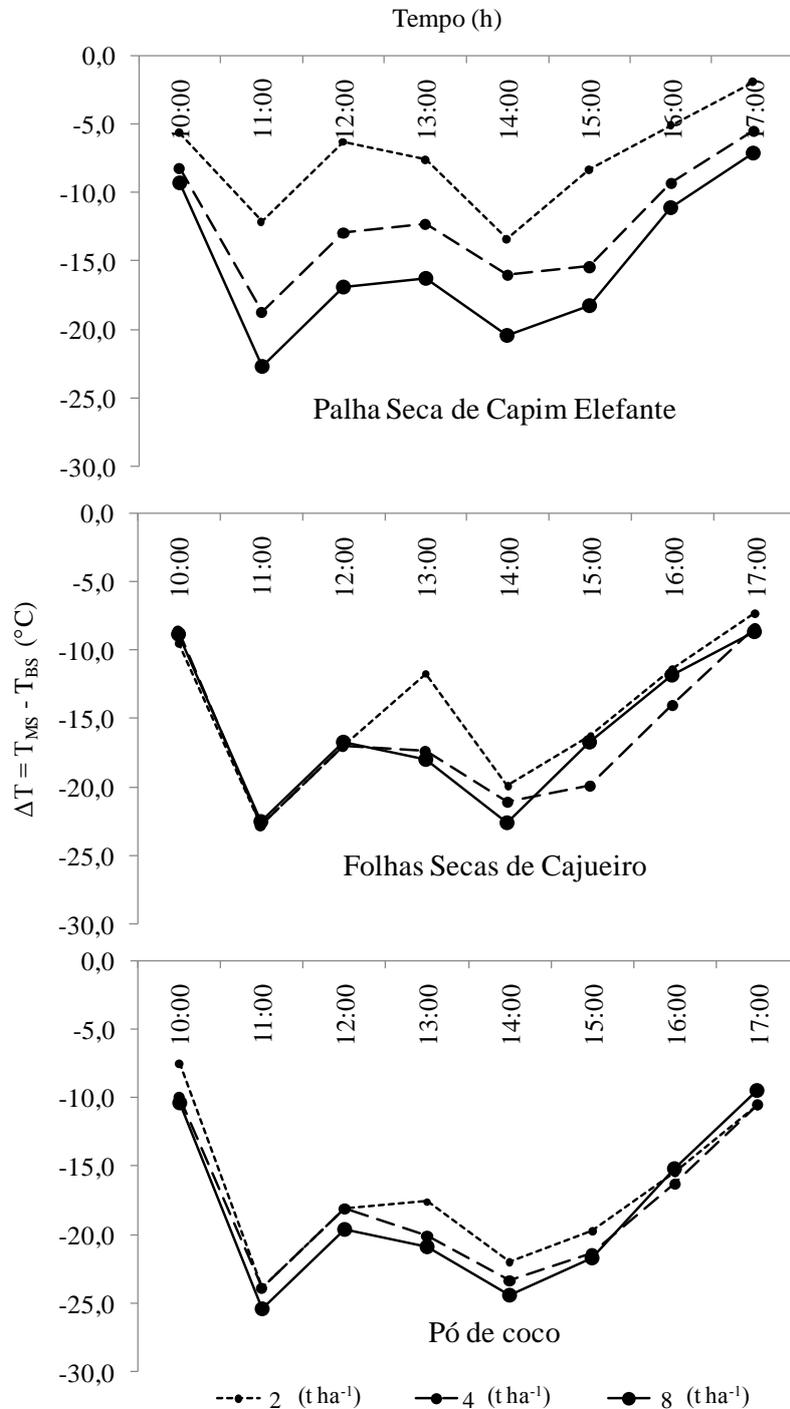
**Tabela 11.** Termografia da superfície do solo, variação e incremento de temperatura para diferentes condições de coberturas, registrados em dois horários 10h e 14h no dia 31 de outubro de 2014

Cobertura	Temperatura (°C)				Incremento (T <sub>14h</sub> - T <sub>10h</sub> )
	10h	$\Delta T = T_{MS} - T_{BS}$	14h	$\Delta T = T_{MS} - T_{BS}$	
Solo descoberto	37,9		54,1		16,2
Capim (2 t ha <sup>-1</sup> )	32,6	-5,3	40,2	-13,9	7,6
Capim (4 t ha <sup>-1</sup> )	29,4	-8,5	37,2	-16,9	7,8
Capim (8 t ha <sup>-1</sup> )	28,9	-9	33,5	-20,6	4,6
Folhas (2 t ha <sup>-1</sup> )	28	-9,9	33,7	-20,4	5,7
Folhas (4 t ha <sup>-1</sup> )	29,6	-8,3	33	-21,1	3,4
Folhas (8 t ha <sup>-1</sup> )	29,2	-8,7	31,3	-22,8	2,1
Pó de coco (2 t ha <sup>-1</sup> )	28,2	-9,7	31,3	-22,8	3,1
Pó de coco (4 t ha <sup>-1</sup> )	28,6	-9,3	29,9	-24,2	1,3
Pó de coco (8 t ha <sup>-1</sup> )	27,8	-10,1	29,4	-24,7	1,6

Pode ser observado que as coberturas mortas atenuaram o aquecimento da superfície do solo. O desempenho das coberturas na redução da temperatura da superfície do solo ficou ainda mais evidente no registro às 14h (Figura 27), em que a diferença em relação ao solo descoberto superou os 20,0 °C para todas as coberturas, com exceção das densidades de 2 e 4 t ha<sup>-1</sup> da cobertura com capim elefante, que reduziram 13,9 e 16,9 °C, respectivamente (Tabela 11). Observa-se nos termogramas que dentre as coberturas investigadas, o pó de coco mostrou-se ser a mais eficiente na redução da temperatura da superfície do solo (Figura 27 e Tabela 11).

Zang et al. (2009) investigaram os efeitos da cobertura morta na temperatura do solo, umidade do solo e produtividade do trigo no Planalto de Loess da China, e observaram que a cobertura morta promoveu redução da temperatura do solo nos períodos mais quentes, e manteve o solo mais quente em períodos mais frios quando comparado com o solo exposto. Na escala diária neste estudo, pode-se observar que durante o dia (período de aquecimento) a condição da superfície com cobertura morta reduzida temperatura do solo, e a noite (período mais frio) manteve a temperatura do solo superior à observada na condição de solo nu.

A variação diária da diferença entre a temperatura da superfície do solo com diferentes coberturas mortas e a temperatura da superfície do solo descoberto, pode ser vista na Figura 28. Observa-se que a temperatura da superfície foi atenuada pela cobertura morta, especialmente durante os períodos mais quentes do dia.



**Figura 28.** Variação diária da diferença entre a temperatura da superfície do solo coberto com as diferentes coberturas ( $T_{MS}$ ) e temperatura da superfície do solo para a

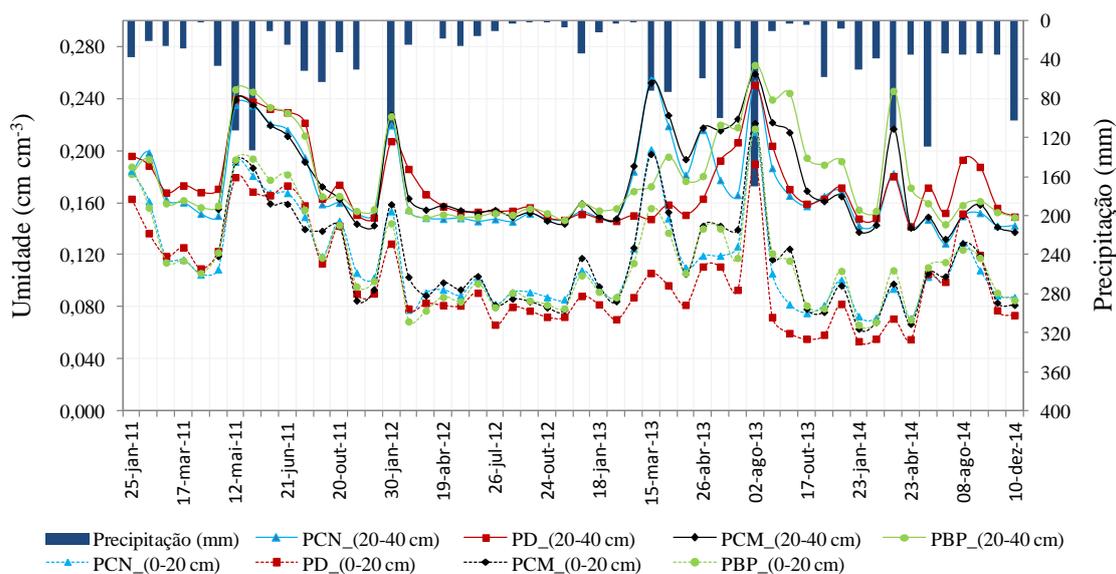
condição do solo descoberto ( $T_{BS}$ ). Os dados (média espacial) foram extraídos a partir dos termogramas

Dentre as coberturas mortas investigadas, o efeito da quantidade ficou mais evidenciado na condição de cobertura com palha de capim elefante. No momento mais crítico do dia (11h) a cobertura com palha de capim elefante promoveu uma redução de 12,1, 18,7 e 22,7 °C para as quantidades de 2, 4 e 8 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Para cobertura com folhas de cajueiro a redução foi de 22,8, 22,8 e 22,5 °C para as quantidades de 2, 4 e 8 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Já a cobertura com pó de coco promoveu uma redução de 23,9, 23,9 e 25,4 para as quantidades de 2, 4 e 8 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Montenegro et al. (2013a) avaliaram o efeito de diferentes quantidades de cobertura morta sobre o escoamento, transporte de sedimentos e a temperatura do solo; e observaram que a cobertura morta controla as variações de temperatura no solo. Os resultados mostraram que a densidade de cobertura morta de 4 t ha<sup>-1</sup> controlou a temperatura melhor do que o solo descoberto, onde os gradientes de temperatura são os mais elevados.

#### **6.4. Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal**

A dinâmica temporal da umidade do solo entre os meses de janeiro de 2011 a dezembro de 2014, nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, para as quatro diferentes condições de coberturas do solo: Parcela Descoberta – PD, Parcela com Cobertura Morta – PCM, Parcela com Barramento de Palma – PBP e Parcela com Cobertura Natural pode ser vista na Figura 29.



**Figura 29.** Dinâmica temporal de umidade do solo nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm no Argissolo Amarelo Distrófico típico, para condições de parcela descoberta (PD), parcela com cobertura morta (PCM), parcela com barramento de palma (PBP) e parcela com cobertura natural (PCN) por meio de sonda de nêutrons no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014

Observou-se que a variação da umidade entre as profundidades ao longo do tempo foi semelhante para as diferentes condições de cobertura investigadas. Não houve uma condição de cobertura que se manteve com umidade muito superior as demais ao longo do tempo. Com exceção de alguns picos de chuva que promoveram mudanças mais acentuadas nas com parcelas com coberturas quando comparadas a parcela descoberta, principalmente na camada de 0-20 cm. Tal comportamento fica bastante evidente na resposta da umidade ao evento extremo ocorrido no dia 14 de março de 2013, ou seja, as parcelas em que houve geração de escoamento superficial apresentaram menor incremento de umidade.

No ano de 2012, em função da baixa pluviosidade, a umidade do solo apresentou baixa variabilidade, tendendo a estabilizar ao longo do tempo. Moreti et al. (2007) avaliaram o comportamento espaço-temporal das armazenagens gravimétrica e volumétrica da água em um Latossolo com citros durante 3 anos de observação, e verificaram que a sua distribuição de água no solo ao longo do tempo, tanto para o

período de recarga como para secagem, apresenta comportamento semelhante, indicando a existência de estabilidade temporal.

Os valores de umidade na camada de 20-40 cm foram mais elevados que os observados na profundidade de 0-20 cm, para ambos os tratamentos durante todo o período investigado. O solo descoberto na camada de 0-20 cm foi o que apresentou menor umidade. Zanette et al. (2007) avaliaram a dinâmica espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo (plantio direto e preparo convencional do solo), e verificaram que os valores das umidade estão relacionados à profundidade, mas as variabilidades não acompanham esta tendência, e que a umidade do solo apresentou grau de dependência espacial entre as amostras, de moderado para fraco, em ambos os sistemas e profundidades.

Analisando os tratamentos experimentais proposto no presente trabalho, pode-se verificar de uma forma geral, que a parcela com barramento de palma forrageira (PBP) apresentou níveis de umidade acima dos demais tratamentos nas duas camadas (0-20 cm e 20-40 cm), mostrando-se ser um sistema de captação *in situ* eficiente para as condições locais avaliadas, principalmente pós o estabelecimento da chuva. Exceção ocorreu justamente no período mais seco (2012), mantendo-se até o estabelecimento no início das chuvas em maio de 2013, período em que a parcela com cobertura morta apresentou umidade levemente superior na parcela com barramento de palma, ou seja, a cobertura morta atenua os processos de perda de água para atmosfera.

Santos et al. (2010) investigaram a variabilidade temporal do conteúdo de água no solo sob diferentes condições de superfície no semiárido do Estado de Pernambuco, e observaram que o efeito da cobertura morta na evapotranspiração foi significativa no período seco, e que a cobertura morta associada a barreiras de pedra permitiu maior retenção de água no solo em relação aos outros tratamentos e aumentou a produtividade do feijoeiro na estação seca.

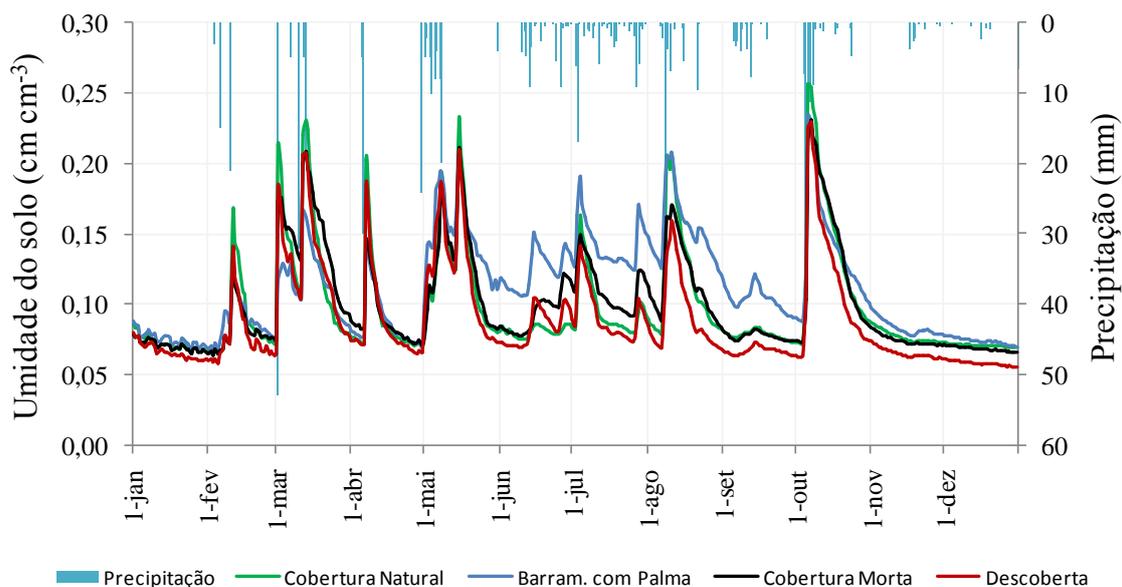
As parcelas com cobertura morta e cobertura natural, após cessar o período extremamente seco, responderam rapidamente aos primeiros eventos de chuva. Apesar da camada de 0 a 20 cm está mais susceptível a uma maior variabilidade em função da exposição direta aos processos climáticos, podendo-se observar que tal variabilidade temporal ocorre de forma similar entre as diferentes profundidades. A partir de agosto de 2013, os valores de umidade da parcela com barramento de palma forrageira superou

os da parcela com cobertura morta, e assim se manteve até dezembro de 2014. Tal comportamento possivelmente pode estar associado à manutenção de cobertura morta ao longo do tempo, uma vez que a mesma não foi reincorporada ao solo no ano de 2014.

Shen et al. (2012) verificaram que a cobertura morta favoreceu significativamente na umidade do solo na profundidade de 20 a 80 cm, em condições de agricultura de sequeiro no cultivo do milho, no norte da China. Peres et al. (2010) avaliaram o efeito de duas densidades de cobertura do solo (0 e 1,5 kg m<sup>-2</sup> de palha de cana-de-açúcar), nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, e observaram que na camada mais superficial, a presença da palha reduziu as perdas de água praticamente à metade daquela verificada na condição de solo descoberto.

A parcela com cobertura natural em alguns momentos apresentou umidades do solo inferiores aos demais tratamentos, na camada de 20-40 cm, que pode ser explicado pela interceptação da chuva, absorção e evapotranspiração da vegetação existente. Desse modo, os processos de interceptação e absorção de água pelas plantas tornam a infiltração da água no solo mais lenta. Vieira et al. (2010) avaliaram a variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso, e observaram que a parcela sob vegetação natural apresentou maiores variações do conteúdo de água no solo que a parcela cultivada que estava em pousio após colheita de milho, em função da dependência espacial e do consumo de água da vegetação presente. Já Wang et al. (2013) observaram que arbustos densos interceptam e retardam a infiltração da água, o que resulta em uma umidade média no interior do solo.

A fim de investigar a dinâmica contínua da umidade (escala diária) e a eficiência das práticas conservacionistas na manutenção da umidade do solo ao longo do tempo detalhou-se a dinâmica de umidade do ano de 2014, em que houve uma melhor distribuição da precipitação (Figura 30).



**Figura 30.** Variação diária da umidade do solo das diferentes condições de cobertura na profundidade de 20 cm, medida por TDR no ano de 2014

Pode-se observar que os eventos de chuva superior a 10 mm promovem de uma forma geral respostas rápidas e semelhantes para as diferentes condições de cobertura. Após os picos de umidade do solo em respostas aos maiores eventos de chuva, a umidade se mantém mais elevada na parcela com barramento de palma. A umidade ficou mais pronunciada na PBP no período do final de maio a setembro, justamente nesse período houve persistência da chuva com eventos inferiores a 10 mm, com exceção dos eventos de 16,8 e 28,2 mm, ocorridos nos dias 03 de julho e 08 de agosto, respectivamente.

A fim de avaliar se existe diferença significativa da umidade do solo entre as diferentes condições de cobertura, realizou-se um teste de comparação de média. A comparação de umidade foi em escala mensal. Os dados diários foram considerados as repetições. Pode-se observar que as diferentes condições de cobertura apresentaram diferenças significativas entre si, tal diferença foi mais evidente nos meses de junho, julho, agosto, novembro e dezembro (Tabela 12).

**Tabela 12.** Valores médios diários da umidade volumétrica do solo na profundidade de 20 cm para diferentes condições de cobertura, medida por TDR

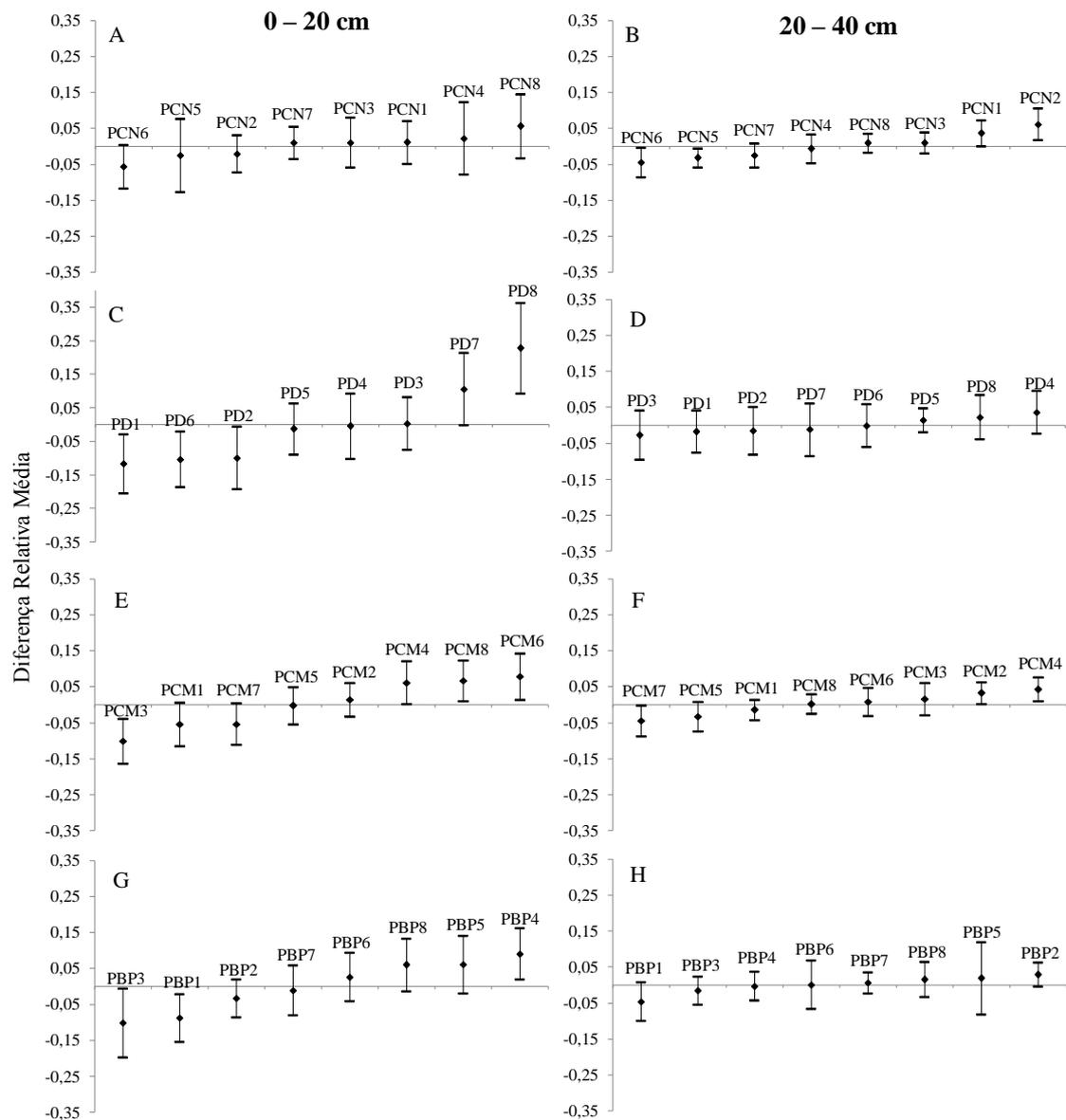
	2014			
	PCN	PBP	PCM	PD
JAN	0,072 ab	0,075 a	0,071 b	0,067 c
FEV	0,087 a	0,087 a	0,081 a	0,077 a
MAR	0,134 ab	0,116 b	0,145 a	0,128 ab
ABR	0,090 a	0,088 a	0,089 a	0,086 a
MAI	0,127 ab	0,150 a	0,128 ab	0,123 a
JUN	0,081 c	0,124 a	0,094 b	0,084 c
JUL	0,098 c	0,142 a	0,112 b	0,093 c
AGO	0,118 b	0,153 a	0,117 b	0,094 c
SET	0,078 b	0,104 a	0,077 b	0,067 c
OUT	0,140 a	0,139 a	0,137 a	0,119 a
NOV	0,077 b	0,084 a	0,075 c	0,065 d
DEZ	0,071 b	0,074 a	0,068 c	0,058 d

Médias seguidas de letras minúsculas na mesma linha, não diferem entre si, em nível de 5% de significância, pelo teste de Tukey. PCN – Parcela com Cobertura Natural; PBP – Parcela com Barramento de Palma; PCM – Parcela com Cobertura Morta e PD – Parcela Descoberta;

A condição de barramento com palma forrageira foi a que apresentou melhor desempenho na manutenção de umidade do solo. Já a condição de solo descoberto foi a de pior desempenho.

Os meses de fevereiro, abril e outubro não apresentaram diferença significativa da umidade entre as diferentes condições de cobertura. Enquanto que nos meses de novembro e dezembro, o teor de umidade presente no solo apresentou diferença significativa entre todas as diferentes condições de coberturas investigadas.

Após avaliar a dinâmica temporal da umidade do solo das diferentes condições de cobertura (PCN – Parcela com Cobertura Natural; PD – Parcela Descoberta; PCM – Parcela com Cobertura Morta e PBP – Parcela com Barramento de Palma) e profundidades, buscou-se avaliar a sua estabilidade por meio da diferença relativa média e dos seus respectivos desvios padrão (Figuras 31A à 31H).



**Figura 31.** Análise de estabilidade temporal da umidade do solo nas diferentes camadas e coberturas, através da diferença relativa média no tempo e seus respectivos desvios padrão máximo e mínimo

Pode-se observar uma tendência de estabilidade temporal nas diferentes profundidades. Conforme Gonçalves et al. (1999), para maior confiabilidade da estimativa, deve-se optar pelo local que apresenta diferença relativa média próxima de zero, com o menor desvio-padrão.

A camada de 20 a 40 cm apresentou menos variação da umidade ao longo do tempo em relação à camada de 0 a 20 cm. Tal resultado já era esperado, uma vez que a

camada superficial (0 a 20 cm) está mais propícia a uma maior dinâmica de secamento e umedecimento, e os processos de aquecimento do solo, de evaporação e de evapotranspiração são mais intensos.

Outro fator que deve ser levado em consideração é o aumento do teor de argila ao longo do perfil, que passou de 29,09% (na camada de 0 a 20 cm) para 40,43% (na camada de 20 a 40 cm). Jacobs et al. (2004) observaram que sítios de amostragem com moderado teor de argila e alto de argila tendem a apresentar uma estabilidade temporal mais pronunciada. Hu et al. (2009) avaliaram a estabilidade do conteúdo de água no solo por meio de sonda de nêutrons em uma microbacia localizada no município de Shenmu, província de Shaanxi-China, e verificaram que a variabilidade do armazenamento de água no solo foi influenciado principalmente pelas partículas do solo e pelo teor de matéria orgânica.

Hu et al. (2009) comentam que a estabilidade temporal não foi influenciada pelos diferentes usos na bacia investigada, uma vez que a perda de água do solo, através da evapotranspiração das diferentes vegetações e usos da terra foi compensada pelas diferenças nas partículas do solo e teor de matéria orgânica. Os mesmos alegam que o número limitado de amostras, que foi de 12 neste estudo, pode ser a razão para os efeitos não significativos de uso da terra. Souza et al. (2011) avaliaram a estabilidade temporal da umidade do solo em cultivos de cenoura irrigada no Nordeste do Brasil, e evidenciaram que a cobertura morta influenciou positivamente na estabilidade temporal da umidade do solo, e reduziu as incertezas.

Melo e Montenegro (2015) avaliaram a dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido pernambucano, e observaram que as diferentes condições de cobertura vegetal e características dos solos da bacia induzem a variações espaciais da umidade, sendo essa influência menos expressiva sobre seus padrões temporais.

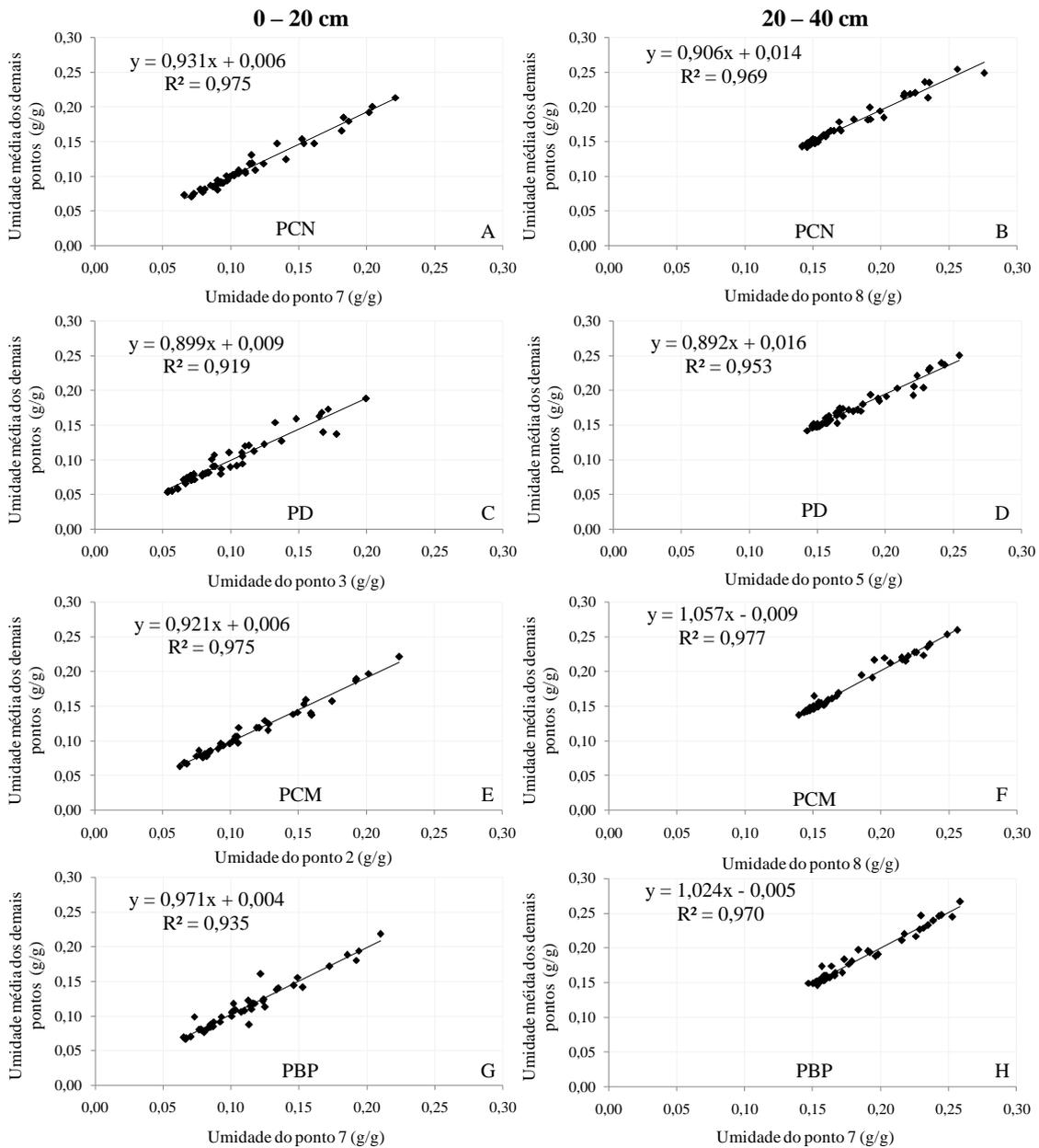
Dentre as condições de cobertura estudadas, a parcela com cobertura natural foi a que apresentou valores mais estáveis em relação à média (camada de 0 a 20 cm), e na camada de 20 a 40 cm praticamente todos os pontos em todas as condições de cobertura apresentaram diferença relativa média próxima a zero e baixo desvio padrão. A única parcela em que o ponto estável foi o mesmo para ambas as profundidades foi à parcela

com barramento de palma, na qual o ponto 7 (localizado na parte inferior da parcela) foi o mais estável, devendo o mesmo ser adotado para futuras medições.

A estabilidade temporal na camada de 0 a 20 cm nas condições de cobertura natural, cobertura morta e solo descoberto ocorreu nos pontos 7, 2 e 3, respectivamente. A distribuição dos pontos na parcela pode ser visto na Figura 8. Já na camada de 20 a 40 cm nas condições de cobertura natural, cobertura morta e solo descoberto, os pontos mais estáveis foram 8, 8 e 5, respectivamente. Tais pontos são os mais indicados para medições futuras, bem como para deslocamento das sondas TDRs, a fim de, obter um detalhamento contínuo dos processos de umedecimento e secamento do solo, e suas interações com as demais variáveis hidrológicas e sedimentológicas.

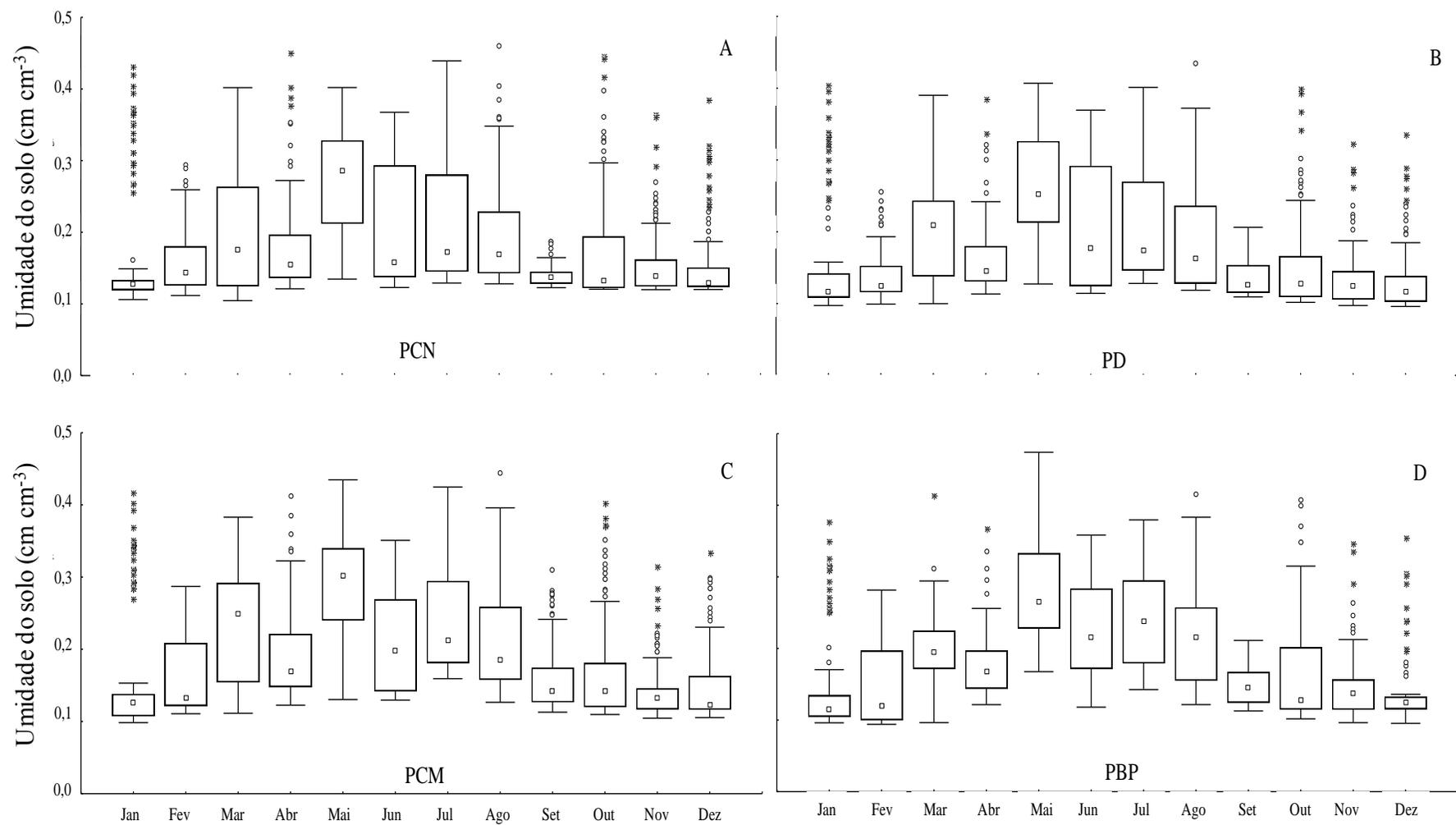
Vale salientar que na impossibilidade da utilização desses pontos mais estáveis para fins de monitoramentos futuros, outros pontos podem ser utilizados, levando em consideração que a diferença relativa média deve estar próxima de zero, e baixo desvio padrão. Por se tratar de uma área de pequena escala, pode-se observar baixa variação entre os pontos de monitoramento.

Com base no planejamento experimental, a determinação da variabilidade espacial e temporal, se constitui em uma ferramenta valiosa, haja vista que permite definir o intervalo adequado de amostragem, reduzindo significativamente os custos relacionados ao monitoramento de campo, sobretudo em estudos associados à simulação hidrológica e hidrossedimentológica. Por meio da análise de correlação, pode-se avaliar a eficiência de predição dos pontos estáveis, e verificou-se que os pontos representativos apresentaram boa correlação com a média global, podendo ser utilizados de forma precisa para estimativa da umidade do solo em medições futuras. Todos os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) encontrados foram superiores 0,90 (Figura 32A à 32H).



**Figura 32.** Correlação entre os dados de umidade do solo dos pontos estáveis e da média dos demais pontos para diferentes coberturas e profundidades

A fim de avaliar a distribuição e a variabilidade da umidade do solo em escala diária para as diferentes condições de cobertura, realizou-se uma análise exploratória dos dados por meio de gráficos box plot (Figura 33).



**Figura 33.** Umidade do solo média diária em cada mês para diferentes condições de cobertura estimada através de sonda TDR durante o período de 2011 a 2014

Pode-se observar que a parcela descoberta apresentou os menores valores de umidade durante o período investigado. A parcela com cobertura natural apresentou de uma forma geral comportamento assimétrico positivo (valores médios maiores que a mediana), com exceção dos meses de janeiro e maio. Tal comportamento também foi observado para as condições de solo descoberto e parcela com cobertura morta.

Os meses mais secos são os de menor variabilidade, o que já era esperado, porém apresentam valores atípicos, possivelmente em função de eventos de chuvas isolados que promovem mudanças mais acentuadas da umidade. O período de maio a agosto (período úmido) foi o que apresentou maior dispersão dos dados para ambos os tratamentos, que pode ser verificado pela amplitude interquartílica (diferença entre os quartis) e pela amplitude da amostra (diferença entre os limites máximos e mínimos). Nesse período não foi observado valores discrepantes, com exceção do mês de agosto que apresentou valores atípicos em todas as condições de cobertura.

Pode-se observar que a umidade do solo apresentou variabilidade temporal acentuada para todas as condições de coberturas estudadas, porém ficou evidente que o tipo de cobertura influencia diretamente na amplitude interquartílica e da amostra.

Adicionalmente os valores médios, máximos e mínimos de umidade do solo e seus respectivos desvios padrão, são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13.** Valores de referência de umidade volumétrica do solo para cada mês e condição de cobertura investigada

USO DO SOLO		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PCN	Média	0,139	0,175	0,209	0,183	0,271	0,223	0,223	0,199	0,140	0,172	0,157	0,146
	Máx	0,420	0,432	0,402	0,451	0,402	0,368	0,439	0,459	0,188	0,446	0,364	0,385
	Mín	0,106	0,112	0,105	0,121	0,135	0,123	0,123	0,129	0,125	0,121	0,120	0,120
	Desvio Padrão	0,054	0,074	0,082	0,071	0,073	0,081	0,096	0,072	0,013	0,077	0,049	0,051
PBP	Média	0,118	0,150	0,202	0,177	0,278	0,239	0,242	0,218	0,150	0,162	0,145	0,129
	Máx	0,251	0,378	0,413	0,367	0,474	0,358	0,380	0,416	0,211	0,408	0,346	0,355
	Mín	0,096	0,094	0,096	0,121	0,168	0,119	0,118	0,122	0,118	0,108	0,101	0,095
	Desvio Padrão	0,021	0,069	0,060	0,047	0,067	0,063	0,072	0,066	0,024	0,066	0,043	0,044
PCM	Média	0,133	0,173	0,242	0,191	0,289	0,223	0,237	0,216	0,159	0,169	0,144	0,136
	Máx	0,416	0,393	0,383	0,413	0,435	0,351	0,425	0,444	0,311	0,402	0,315	0,335
	Mín	0,098	0,105	0,111	0,123	0,130	0,134	0,130	0,131	0,119	0,111	0,109	0,105
	Desvio Padrão	0,056	0,075	0,071	0,062	0,073	0,064	0,084	0,065	0,043	0,070	0,040	0,049
PD	Média	0,129	0,152	0,205	0,166	0,261	0,219	0,212	0,190	0,137	0,154	0,135	0,126
	Máx	0,405	0,382	0,390	0,386	0,407	0,369	0,401	0,434	0,206	0,399	0,323	0,335
	Mín	0,097	0,099	0,100	0,113	0,127	0,114	0,115	0,119	0,110	0,107	0,102	0,096
	Desvio Padrão	0,053	0,063	0,065	0,054	0,077	0,081	0,083	0,065	0,024	0,062	0,041	0,046

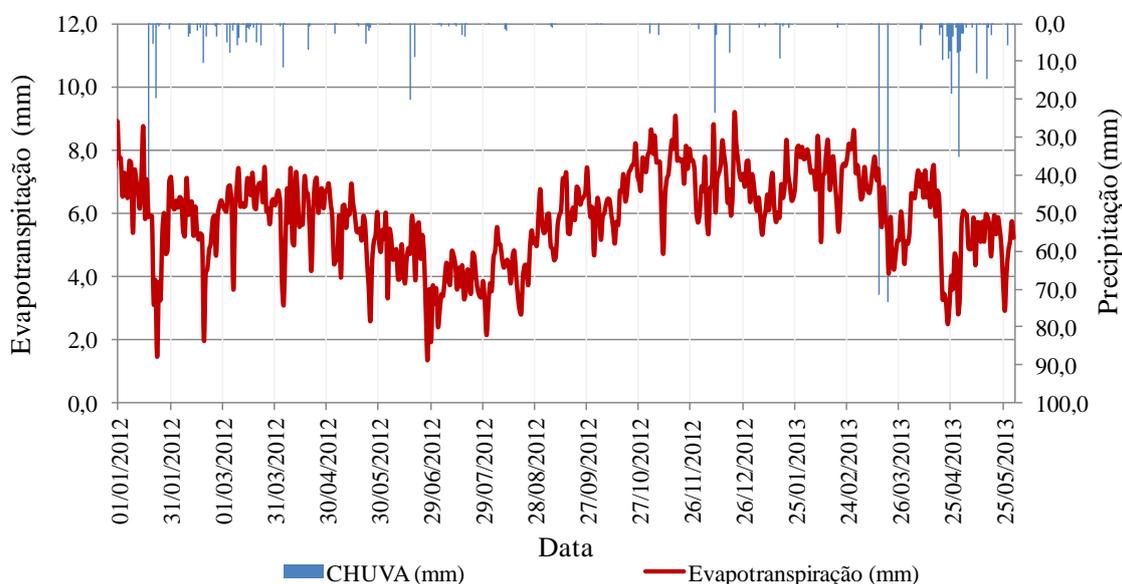
Os valores são referentes às medidas horárias através de TDR no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2014 (mesmo conjunto de dados apresentado na Figura 33). Com base no banco de dados do período analisado foi possível apresentar valores de referência mensal da umidade do solo para condições investigadas, e desta forma subsidiar estudos de modelagem hidrológica e sedimentológica na região.

## 6.5. Modelagem da dinâmica de umidade sob diferentes condições de cobertura do solo através do modelo Hydrus-1D

### 6.5.1. Dinâmica das variáveis climáticas e da umidade do solo

Os resultados apresentados neste item encontram-se na íntegra no artigo “Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano”, publicado na Revista Brasileira de Ciências Agrárias como parte da presente tese (em anexo).

Na Figura 34 apresenta-se a evolução temporal da precipitação e da evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) no período avaliado.



**Figura 34.** Precipitação e evapotranspiração de referência diária

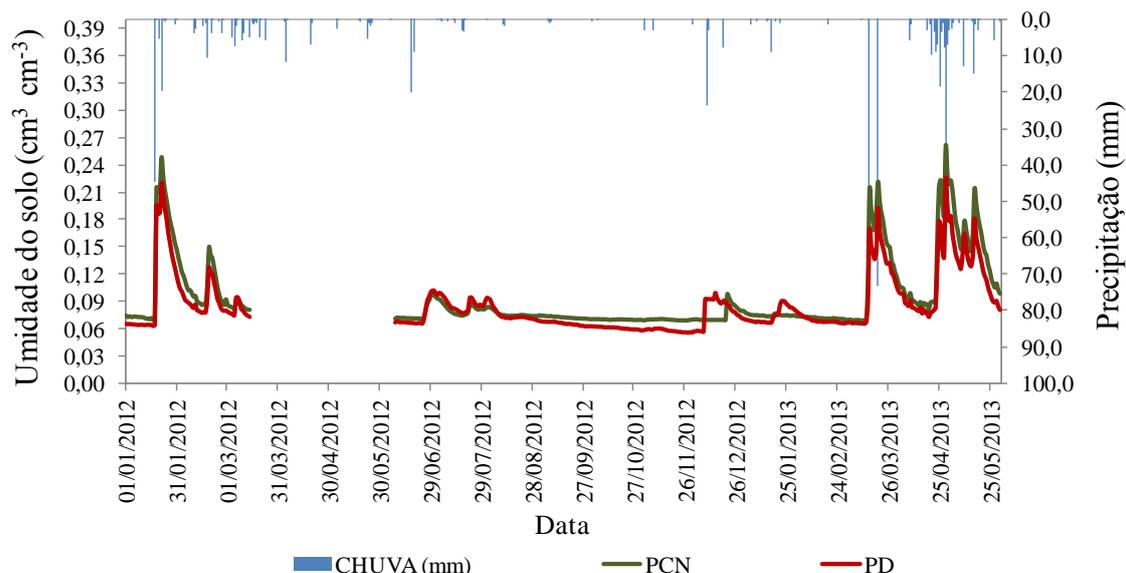
O ano de 2012 foi extremamente seco, com precipitação total anual de 266,80 mm e evapotranspiração potencial acumulada de 2.110,00 mm, o que promoveu elevado

déficit hídrico. Em 2013, a precipitação acumulada foi de 320,30 mm e a evapotranspiração potencial de 930,60 mm até o dia 31 de maio, enquanto que no ano de 2012 o total para o mesmo período foi de 895,90 mm. O período de maior demanda atmosférica foi de outubro de 2012 a fevereiro de 2013, com evapotranspiração máxima diária de 9,15 mm, ocorrendo no dia 21 de dezembro de 2012.

Ainda na Figura 34, pode-se observar que, apesar da chuva escassa no ano de 2012, houve uma redução da evapotranspiração nos meses de junho e julho, em relação aos demais meses. Tal comportamento deve-se à redução da temperatura, bem como à maior nebulosidade na região para esse período. A temperatura máxima no mês de junho foi de 32,7 °C, a média de 22,8 °C e a mínima de 13,9 °C, enquanto no mês de julho a máxima foi de 30,0 °C, a média de 21,0 °C e a mínima de 12,8 °C.

Em 2013 ocorreram eventos de chuva significativos, que proporcionaram pleno umedecimento do solo, com destaque para dois eventos extremos ocorridos nos dias 14 e 19 de março de 2013, com total precipitado de 71,38 e 73,15 mm, respectivamente. Observou-se uma similaridade no início e término dos eventos, bem como no total precipitado. Tal comportamento pode estar associado a uma tendência e/ou padrão de chuva da região.

A dinâmica de umidade nas condições de solo descoberto e com cobertura natural para o período de 01 de janeiro de 2012 a 31 de maio de 2013, pode-se observar que existe falha de registro, em função de problemas técnicos do equipamento, no período de 15 de março a 06 de junho de 2012. Pode-se observar comportamento similar da umidade para ambas às condições de cobertura do solo (Figura 35).



**Figura 35.** Dinâmica de umidade da parcela com cobertura natural (PCN) e solo descoberto (PD) medidas pela TDR

A condição de cobertura natural apresentou valores de umidade levemente superiores à condição de solo descoberto na maior parte do período, com exceção em alguns curtos períodos, que possivelmente estão associados aos processos de interceptação e evapotranspiração da vegetação natural e/ou espontânea. Santos et al. (2011) investigaram a variabilidade temporal do conteúdo superficial da água no solo sob diferentes tipos de cobertura superficial do solo, através da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e evidenciaram que, após nove dias sem chuva, a parcela com cobertura natural foi a que apresentou maior redução da umidade do solo em relação as demais coberturas (solo descoberto, barramento em pedra e palma forrageira), evidenciando o efeito da evapotranspiração real, uma vez que esta condição de superfície do solo possuía a maior densidade de cobertura vegetal; porém ao longo do tempo, a parcela descoberta foi a que apresentou menor umidade.

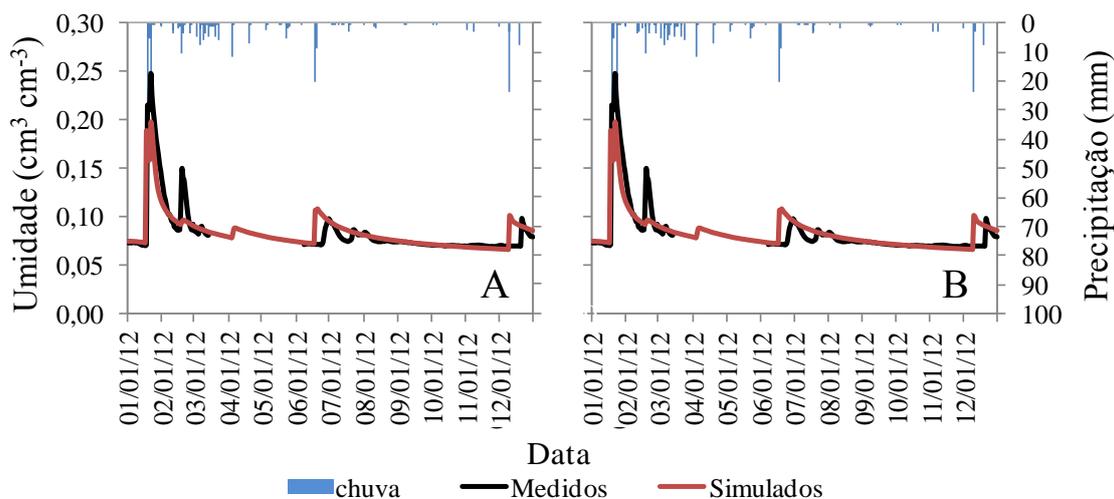
Ainda na Figura 35 pode-se observar que os menores níveis de umidade no solo ocorreram no final de agosto até início de dezembro de 2012, na condição do solo descoberto. De acordo com Santos et al. (2011), a condição de solo descoberto possui menor rugosidade hidráulica do fluxo superficial, com conseqüente geração de escoamento superficial e menor infiltração de água no solo.

### 6.5.2. Calibração e ajuste do modelo

As Figuras 36A e 36B apresentam os valores diários medidos e simulados da umidade do solo, para a condição de cobertura natural e solo descoberto no ano de 2012, respectivamente. Pode-se observar que os valores apresentaram a mesma tendência ao longo do tempo. O modelo não respondeu para alguns eventos, e não conseguiu simular os picos subsequentes para ambos os tratamentos, porém os resultados foram satisfatórios para o período analisado, conforme os índices estatísticos adotados.

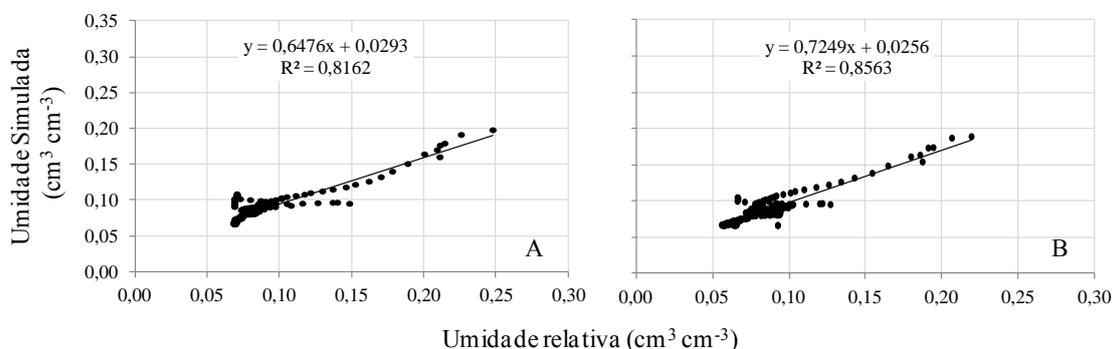
Gonçalves et al. (2007) utilizaram o modelo HYDRUS-1D para modelar a dinâmica da água e sais em monólitos irrigados com águas de diferentes qualidades, e observaram que o modelo conseguiu prever com sucesso o teor de água no solo ao longo de 4 anos avaliados. Kanzari et al. (2012) caracterizaram o movimento da água através da utilização de sondas TDR instaladas em até 4 m em profundidade, e utilizaram o Hydrus-1D para modelar o movimento de água em uma região semiárida da Tunísia, e verificaram que os dados simulados apresentaram a mesma tendência que os dados medidos.

Zeng et al. (2013) analisaram e modelaram a lixiviação dos sais do solo sob diferentes regimes de irrigação em um Distrito de Irrigação da Mongólia, na China, e observaram que o modelo Hydrus-1D simulou com precisão a dinâmica da água ao longo do perfil do solo. Tal resultado difere do encontrado por Elmi et al. (2012), que investigaram a distribuição vertical de água em uma coluna de solo utilizando o Hydrus-1D, e observaram que os valores estimados de umidade do solo não corresponderam aos valores medidos. Conforme os autores, tal resultado pode estar associado a heterogeneidades no perfil de solo, que não foram consideradas na discretização do modelo. Ainda segundo os autores o solo utilizado no experimento apresenta heterogeneidade textural, e outro fator que contribuiu certamente foi o transporte lateral e os caminhos de fluxos preferenciais.



**Figura 36.** Comparação entre os valores de umidade do solo medida e simulada no ano de 2012 na profundidade de 20 cm; (A) Parcela de Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

As Figuras 37A e 37B apresentam as correlações entre os valores medidos e simulados para condições de cobertura natural e solo descoberto no ano de 2012, respectivamente. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) encontrados indicam que 81,62 e 85,63% dos valores simulados aproximam-se e/ou assemelham-se aos valores medidos para condição de cobertura natural e solo descoberto, respectivamente. Pode-se observar alta correlação entre os valores. O resultado corrobora com o encontrado por Kanzari et al. (2012), que utilizaram o Hydrus-1D para modelar o movimento de água em uma região semiárida da Tunísia, e encontraram forte correlação entre os valores de umidade do solo medidos e estimados.

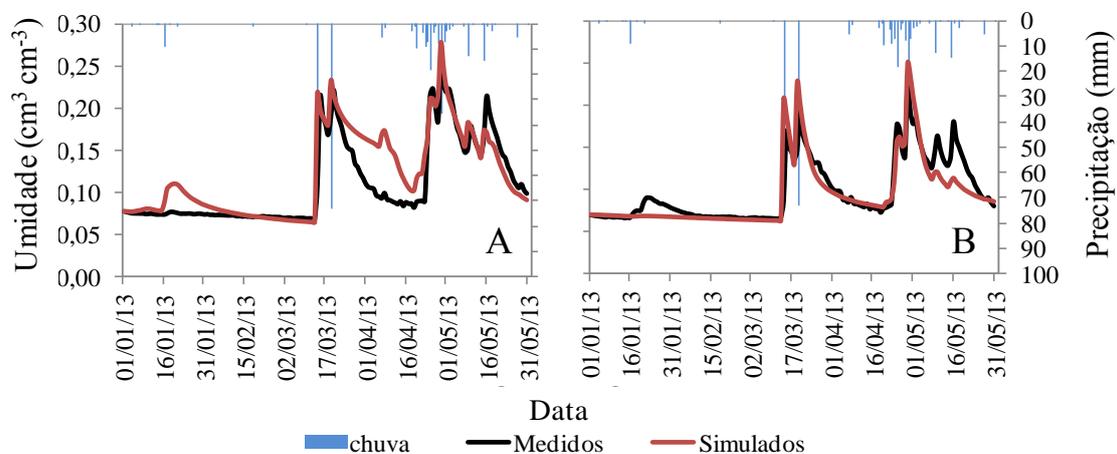


**Figura 37.** Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados para o ano de 2012; (A) Parcela com Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

### 6.5.3. Validação e avaliação de desempenho do modelo

O modelo foi validado com os dados do ano de 2013. Para validação utilizou-se os parâmetros de ajuste e calibração do ano de 2012 ( $\theta_r = 0,028 \text{ cm cm}^{-1}$ ;  $\theta_s = 0,38 \text{ cm cm}^{-1}$ ;  $\alpha = 0,028$ ;  $n = 1,489$ ;  $I = 0,5$ ;  $K_s = 180 \text{ cm dia}^{-1}$  para solos descoberto e  $K_s = 200 \text{ cm dia}^{-1}$  para cobertura natural, Tabela 6).

As Figuras 38A e 38B apresentam os valores diários medidos e simulados da umidade do solo para a condição de cobertura natural e solo descoberto no ano de 2013, respectivamente.



**Figura 38.** Comparação entre os valores de umidade do solo medida e simulada no ano de 2013 na profundidade de 20 cm; (A) Parcela de Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

Verifica-se comportamento similar entre os valores simulados e os medidos. Observa-se na Figura 38A que a umidade simulada acompanhou o comportamento da medida, com exceção do período de 21 de março a 20 de abril de 2013, em que a umidade simulada superestimou a umidade medida. Tal comportamento possivelmente está associado aos processos de interceptação e evapotranspiração, porém pode-se observar que o modelo respondeu sensivelmente aos picos de umidade do solo em resposta aos eventos de chuva. Considera-se que os resultados foram satisfatórios, uma vez que a simulação envolvendo vegetação natural é mais complexa em função dos processos hidrológicos e dinâmica da vegetação, tal como: sazonalidade da vegetação,

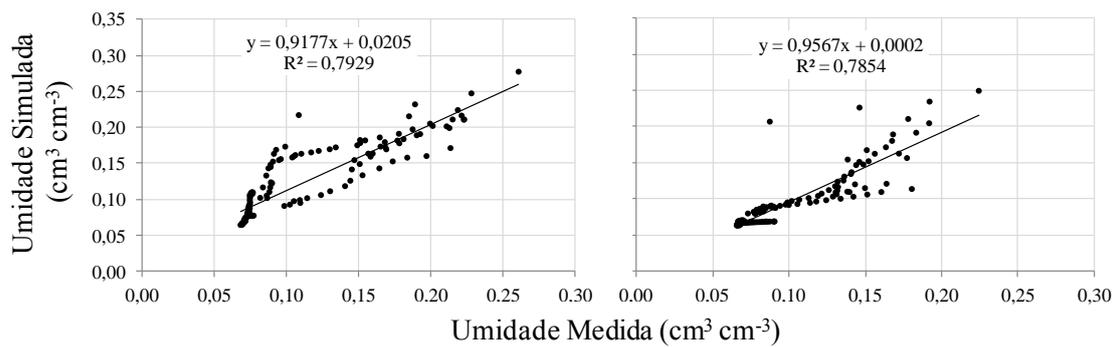
(o que implica em diferentes taxas de interceptação e extração de água ao longo do tempo), padrão de chuva, taxa de infiltração do solo e evapotranspiração.

Na Figura 38B pode-se observar que a umidade da parcela com solo descoberto também apresentou comportamento similar entre os valores medidos e observados. Os valores simulados subestimaram os medidos no período de 05 a 31 de maio de 2013, conseqüentemente o modelo considerou uma taxa de escoamento superior a que realmente ocorreu em função da umidade anterior.

Analisando as diferentes coberturas de solo, pode-se verificar que o modelo simulou a recessão da umidade no período de 21 de março a 20 de abril de 2013 na parcela com solo descoberto, diferindo do comportamento observado na parcela com cobertura natural. Tal comportamento pode estar associado aos processos hidrológicos envolvidos.

Os resultados apontam para a necessidade de quantificar experimentalmente os processos hidrológicos e biofísicos (interceptação, escoamento superficial, infiltração, índice de vegetação, saldo de radiação, temperatura da superfície do solo, evaporação e evapotranspiração real), a fim de garantir melhores ajustes, calibração e validação do modelo para diferentes usos do solo, principalmente nos períodos de transição seco-úmido e no período úmido, uma vez que, nesses períodos o modelo pode apresentar deficiência na sua capacidade de predição. Tais limitações são função da complexidade do processo de distribuição de água no solo, da distribuição da chuva e da interação entre os processos solo-água-planta-atmosfera, sendo necessário um maior refinamento dos parâmetros de entrada para fins de ajuste do modelo.

As Figuras 39A e 39B apresentam as correlações entre os valores medidos e simulados para condições de cobertura natural e solo descoberto no ano de 2013, respectivamente.



**Figura 39.** Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados para o ano de 2013; (A) Parcela com Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) encontrados indicam que 79,29 e 78,54% dos valores simulados aproximam-se e/ou assemelham-se aos valores medidos para condição de cobertura natural e solo descoberto, respectivamente. Observou-se uma pequena redução do coeficiente de 81,62% (ano de 2012-calibração dos dados) para 79,29% (ano de 2013-validação dos dados) para a parcela de cobertura natural (Figura 39A). A redução de 2,33% está possivelmente associada à taxa de interceptação e evapotranspiração, uma vez que a densidade de cobertura vegetal do solo no ano de 2012 foi inferior à de 2013, por conta da escassez de chuva no referido ano.

Para a parcela de solo descoberto (Figura 39B), a redução foi de 85,63 para 78,54%. Tal redução do coeficiente ocorreu em função de dois eventos de chuva nos dias 14 e 19 de março de 2013, onde os dados preditos pelo modelo superestimaram os medidos. A superestimação dos dados indica que o modelo considerou que o volume infiltrado superou o que realmente infiltrou, ou seja, a superestimativa está associada à repartição da chuva em relação aos outros processos envolvidos (infiltração, escoamento superficial e evaporação do solo), mesmo realizando a quantificação do escoamento superficial dos eventos ocorridos.

Os dados de umidade do solo apresentaram maior dispersão no ano de 2013. Tal comportamento possivelmente está associado à maior variabilidade da precipitação, com má distribuição da chuva e ocorrência de eventos extremos, bem como da dinâmica da vegetação, radiação incidente e temperatura do solo, resultando maior gradiente de umedecimento e secamento do solo, com conseqüente dispersão dos dados em função das condições biofísicas antecedentes ao monitoramento. Montenegro et al. (2013d), em

experimentação e modelagem do avanço de sais no perfil do solo em área cultivada com repolho sob alternativas de manejo de irrigação, no semiárido de Pernambuco, verificaram que o desempenho do processo de calibração foi altamente influenciado pela umidade antecedente.

Os índices estatísticos de avaliação de desempenho do modelo Hydrus-1D após a calibração e ajuste dos dados de umidade do solo, podem ser vistos na Tabela 14. Pode-se verificar que o modelo mostrou-se preciso para variável avaliada em conformidade com os índices aplicados.

**Tabela 14.** Índices estatísticos de avaliação do desempenho do modelo Hydrus-1D da umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )

ANO	TRATAMENTO	RMSE	d	NS
2012 (calibração)	PCN	0,01	0,93	0,79
	PD	0,01	0,94	0,82
2013 (validação)	PCN	0,03	0,93	0,72
	PD	0,02	0,94	0,74

PCN- Parcela com Cobertura Natural; PD- Parcela Descoberta; RMSE- Raiz do Erro Quadrático da Média; d- Coeficiente de Concordância de Willmott; NS- Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe

Monteiro et al. (2009) utilizaram o Hydrus para investigar o efeito de lâminas de lixiviação e da precipitação no controle da salinidade do solo em lisímetros de drenagem, e verificaram que, na profundidade de 20 cm, onde se situa a maior parte da zona de raízes, o modelo apresentou consistência entre os valores de tensão medidos e simulados. Zeng et al. (2013) encontraram boa concordância entre os valores de umidade do solo medidos e simulados utilizando o HYDRUS-1D, e eficiência da modelagem de Nash-Sutcliffe variando de 0,4865 a 0,9180. Kanzari et al. (2012) observaram que o modelo Hydrus-1D foi capaz de simular a dinâmica de água, com baixos valores de Raiz do Erro Quadrático da Média (RMSE).

Turnbull et al. (2010) avaliaram e modelaram os processos hidrológicos, a erosão e o transporte de nutrientes em área de transição de pastagem e mata em região semiárida dos Estados Unidos, e verificaram que o modelo Mahler apresentou bom desempenho com eficiência de Nash-Sutcliffe igual e/ou superior a 0,65. Montenegro e Ragab (2010) avaliaram e modelaram a resposta hidrológica utilizando o modelo

Dicas de uma bacia do semiárido brasileiro sob diferentes usos da terra e cenários de mudanças climáticas, e encontram um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) igual a 0,73 para a vazão simulada, e um coeficiente de correlação de 0,70 para os valores simulados e observados para o índice de umidade do solo.

A validação dos dados apresentou correlação e índices satisfatórios (Tabela 14). Os resultados encontrados permitem concluir que é possível utilizar o modelo Hydrus-1D para estimativa da umidade do solo em escala diária para o tipo de solo e condições de cobertura investigadas. A eficiência do modelo (NS) variou de 72 a 82%, com RMSE máximo de 3% e concordância superior a 90%. Apesar dos resultados terem sido satisfatórios, vale ressaltar que é necessário ampliar a série de estudo e avaliar o comportamento do modelo em anos mais chuvosos. Por se tratar de um modelo biofísico, a calibração e validação do modelo Hydrus-1D possibilitou adequada quantificação e entendimento dos processos de secamento e umedecimento do solo, especialmente para o período mais seco.

## **7. CONCLUSÕES**

### **7.1. Aspectos climáticos local**

1. Existe variabilidade temporal da chuva tanto entre os meses, quanto entre os anos;
2. Os maiores valores de umidade relativa são observados no período chuvoso (abril a julho). Adicionalmente observou-se que nesse período ocorre a maior variabilidade dos dados, porém não há presença de valores discrepantes;
3. A evapotranspiração apresentou tendências e grau de associação forte com a umidade relativa e com a radiação solar.

### **7.2. Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos em escala de parcela**

1. A cobertura morta mostrou eficiência na redução da geração de escoamento, e no controle da erosão;
2. Na ocorrência de eventos de chuva extremos, as perdas de água na parcela com barramento de palma forrageira são similares as perdas de água na parcela descoberta, porém as perdas totais de solo são mais elevadas na parcela descoberta;
3. O barramento com palma forrageira mostrou eficiência na redução da perda de solo, sendo considerada uma técnica promissora, principalmente para região que apresenta escassez de material vegetal que possa manter o solo completamente coberto ao longo do ano e por ser uma cultura resistente a seca;
4. O uso de cobertura morta reduziu em 98,3% a perda de água por escoamento superficial em relação ao solo descoberto, enquanto que o barramento com palma forrageira promoveu redução de 57,3%;
5. Dentre as condições de coberturas investigadas, a parcela com solo descoberto foi a que apresentou a maior correlação entre a precipitação e o escoamento superficial.

### **7.3. Efeito da cobertura morta sobre a temperatura superficial do solo**

1. A cobertura morta fornece uma zona intermédia, amortecendo as flutuações de temperatura da superfície do solo ao longo do tempo, reduzindo a temperatura da superfície do solo durante o dia, especialmente nos períodos mais quentes, e

ficando um pouco mais elevada durante a noite quando comparado ao solo descoberto;

2. As densidades mais elevadas de cobertura morta foram mais eficientes na redução das oscilações de temperatura da superfície do solo;
3. Para os tipos de cobertura morta estudados, a cobertura de pó de coco foi o mais eficaz no controle da temperatura da superfície do solo e a palha de Capim-Elefante foi a menos eficaz;
4. As folhas de cajueiro mostraram ser uma alternativa de cobertura morta para controlar a temperatura da superfície do solo.

#### **7.4. Dinâmica de umidade no solo e estabilidade temporal**

1. Os valores de umidade na camada de 20 a 40 cm foram mais elevados que os observados na camada de 0 a 20 cm, para as camadas de solos estudadas;
2. O solo descoberto na camada de 0 a 20 cm foi o que apresentou a menor umidade no período investigado, e a parcela com cobertura morta tem maior influência nos processos de infiltração e escoamento superficial;
3. A parcela com barramento de palma forrageira (PBP) apresentou níveis de umidade acima dos demais condições de cobertura nas duas camadas (0 a 20 cm e 20 a 40 cm), mostrando-se ser um sistema de captação *in situ* eficiente para as condições locais avaliadas, principalmente pós o estabelecimento da chuva;
4. A variabilidade temporal da umidade ocorre de forma similar entre as diferentes camadas para ambas as condições de cobertura;
5. Dentre as condições de cobertura estudadas a parcela com cobertura natural, foi a que apresentou valores mais estáveis em relação à média (camada de 0 a 20 cm), e na camada de 20 a 40 cm praticamente todos os pontos em todas as condições de cobertura apresentaram diferença relativa média próxima a zero e menor desvio padrão;
6. O ponto estável em cada condição de cobertura estudada foi: Cobertura Natural (7 e 8), Cobertura Morta (2 e 8), Barramento com Palma (7 e 7) e Solo descoberto (3 e 5), nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, respectivamente;

7. Os pontos estáveis apresentaram boa correlação com a média global, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,90, podendo os mesmos serem utilizados como referência na estimativa da umidade do solo em medições futuras.

#### **7.5. Modelagem da dinâmica de umidade sob diferentes condições de cobertura do solo através do modelo Hydrus-1D**

1. O modelo Hydrus-1D foi capaz de simular de com bom desempenho a dinâmica de umidade no solo ao longo do tempo para as condições de cobertura natural e solo descoberto na camada de 20 cm.
2. As principais incertezas nas simulações com o modelo Hydrus foram observadas na parcela com vegetação natural e na fase de recessão, após a ocorrência de chuvas intensas, devido à sazonalidade dos parâmetros biofísicos da caatinga.
3. A eficiência do modelo Hydrus variou de 72 a 82%, com RMSE máximo de 3% e índice de concordância superior a 90%.
4. A partir da modelagem numérica e dos padrões de chuva ocorridos, estimou-se que a cobertura de caatinga interceptou cerca de 15% da precipitação total.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M.I.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; ARAUJO FILHO, J.A. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica*, v.37, n.3, p.270-278, 2006.
- ALBUQUERQUE, A.W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.1, p.121-128, 2001.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, Irrigation and drainage, paper 56, 1998. 300p.
- ANDRADE, A.G.; FREITAS, P.L.; LANDERS, J. Aspectos gerais sobre o manejo e conservação do solo e da água e as mudanças ambientais. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. (eds.). *Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, cap.1, parte 1, p.23-40, 486 p., 2010.
- ARAÚJO, S.M.S. A região semiárida do Nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. *Rios Eletrônica- Revista Científica da FASETE*, ano 5, n.5, 2011.
- ARAÚJO, E.C.B.; AGUIAR, A.V.; COSTA, R.N.T. Calibração de um modelo de umidade para um solo aluvial sem cobertura vegetal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.3, p.444-449, 2001.
- ARAÚJO NETO, J.R.; ANDRADE, E.M.; PALÁCIO, H.A.Q.; SANTOS, J.C.N.; LOBATO, F.A.O. Análise comparativa do escoamento superficial de microbacias experimentais em clima semiárido tropical. *Water Resources and Irrigation Management*, v.2, n.3, p.111-120, 2013.
- ÁVILA, L.F.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. Estabilidade temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica na região da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.6, p.2001-2009, 2010.
- ÁVILA, L.F.; MELO, C.R.; MELLO, J.M.; SILVA, A.M. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.5, p.1801-1810, 2011.

- BARBOSA, T.B.; BERTOL, I.; WERNER, R.S.; RAMOS, J.C.; RAMOS, R.R. Comprimento crítico de declive relacionado à erosão hídrica, em três tipos e doses de resíduos em duas direções de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.4, p.1279-1290, 2012.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.3, p.657-668, 2000.
- BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; CASSOL, P.C.; AMARAL, A.J.; BARBOSA, F.T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um inceptisol sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, n.3, p.485-494, 2004.
- BERTOL, I.; MIQUELLUTI, D.J. Perdas de solo, água e nutrientes reduzidas pela cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.28, n.10, p.1205-1213, 1993.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; VISENTIN, D.; COGO, N.P. Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages (SC). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.2, p.455-464, 2002.
- BORGES, T.K.S. Desempenho de técnicas conservacionistas no controle da umidade, erosão hídrica e na produtividade do milho no semiárido pernambucano. Recife: UFRPE, Dissertação de Mestrado, 96 f., 2013.
- BOTTERON, C.; DAWES, N.; LECLÈRE, J.; SKALLOUD, J.; WEIJS, S.V.; FARINE, P.A. Soil moisture & snow properties determination with gns in alpine environments: challenges, status, and perspectives. *Remote Sensing*, v.5, n.7, p.3516-3543, 2013.
- BRASILEIRO, R.S. Alternativas de desenvolvimento sustentável no semiárido nordestino: da degradação à conservação. *Scientia Plena*, v.5, n.5, 2009.
- BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. Soil moisture temporal stability over experimental áreas of central Italy. *Geoderma*, v.148 (3-4), p.364-374, 2009.
- CAMPOS FILHO, O.R.; SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P.; LEPRUN, J.C. Avaliação de perdas de solo e de água num Podzólico Vermelho-Amarelo orto do Agreste de Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.26, n.7, p.1057-1062, 1991.

- CANTALICE, J.R.B.; SILVA, M.D.R.O.; RODRIGUES, J.J.V.; PESSOA, L.M. Estrutura lenhosa e hidrodinâmica do escoamento superficial em uma área de caatinga. *Revista Caatinga*, v.21, n.4, p.201-211, 2008.
- CARDOSO, D.P.; SILVA, M.L.N.; CARVALHO, G.J.; FREITAS, D.A.F.; AVANZI, J.C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.6, p.632–638, 2012.
- CARVALHO, D.F.; CRUZ, E.S.; PINTO, M.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.1, p.3–9, 2009.
- CHAVES, H.M.L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do Solo em diferentes texturas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, n.2, p.33-37, 2009.
- CHAMIZO, S.; CANTÓN, Y.; CABALLERO-RODRÍGUEZ, E.; DOMINGO, F.; ESCUDERO, A. Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: a complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics. *Journal of Hydrology*, v.452–453, p.130–138, 2012.
- COGO, N.P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas de erosão em condições de chuva natural. I. Sugestões gerais, medição dos volumes, amostragem e quantificação de solo e água de enxurrada. 1ª aproximação. In: II Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, Passo fundo, Anais, EMBRAPA, p.75-98, 1978.
- COGO, N.P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.4, p.743-753, 2003.
- COSH, M.H.; JACKSON, T.J.; MORAN, S.; BINDLISH, R. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semiarid watershed. *Remote Sensing of Environment*, v.112 (2), p.304–313, 2008.
- COSTA, C.F.G.; FIGUEIREDO, R.O.; OLIVEIRA, F.A.; SANTOS, I.P.O. Escoamento superficial em Latossolo Amarelo distrófico típico sob diferentes agroecossistemas no nordeste paraense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.2, p.162–169, 2013.

- CUNHA, J.E.B.L.; TAVEIRA, I.M.L.M.; RUFINO, I.A.A.; ALCÂNTRA, H.M. Dinâmica sazonal da cobertura do solo em uma região semiárida e seus impactos no ciclo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.19, n.2, p.197-207, 2014.
- EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos - UEP Recife; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 252 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 11). 1 CD Rom.
- ELAIUY, M.L.C.; SATO, L.M.; VARALLO, A.C.T.; SOUZA, C.F. Desenvolvimento e avaliação de sonda TDR para o manejo racional de água em substratos utilizados na produção de mudas florestais. *Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v.4, n.1, p.117-131, 2009.
- ELMI, A.; NOHRA, J.S.A.; MADRAMOOTOO, C.A.; HENDERSHOT, W. Estimating phosphorus leachability in reconstructed soil columns using HYDRUS-1D model. *Environ Earth Sci*, v.65 (6), p.1751–1758, 2012.
- FIGUEIREDO, A.C.; MONTENEGRO, A.A.A.; PINA, A.P.; SILVA, J.R.L.; FONTES JÚNIOR, R.V.P.; MORENO, A.V.; SILVA, V.P.; GOMINHO, M.F.A.; CORRÊA, M.M. Análise comparativa do regime pluviométrico em regiões semiáridas (Arquipélago de Cabo Verde e Agreste do Nordeste Brasileiro). In: 9º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa), Benguela, Angola, 2009.
- FONTES JÚNIOR, R.V.P.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.; SANTOS, T.E.M. Estabilidade temporal da potenciometria e da salinidade em vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)*, v.16, n.11, p.1188-1197, 2012.
- GAO, L.; SHAO, M. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Catena*, v.95, p.24–32, 2012.
- 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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.1, p.155-164, 1999.
- GONÇALVES, M.C.; RAMOS, T.B.; ŠIMŮNEK, J.; NEVES, M.J.; MARTINS, J.C.; PIRES, F.P.; LEITÃO, P. Modelação da dinâmica da água e dos sais num Aluviossolo regado com águas de diferente qualidade: ensaio de validação do

- modelo HYDRUS-1D com observações em monólitos. *Revista de Ciências Agrárias* (online), v.30, n.2, p.38-52, 2007.
- GUTIERREZ-LOPEZ, J.; ASBJORNSEN, H.; HELMERS, M.; ISENHART, T. Regulation of soil moisture dynamics in agricultural fields using strips of native prairie vegetation. *Geoderma*, v.226–227, p.238–249, 2014.
- HORNER, W.W.; JENS, S.W. Surface runoff determination from rainfall without using coefficients. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, New York, v.107, n.3, p.1039-1117, 1941.
- HU, W.; TALLON, L.K.; SI, B.C. Evaluation of time stability indices for soil water storage up scaling. *Journal of Hydrology*, v.475, p.229–241, 2012.
- HU, W.; WANG, Q.; REICHARDT, K. Time stability of soil water storage measured by neutron probe and the effects of calibration procedures in a small watershed. *Catena*, v.79, n.1, p.72–82, 2009.
- IZIDIO, N.S.C.; PALÁCIO, H.A.Q.; ANDRADE, E.M.; ARAÚJO NETO, J.R.; BATISTA, A.A. Interceptação da chuva pela vegetação da caatinga em microbacia no semiárido cearense. *Revista Agro@mbiente On-line*, v.7, n.1, p.44-52, 2013.
- JACOBS, J.M., MOHANTY, B.P., HSU, E.C., MILLER, D. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, v.92 (4), p.436–446, 2004.
- KANZARI, S.; HACHICHA, M.; BOUHLILA, R.; BATTLE-SALES, J. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunísia (BouHajla, Kairouan) – Salinization risk of soils and aquifers. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.86, p.34–42, 2012.
- LEI, Y.; LUBO, G.; HUAXING, B.; QINGKE, Z.; XIAOYAN, W. Spatio-temporal dynamics of soil moisture in silvopastoral system in the Loess Plateau of west Shanxi province. *Procedia Environmental Sciences*, v.8, p.153-160, 2011.
- LEI, Y.; WEI, W.; CHEN, L.; CHEN, W.; WANG, J. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, v.115, p.123–133, 2014.

- LI, R.; HOU, X.; JIA, Z.; HAN, Q.; REN, X.; YANG, B. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. *Agr. water manage.*, v.116, p.101-109, 2013.
- LIN, H.S.; WHEELER, D.; BELL, J.; WILDING, L. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modelling*, v.182, n.3-4, p.271-290, 2005.
- LIU, G.; DAI, F.; NAN, L.; DU, S. Assessing the suitability of soil and water conservation practices in South western China. *Land Use Policy*, v.30 (1), p.319–327, 2013.
- MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; MARQUES, J.J.G.S.M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.3, p.395-403, 2003.
- MELO FILHO, J.F.; LIBARDI, P.L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transecção. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.4, p.497-506, 2005.
- 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*, v.17, n.3, p.101-113, 2013.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; BESERRA, E.A.; LACERDA, F.F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H.R.; GALVÃO, C.O.; PAZ, V.P.S. (Ed.) *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Campina Grande – PB, 2011. P. 383–416.
- MARTÍNEZ-FERNANDEZ, J.; CEBALLOS, A. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. *Journal of Hydrology*, v.312 (1-4), p.28-38, 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*, v.20, n.2, p.430–441, 2015.
- MENDES, C.A.R.; MAHLER, C.F.; ANDRADE, A.G. Erosão superficial em Argissolo Amarelo sob cultivo perene e com pousio florestal em área de relevo montanhoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.4, p.1387-1396, 2011.

- MONTEIRO, A.L.N.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, F.X. Avaliação de lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.29, n.2, p.207-220, 2009.
- MONTENEGRO, A.A.A.; ABRANTES, J.R.C.B.; DE LIMA, J.L.M.P.; SINGH, V.P.; SANTOS, T.E.M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, v.109, p.139-149, 2013a.
- MONTENEGRO, A.A.A.; DE LIMA, J.L.M.P.; ABRANTES, J.R.C.B.; SANTOS, T.E.M. Impact of mulching on soil and water conservation in semiarid catchment: Simulated rainfall in the Field and in the Laboratory. *Die Bodenkultur*, v.64 (2-3), p.79-85, 2013b.
- MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In: GHEYI, H.R.; PAZ, V.P.S.; MEDEIROS, S.S.; GALVÃO, C.O. (eds.). *Recursos hídricos em regiões semiáridas*. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, cap.1, p.25-51, 2012.
- MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrological Processes*, v.24, n.19, p.2705-2723, 2010.
- MONTENEGRO, A.A.A.; SANTOS, E.S.; SANTIAGO, E.; SILVA, J.R.L.; FONTES JÚNIOR, R.V.P. O desafio da gestão de recursos hídricos em vales aluviais no semiárido de Pernambuco-Brasil. In: XI Simpósio De Hidráulica E Recursos Hídricos Dos Países De Língua Oficial Portuguesa, Maputo – Moçambique, 2013c.
- MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A. Aproveitamento sustentável de aquíferos aluviais no semiárido. In: CABRAL, J.J.S.; FERREIRA, J.P.C.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; COSTA, W. (eds.). *Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, cap.2, p.61-117, 2004.
- MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA JUNIOR, J.G.; MONTENEGRO, A.A.A.; CARVALHO, J.F.; ALBUQUERQUE FILHO, J.A.C. Experimentação e modelagem do avanço de sais no perfil do solo em área cultivada com repolho sob alternativas de

- manejo de irrigação, no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.8, n.1, p.148-155, 2013d.
- MONTENEGRO, S.M.G.L.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: a case study from North Eastern Brazil. *Journal of Hydrology*, v.434-435, p.55-68, 2012.
- MUALEM, Y.A. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, Washington, US, v.12, p.2187-2193, 1976.
- ODRIOZOLA, I.; BAQUERO-GARCÍA, G.; LASKURAIN, N.A.; ALDEZABAL, A. Livestock grazing modifies the effect of environmental factors on soil temperature and water content in a temperate grassland. *Geoderma*, v.235-236, p.347-354, 2014.
- OLIVEIRA, F.P.; BUARQUE, D.C.; VIERO, A.C.; MERTEN, G.H.; CASSOL, E.A.; MINELLA, J.P.G. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.4, p.337-346, 2012.
- PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; SOBRINHO, T.A.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1777-1785, 2011.
- PERES, J.G.; SOUZA, C.F.; LAVORENTI, N.A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. *Engenharia Agrícola*, v.30, n.5, p.875-886, 2010.
- PINHO, R.E.C.; MIRANDA, J.H. Avaliação do modelo Hydrus-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.34, n.5, p.899-911, 2014.
- PORTELA, J.C.; COGO, N.P.; AMARAL, A.J.; GILLES, L.; BAGATINI, T.; CHAGAS, J.P.; PORTZ, G. Hidrogramas e sedimentogramas associados à erosão hídrica em solo cultivado com diferentes sequências culturais, com diferentes condições físicas na superfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.1, p.225-240, 2011.
- PRUSKI, F.F. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F.F., ed. *Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2ª ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p.40-73, 2009.

- PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. Escoamento superficial. Viçosa: UFV, 2003. 88 p.
- REBOUÇAS, A.C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. Estudos Avançados, v.11, n.29, p.127-154, 1997.
- RIVERA, R.N.C.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; BOTREL, T.A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento - análise de sensibilidade. Revista de Engenharia Agrícola, v.28, n.3, p.448-459, 2008.
- SANTOS, G.G.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, v.14, n.2, p.115–123, 2010.
- SANTOS, J.Y.G.; SANTOS, C.A.G. Perdas de água e solo utilizando chuva simulada em diferentes coberturas superficiais e condições de umidade no semiárido paraibano. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, n.4, p.217-228, 2012.
- SANTOS, T.E.M. Dinâmica espacial e temporal da umidade do solo em bacia experimental do semiárido pernambucano. Recife: UFRPE, Tese de Doutorado, 68 f., 2010.
- SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A. Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no agreste central pernambucano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, n.8, p.871–880, 2012.
- SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A.; PEDROSA, E.M.R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semi-árido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.3, p.217–225, 2009.
- SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA, E.F.F.; LIMA NETO, J.A. Perdas de carbono orgânico, potássio e solo em Neossolo Flúvico sob diferentes sistemas de manejo no semiárido. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.2, n.2, p. 143-149, 2007.
- SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA, D.D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.7, p.670-679, 2011.
- SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA JUNIOR, V.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em

- diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.13, n.2, p.113-125, 2008.
- SANTOS, T.E.M.; SILVA, D.D.; MONTENEGRO, A.A.A. Temporal variability of soil water content under different surface conditions in the semiarid region of the Pernambuco State. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1733-1741, 2010.
- SCHNEIDER, K.; HUISMAN, J.A.; BREUER, L.; ZHAO, Y.; FREDE, H.G. Temporal stability of soil moisture in various semi-arid steppe ecosystems and its application in remote sensing. *Journal of Hydrology*, v.359 (1-2), p.16-29, 2008.
- SHEN, J.Y.; ZHAO, D.D.; HAN, H.F.; ZHOU, X.B.; LI, Q.Q. Effects of straw mulching on water consumption characteristics and yield of different types of summer maize plants. *Plant Soil Environmental*, v.4, n.58, p.161–166, 2012.
- SILVA, J.R.L. Caracterização físico-hídrica de três bacias experimentais do Estado de Pernambuco para suporte à modelagem hidrológica. Recife: UFRPE, Dissertação de Mestrado, 99 f., 2010.
- SILVA, J.R.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; SANTOS, E.S.; SILVA, T.A. Caracterização de eventos chuvosos em bacia hidrográfica experimental do semiárido nordestino. In: VI Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Recife-PE, 2006.
- 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. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.1, p.27–36, 2012.
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. Análise das perdas de água e solo em um Vertissolo Cromado sob diferentes sistemas de manejo. *Boletim Goiano de Geografia*, v.32, n.2, p.93-107, 2012.
- SILVA JUNIOR, V.D. Investigação do escoamento superficial e produção de sedimentos em bacia representativa do semiárido. Recife: UFRPE, Dissertação de Mestrado, 99f., 2010.
- ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, M.H.; SAKAI, M.; Van GENUCHTEN, M. Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated

- Media.Version 4.08. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, USA, p.332, 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 (1), p.26-32, 2011.
- SOUZA, C.F.; PIRES, R.C.M.; MIRANDA, D.B.; VARALLO, A.C.T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. *Revista Irriga*, v.18, n.4, p.597-606, 2013.
- STAUB, M.J.; GOURC, J.P.; LAURENT, J.P.; KINTZUGER, C.; OXARANGO, L.; BENBELKACEM, H.; BAYARD, R.; MORRA, C. Long-term moisture measurements in large-scale bioreactor cells using TDR and neutron probes. *Journal of Hazardous Materials*, v.180 (1-3), p.165–172, 2010.
- SUR, C.; JUNG, Y.; CHOI, M. Temporal stability and variability offield scale soil moisture on mountainous hillslopes in Northeast Asia. *Geoderma*, v.207–208, p.234–243, 2013.
- TELLES, T.S.; GUIMARÃES, M.F.; DECHEN, S.C.F. The costs of soil erosion. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.2, p.287-298, 2011.
- TURNBULL, L.; WAINWRIGHT, J.; BRAZIER, R.E. Hydrology, erosion and nutrient transfers over a transition from semi-arid grassland to shrubland in the South-Western USA: A modelling assessment. *Journal of Hydrology*,v.388 (3-4), p.258–272, 2010.
- VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Science Society of America Journal*, v.49, n.4, p.822-828, 1985.
- Van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, v.44, n.5, p.892-898, 1980.
- van WESENBEECK, I.J.; KACHANOSKI, R.G. Spatial and temporal distribution of soil water in the tiled layer under a corn crop. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, p.363-368, 1988.
- VANCLOOSTER, M.; VIANE, P.; DIELS, J.; CHRISTIAENS, K. WAVE: A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose

- environment. Reference and User's Manual (release 2.0). Belgium: Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, 1994. 145p.
- VOLK, L.B.S.; COGO, N.P.; STRECK, E.V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.763-774, 2004.
- YANG, L.; CHEN, L.; WEI, W. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semiarid regions. *Catena*, v.124, p.138–146, 2015.
- YANG, L.; WEI, W.; CHEN, L.; CHEN, W.; WANG, J. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, v.115, p.123–133, 2014.
- ZANETTE, S.V.; SAMPAIO, S.C.; SILVESTRE, M.G.; BOAS, M.A.V.; URBE-OPAZO, M.A.; QUEIROZ, M.M.F. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.3, p.239–247, 2007.
- ZENG, W.; XU, C.; WU, J.; HUANG, J. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis. *Journal of Arid Land*, v.6, n.1, p.44-58, 2013.
- ZHANG, S.; LÖVDAHL, L.; GRIP, H.; TONG, Y.; YANG, X.; WANG, Q. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, v.102 (1), p.78–86, 2009.
- ZHAO, X.; HUANG, J.; WU, P.; GAO, X. The dynamic effects of pastures and crop on runoff and sediments reduction at loess slopes under simulated rainfall conditions. *Catena*, v.119, p.1–7, 2014.
- ZOKAIB, S.; NASER, Gh. A study on rainfall, runoff, and soil loss relations at different land uses – A case in Hilkot watershed in Pakistan. *International Journal of Sediment Research*, v.27, n.3, p.388–393, 2012.
- VIEIRA, S.R.; GARCIA, M.A.G.; GONZÁLEZ, A.P.; SIQUEIRA, G.M. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. *Revista Bragantia*, Campinas, v.69, n.1, p.181-190, 2010.

WANG, S.; FU, B.; GAO, G.; LIU, Y.; JI ZHOU. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, v.101, p.122–128, 2013.

## 9. APÊNDICES

Artigo publicado:

SILVA, J.R.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTEIRO, A.L.N.; SILVA JUNIOR, V.P. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.10, n.2, p.293-303, 2015.