

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE DOUTORADO**

**ESTIMAÇÃO DA PERCOLAÇÃO EM LISÍMETROS DE DRENAGEM
E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA BANANEIRA USANDO TDR**

ALISSON JADAVI PEREIRA DA SILVA

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JUNHO - 2013**

ESTIMAÇÃO DA PERCOLAÇÃO EM LISÍMETROS DE DRENAGEM E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA BANANEIRA USANDO TDR

ALISSON JADAVI PEREIRA DA SILVA

Engenheiro Agrônomo

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2007

Mestre em Irrigação e Drenagem

Universidade de São Paulo, 2009

Tese submetida ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Ciências Agrárias, Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Sustentabilidade de Sistemas Hidroagrícolas.

Orientador: Dr. Eugênio Ferreira Coelho

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CRUZ DAS ALMAS – BAHIA – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIA

**COMISSÃO EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE ALISSON JADAVI
PEREIRA DA SILVA**

Dr. Eugênio Ferreira Coelho (Orientador)
EMBRAPA Mandioca e Fruticultura

Dr. Maurício Antônio Coelho Filho
EMBRAPA Mandioca e Fruticultura

Dr. José Leonaldo Souza
Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Dr. Luciano da Silva Souza
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

Dr. Delfran Batisa dos Santos
Instituto Federal Baiano – IF Baiano

Tese homologada pelo Colegiado de Curso de Doutorado em Ciências Agrárias
em _____

Conferindo o Grau de Doutor em Ciências Agrárias em _____

Dedico

A minha mãe Marilene e ao meu pai Alcides (em memória)

A minha companheira Daiane e ao meu filho Guilherme

As minhas irmãs Alciene e Alcione, e a Regina

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus espíritos protetores.

Ao meu orientador Eugênio Ferreira Coelho pela amizade, preciosas orientações, e por guiar-me para os caminhos acadêmicos, científicos e de outros aspectos da vida com muita luz, durante o doutorado e desde o ano de 2004.

Aos professores e técnicos que compõem o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da UFRB por possibilitarem a continuidade de minha formação acadêmica.

Aos dirigentes do Instituto Federal Baiano, Campus Senhor do Bonfim, pela permissão do doutoramento.

A EMBRAPA Mandioca e Fruticultura pelo apoio no desenvolvimento do experimento.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo por meio do programa CAPES-EMBRAPA.

A FAPESB pelo apoio financeiro para execução do projeto que deu origem ao trabalho.

Aos meus amigos Tacísio e Julival por fazerem do trabalho de campo uma atividade alegre e estarem sempre dispostos.

Ao amigo Maurício, por sempre me transmitir bons pensamentos, incentivando-me a seguir carreira acadêmica e de pesquisa.

Aos professores: Vital, Chico, Tales, e Aureo pelo apoio em minha carreira profissional.

A equipe de pesquisa em Irrigação da EMBRAPA: Eugênio, Maurício, Tibério, Tacísio, Julival, Ruan, Edvaldo, Torquatro, Arthur, Jackson, Raone, Tell, João, Damiana, Veinho, Carina, Dionei, Elves e Djalma.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	
ABSTRACT	
INTRODUÇÃO	01
Capítulo 1	
PERCOLAÇÃO DE ÁGUA ESTIMADO COM USO DE REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO EM LISÍMETROS DE DRENAGEM	11
Capítulo 2	
ESTIMAÇÃO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO POR DIFERENTES METODOLOGIAS USANDO TDR.....	35
Capítulo 3	
VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DAS DEPLEÇÕES DE ÁGUA NA REGIÃO DO SOLO EXPLORADO PELAS RAÍZES DA BANANEIRA IRRIGADA....	57
Capítulo 4	
ESTIMAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA BANANEIRA PELO BALANÇO HÍDRICO NO SOLO EM LISÍMETROS	86
CONSIDERAÇÕES FINAIS	107

ESTIMAÇÃO DA PERCOLAÇÃO EM LISÍMETROS DE DRENAGEM E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA BANANEIRA USANDO TDR

Autor: Alisson Jadavi Pereira da Silva

Orientador: Eugênio Ferreira Coelho

RESUMO: A elaboração e análise de metodologias que possibilitam quantificar a percolação, a extração de água no solo e a evapotranspiração das culturas contribuem na resolução de problemas envolvidos no sistema solo-água-planta-atmosfera. Alguns componentes básicos deste sistema podem ser determinados com o balanço de água no solo utilizando TDR. Os objetivos específicos deste trabalho foram: (i) avaliar a estimativa da percolação com TDR utilizando a lei de Darcy-Buckingham com funções $K(\theta)$ determinadas por métodos de campo e laboratório, bem como pela variação de armazenagem de água no perfil monitorado por diferentes números de sondas de TDR; (ii) definir um número mínimo de pontos de monitoramento de umidade do solo para instalação de sondas de TDR que possibilite obtenção de um balanço de água do solo em condições de campo com precisão e acurácia comparada a obtida em lisímetros de drenagem; (iii) determinar a evapotranspiração, as zonas de extração de água da bananeira e indicar a correta localização de sensores de água no solo. Construíram-se oito lisímetros de drenagem com 5 m^3 , sendo quatro preenchidos com solo de textura argila-arenosa e quatro com areia-franca. Sondagens de TDR foram instaladas em um total de 72 sondas por lisímetros. A precisão e acurácia das determinações realizadas pela TDR foram avaliadas por meio do teste de hipótese de nulidade conjunta, com um grau de confiança de 95%. As principais contribuições científicas deste trabalho referem-se à produção de critérios para uso de uma metodologia que possibilita a determinação da evapotranspiração da bananeira, bem como perdas por percolação por meio do balanço de água no solo com uso de TDR e com precisão e acurácia próxima ao método lisimétrico.

Palavras-chave: fluxo de água no solo, extração de água, balanço hídrico

ESTIMATES OF PERCOLATION IN DRAINAGE LYSIMETERS AND EVAPOTRANSPIRATION OF BANANA CROP USING TDR

Author: Alisson Jadavi Pereira da Silva

Adviser: Eugênio Ferreira Coelho

ABSTRACT: The generation and analysis of methods that allow quantifying the percolation, root water uptake and crop evapotranspiration provides an understanding of the processes involved in the soil-water-plant-atmosphere relationship. Some basic components of soil-water-plant-atmosphere system can be determined by soil water balance using TDR. The specific aims of this study were: (i) analyze the estimation of soil water percolation with TDR using Darcy's law determining $K(\theta)$ functions by direct field methods and indirect laboratory methods, as well as by monitoring of water storage variation in soil profile monitored by different numbers of TDR probe; (ii) set a minimum number of monitoring for installation of TDR probes that allows obtaining a soil water balance under field conditions with precision and accuracy compared to use drainage lysimeters; (iii) determine the evapotranspiration, water uptake patterns of banana crop and indicate the correct placement of sensors. Were built eight drainage lysimeters with 5m^3 and filled with sandy loam soil and sandy clay soil. To test the consistency of TDR-estimated percolation levels in comparison with the observed leachate levels in the drainage lysimeters, the combined null hypothesis was tested with a confidence level of 95%. The main scientific contributions of this work relate to the production of a methodology that enables the determination of percolation and banana evapotranspiration through soil water balance using TDR with precision and accuracy near the lysimeter method.

Key words: soil water flux, water extraction, water balance

INTRODUÇÃO

Apesar da dificuldade em se estimar a quantidade de água existente no planeta, estudos indicam que o volume total de água no mundo é aproximadamente 1,4 bilhões (1.386 milhões) Km^3 de água (Shiklomanov, 1993). Assume-se em nível mundial que esta água encontra-se em um ciclo contínuo através dos estados líquidos, sólidos e vapor, existindo uma minúscula fração de ganho ou perda. Aceitando esta hipótese, Christopherson (2002) declara que a quantidade total de água na Terra tem-se mantido relativamente constante desde cerca de 2 bilhões de anos atrás. Deste total, apenas 2,5 % ou 35 milhões Km^3 é água doce. Entretanto, aproximadamente dois terços desta água doce (23,30 milhões Km^3) ocorrem em forma de gelo ou neve em regiões polares ou montanhosas (principalmente Antártica e Groenlândia), sendo assim, pouco acessível ao uso. Desta forma, o total de água doce disponível no planeta (incluindo vapor atmosférico) totaliza apenas 11,7 milhões km^3 ou 0,8% do total de água do planeta.

Se por um lado a quantidade de água disponível no planeta mantém-se constante, a demanda pelo volume disponível aumenta rapidamente com o passar do tempo, devido ao crescimento populacional. Em 1950 o mundo continha 2,5 bilhões de pessoas, em 1980 este número passou para 4,4 bilhões, 6 bilhões em 2000 e atualmente o mundo contém cerca de 7 bilhões de pessoas (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2002). A expectativa é que este número seja elevado para 8 bilhões em 2025 e 9,3 bilhões em 2050.

O aumento populacional representa uma elevação na demanda por recursos hídricos, pela necessidade de manutenção da pesca, abastecimento humano e industrial, turismo, navegação, hidroeletricidade e produção agrícola com uso de irrigação. De todas estas demandas citadas, a irrigação é a que mais deriva água

dos mananciais. Com exceção da Europa e América do Norte, nas demais regiões do planeta o volume de água utilizado na agricultura se destaca das demais, sendo que em média cerca de 70% de toda água retirada dos mananciais do planeta é para uso na agricultura (FAO, 2013). No Brasil, atualmente 72% da vazão efetivamente consumida dos mananciais correspondem a demanda por irrigação (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2012).

Tendo em vista o aumento na produção por área cultivada proporcionado pela irrigação, bem como a independência de chuvas para obtenção de colheitas, o crescimento da irrigação pode ser um imperativo para atingir os objetivos de redução da fome e da pobreza. A ampliação da área irrigada depende da melhoria na eficiência do uso da água pela irrigação, pois, de acordo com FAO (2013) em média, 55% do total de água derivado para uso na agricultura são perdidos. Vinte e cinco por cento do total são perdidos na aplicação de água.

O desafio de elevar a eficiência de aplicação de água na irrigação passa pela necessidade de geração e análise de metodologias que possibilitem, em condição de campo, avaliar variáveis do sistema solo-água-planta-atmosfera, tais como percolação, extração de água no solo e evapotranspiração das culturas.

Alternativa comumente utilizada é a equação de Darcy-Buckingham, que possibilita quantificar o fluxo vertical de água em solos não saturados (Jiménez – Martínez et al., 2009; Ji et al., 2007; Skaggs et al., 2006); entretanto, algumas dificuldades relacionadas a seu uso são evidenciadas por Reichardt & Timm (2012). Dentre estas dificuldades, a necessidade de uso da condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ na forma exponencial tem sido destaque por propiciar margens a grandes erros para pequenas variações nos valores de umidade do solo (Mubarak et al., 2010; Ghiberto & Moraes, 2011). Não obstante, a equação de Darcy-Buckingham tem sido frequentemente utilizada para estimar o fluxo de água no solo sem registros de problemas quanto ao seu uso (Cruz et al., 2005; Campos et al., 2007). Entretanto, em outros trabalhos, a determinação do fluxo de água no solo utilizando a relação $K(\theta)$ foi inadequada (Selle et al., 2011; Willis et al., 1997).

Pesquisas têm feito uso da Reflectometria no Domínio do tempo (TDR) para estimativa do fluxo de água em solos não saturados (Baram et al., 2012; Selle et al., 2011; Silva et al., 2009). Para estes fins, o uso da TDR tem como base a medida do tempo de propagação do sinal refletido na falha de um cabo, que é

induzido mediante a inserção de uma sonda no final do cabo. Assim, o sinal emitido pelo TDR percorre o cabo co-axial de impedância constante até chegar à sonda no final do cabo, onde, pelas alterações no início da mesma, sofre uma reflexão, continuando o percurso nas hastes da sonda até o seu final, onde é definitivamente refletido de volta ao TDR. O tempo de ida e de volta do sinal eletromagnético no comprimento da haste da sonda irá variar conforme a impedância do meio que a envolve. O valor desta impedância está relacionado com a configuração geométrica da sonda e é inversamente proporcional a constante dielétrica do material circundante.

Portanto, o tempo que leva o pulso eletromagnético para percorrer a hastes da sonda pode ser descrito pela constante dielétrica do material circundante juntamente com o comprimento da haste, conforme equação 1:

$$\Delta t = \frac{2L\sqrt{K_a}}{c} \quad (1)$$

em que, K_a é a constante dielétrica aparente, c é a velocidade da luz, e L é o comprimento da haste da sonda.

Neste caso, conhecendo-se os procedimentos necessários ao uso da técnica TDR, pode-se proceder ao cálculo do fluxo de água no solo, sem a necessidade da predeterminação de propriedades hidráulicas, como a curva de retenção, a função condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ e a condutividade hidráulica saturada (K_s), tornando necessária apenas a calibração do conjunto sonda-TDR para leituras de umidade a partir da constante dielétrica (Sant'ana et al., 2012). Desta forma, monitorando a umidade em um perfil de solo com dimensões horizontal e vertical, no qual sondas de TDR são distribuídas em pontos do perfil, pode-se determinar o fluxo de água no solo por meio da variação de armazenagem de água em curtos intervalos de tempo, conforme Silva et al., (2009). Além disso, esta metodologia permite o conhecimento das variações de armazenamento de água no solo no espaço e no tempo na região explorada pelas raízes das plantas, o que é de suma importância para orientar estudos que visam determinar o balanço de água no solo com fins de determinação da evapotranspiração, verificar a zona efetiva de extração de água no solo, e indicar a correta região para manejo de água, fertilizantes e pesticidas.

Apesar destas possibilidades, o volume de solo a ser considerado para tais estudos ainda é determinado arbitrariamente (Hillel, 2004). Este fato pode levar a

incertezas, principalmente no cálculo de evapotranspiração, devido ao não controle total da variação da umidade na região explorada pelas raízes de uma cultura. Como se pode observar na Tabela 1, existe uma grande variação no número de pontos utilizados para monitorar a umidade do solo em trabalhos que determinam as variações do armazenamento de água no solo para estimativa da evapotranspiração/extração de água de um cultivo.

Tabela 1. Número de sensores utilizados para monitoramento de umidade por alguns trabalhos que estudaram a evapotranspiração ou extração de água pelas culturas.

Fonte	Cultura	Sensor (Número de sondas)
Andreu et al. (1997)	Amendoeira	Tensiômetro (46) sonda de nêutrons (31)
Green & Clothier (1995)	kiwi	TDR (22)
Wu et al (1999)	Milho e trigo	Tensiômetro (24) Sonda de nêutrons (2)
Green & Clothier (1999)	Macieira	TDR (90)
Palomo et al (2002)	Oliveira	Sonda de neutrons (4) Tensiômetro (5)
Silva et al (2009)	Banana	TDR (20)
Coelho et al (2007)	Limoeiro	TDR (48)

Allen et al. (2011) apresentam os problemas típicos na estimativa de ET associados ao método do balanço de água no solo, destacando a variabilidade espacial e temporal da atividade de extração de água no solo pelas raízes das plantas, recomendando primeiramente o conhecimento da região de atividade radicular para posterior quantificação das depleções de água no solo.

Trabalhos que ilustram a distribuição de extração de água no solo em duas dimensões (Silva et al., 2009; Coelho et al., 2010; Silva et al., 2012) revelam a ocorrência de variabilidade da extração de água no espaço do solo ocupado pelas raízes da bananeira. Este fato instiga a verificação da hipótese de que ocorrem diferenças nos valores de evapotranspiração da bananeira determinados pelo balanço de água no solo em função do número de perfis, baterias e números de sensores de umidade instalados na região radicular de uma cultura para monitoramento das variações de umidade no solo.

Comprovar ou rejeitar hipóteses surgidas dos problemas supracitados utilizando a bananeira é importante devido à cultura representar uma importante

commodity agrícola para muitos países em desenvolvimento (Ding et al., 2013) e ser muito exigente em água (Akinro et al., 2012) e adubação (Ratke et al., 2012); pois, conforme Turner et al (2007) a água é o mais provável fator limitante não biológico que afeta a produção da bananeira. De acordo com a FAO (2013) a área colhida da cultura é de 5.157.466 ha com produção total de 106.541.709 t e rendimento médio de 20,66 t/ha. No Brasil, segundo IBGE (2013), atualmente a área colhida da cultura é 486.991 ha com produção total de 6.962.792 t e rendimento médio de 14,3 t/ha.

Os objetivos específicos deste trabalho foram: (i) avaliar a precisão e acurácia da estimativa da percolação com TDR utilizando a lei de Darcy-Buckingham com funções de $K(\theta)$ determinadas por métodos de campo e laboratório, bem como pela variação de armazenagem de água no perfil monitorado por diferentes números de sondas de TDR; (ii) definir um número mínimo de pontos de monitoramento de umidade do solo para instalação de sondas de TDR que possibilite obtenção de um balanço de água do solo em condições de campo com precisão e acurácia comparada à obtida em lisímetros de drenagem; (iii) determinar a evapotranspiração, as zonas de extração de água da bananeira e indicar a correta localização de sensores de água no solo.

Para atingir tais objetivos, as hipóteses, metodologias, análises e exposição dos resultados obtidos foram divididas em quatro capítulos:

Capítulo 1: Percolação de água estimada com TDR em lisímetros de drenagem;

Capítulo 2: Análise da estimativa da percolação de água no solo por diferentes metodologias usando TDR;

Capítulo 3: Variabilidade espacial e temporal das depleções de água na região do solo explorada pelas raízes da bananeira irrigada;

Capítulo 4: Análise da estimativa da evapotranspiração da bananeira pelo balanço hídrico no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos Recursos hídricos no Brasil: informe 2012. Ed. Especial, Brasília: ANA, 215p, 2012.
- AKINRO, A.O.; OLUFAYO, A.A.; OGUNTUNDE, P.G. Crop Water Productivity of Plantain (Musa Sp) in a Humid Tropical Environment. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, v.5, n.1, p.19-25, 2012.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement. *Agricultural Water Management*, v.98, p. 899–920, 2011.
- ANDREU, L.; HOPMANS, J.W.; SCHWANKL, L.J.; Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree. *Agricultural Water Management*. v.35, p.123-146, 1997.
- BARAM, S.; KURTZMAN, D.; DAHAN, O. Water percolation through a clayey vadose zone. *Journal of Hydrology*, v.424-425, p.165-171, 2012.
- CAMPOS, J.H.B .; SILVA, V.P.R.; AZEVEDO, P. V.; BORGES, C. J.R.; SOARES, J.M.; MOURA, M. S.B.; SILVA, B.B. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2, p.150–156, 2008.
- CATALDO, A.; CANNAZZA, G.; BENEDETTO, E.; GIAQUINTO, N.; A New Method for Detecting Leaks in Underground Water Pipelines. *Sensors Journal*, vol. 12, n.6, 2012.
- COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; MIRANDA, J.H. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. *Eng. Agríc.* vol.30 n.4. 2010
- COELHO, E.F.; SANTOS, D. B.; AZEVEDO, C. A. V. Sensor placement for soil water monitoring in lemon irrigated by micro sprinkler. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. vol. 11, n.1. 2007.
- CHRISTOPHERSON, R. W. *Geosystems: an introduction to physical geography*. 4 ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 626 p. 2002.
- CRUZ, A. C. R. Evapotranspiração real de uma cultura de laranja em produção num Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 29, n. 5, p 659-668, 2005.

DING, Z.; WEN, Z.; WU, R.; LI, Z., ZHU, J.; LI, W.; JIAN, M. Surface energy balance measurement over a banana plantation in South China. *Theor Appl Climatol*. DOI 10.1007/s00704-013-0849-5.

FAO (Food and Agricultural Organization). Irrigation efficiencies. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/t7202e/t7202e08.htm>. Acesso em: 15 de janeiro de 2013.

FAO (Food and Agricultural Organization). Food and Agricultural commodities production. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: 11 de janeiro de 2013.

GHIRBERTO, P. J.; MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um latossolo vermelho-amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol.35, n.4, p.1177-1188, 2011.

GONG, D.; KANG, S.; ZHANG, L.; DU, T.; YAO, L. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements. *agricultural water management* 83 (2006) 119–129.

GREEN, S.R.; CLOTHIER, B.E. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and Soil*. v.173, p.317-328, 1995.

GREEN, S.R., CLOTHIER, B., 1999. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil*. v. 206, p.61–77.

HILLEL, D. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier, academic Press. 2003. 294p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Produção agrícola Municipal 2011. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=44. Acesso: 12 de janeiro de 2013.

JI, X.B., KANG, E.S., CHEN, R.S., ZHAO, W.Z., ZHANG, Z.H., JIN, B.W.A. Mathematical model for simulating water balances in cropped sandy soil with conventional flood irrigation applied. *Agricultural Water Management*. v.87, n-3, p337–346, 2007.

JIMÉNEZ-MARTÍNEZA, J.; SKAGGS, T.H.; VAN GENUCHTEN, M.Th.; CANDELA, L. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *J. Hydrol*. v.367, n.1-2, p.138-149, 2009.

MUBARAK, I.; ANGULO-JARMILLO, R.; MAILHOL, J.C.; RUELLE, P.; KHALEDIAN, M. & VAUCLIN, M. Spatial analysis of soil surface hydraulic

properties: Is infiltration method dependent?. *Agricultural Water Management*. v.97, p.1517-1526, 2010.

PALOMO, M.J; MORENO, F.; FERNANDEZ, J.E.; DIAZ-ESPEJO, A.; GIRON, I.F. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agricultural Water Management*, v.55, p.15-35, 2002.

PREVIATI, M.; CANONE, D.; BEVILACQUA, I.; BOETTO, G.; POGNANT, D.; FERRARIS, S. Evaluation of wood degradation for timber check dams using time domain reflectometry water content measurements. *Ecological Engineering*. v. 44 p.259-268, 2012.

RATKE, F. R.; SANTOS, S. C.; PEREIRA, H. S.; SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C. Desenvolvimento e produção de bananeiras Thap Maeo e Prata-Anã com diferentes níveis de adubação nitrogenada e potássica. *Revista Brasileira de Fruticultura*. vol.34, n.1, pp. 277-288, 2012.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C.; Solo, Planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. Ed. – Barueri, SP: manole, 500p, 2012.

SANT'ANA J. A. do V.; COELHO, E.F.; SILVA JUNIOR, J.J.; SANTANA JUNIOR, E. B.; VEINROMBER JUNIOR, L. A. A. Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*.v.36, n.4, p.1123-1130, 2012.

SCHELDE, K.; RINGGAARD, R.; HERBST, M.; THOMSEN, A.; FRIBORG, T.; SOGAARD, H. Comparing evapotranspiration rates estimated from atmospheric flux and TDR Soil Moisture Measurements. *Vadose Zone Journal*. v. 10, n. 1, p. 78-83, 2011.

SELLE, B.; MINASNY, B.; BETHUNE, M.; THAYALAKUMARAN, T.; SUBHASH, C. Applicability of Richards' equation models to predict deep percolation under surface irrigation. *Geoderma*, n.160, p.569–578, 2011.

SHIKLOMANOV, I. A. World fresh water resources. In: Gleick, P.H.; *Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources*. Oxford Univ. Press, New York, p.13-24, 1993.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. de and WORKMAN, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. vol.44, n.7, 2009.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. Sensor placement for irrigation scheduling in banana using micro-sprinkler system. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 1, p. 15-23, 2012.

SKAGGS, T.H.; SHOUSE, P.J.; POSS, J.A. Irrigating forage crops with saline waters: 2. Modeling root uptake and drainage. *Vadose Zone Journal*. v. 5, p.824–837, 2006.

TURNER, D. W.; FORTESCUE, J. A.; THOMAS, D. S.; Environmental physiology of the bananas (*Musa* spp.). *Brazilian Journal of Plant Physiology*. v. 19, n. 4, p.463-484, 2007.

UNDESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs). Global challenge, global opportunity: trends in sustainable development, Johannesburg Summit 2002, Johannesburg, South Africa, 21 p, 2002.

WILLIS, T. M.; SCOTT BLACK, A.; MEYER, S. W. Estimates of deep percolation beneath cotton in the Macquarie Valley. *Irrigation Science*. v.17, p.141-150,1997.

WU, J.; ZHANG, R.; GUI, S. Modeling soil water movement with water uptake by roots. *Plant and Soil*. v.215, p.7–17, 1999.

CAPÍTULO 1

PERCOLAÇÃO DE ÁGUA ESTIMADA COM USO DE REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO EM LISÍMETROS DE DRENAGEM¹

¹ Artigo submetido e aceito para publicação em 14/03/2013 na Revista Brasileira de Ciência do Solo.

Percolação de Água Estimada com uso de Reflectometria no Domínio do Tempo em Lisímetros de Drenagem

RESUMO - Devido à dificuldade em se estimar a percolação de água em solos não saturados, realizou-se este trabalho com o objetivo de examinar a estimativa da percolação de água utilizando reflectometria no domínio do tempo. Em dois lisímetros de drenagem com solos de texturas diferentes, instalaram-se sondas de TDR formando baterias de monitoramento de água compostos por diferentes números de sondas. Os solos foram saturados e cobertos com lona plástica para evitar a evaporação. Assim, procedeu-se um ensaio de drenagem interna utilizando-se de uma TDR 100 programada a realizar leituras de constante dielétrica a cada 15 minutos. Para testar a adequação dos valores de lâminas de percolação estimada pela TDR aos valores observados na coleta de drenos dos lisímetros, utilizou-se do teste da hipótese da nulidade conjunta com 5% de probabilidade. O incremento da quantidade de sondas no perfil de monitoramento de água aproximou os valores das lâminas de percolação estimada por TDR aos valores das lâminas observadas nos lisímetros. A definição do número de sondas necessárias para o monitoramento de água com fins de estimar percolação por TDR depende das propriedades físicas do solo. Para solos de textura Argilo-Arenoso três baterias com quatro sondas às profundidades 0,10, 0,30, 0,50 e 0,70 m e a 0,20, 0,40 e 0,6 m do centro de origem do perfil são suficientes para estimar a percolação equivalente à observada. Em solos de textura Areia-Franca, não há equivalência entre as lâminas de percolação estimadas e observadas mesmo para quatro baterias de quatro sondas cada nas profundidades 0,10, 0,30, 0,50 e 0,70 m.

PALAVRAS CHAVE: drenagem profunda; fluxo de água no solo; umidade do solo

Water Percolation Estimate using Time Domain Reflectometry in Drainage Lysimeters

ABSTRACT - Due to the difficulty of estimating water percolation in unsaturated soils, the purpose of this study was to estimate water percolation based on time-domain reflectometry (TDR). In two drainage lysimeters with different soil textures TDR probes were installed, forming a water monitoring system consisting of different numbers of probes. The soils were saturated and covered with plastic to prevent evaporation. Tests of internal drainage were carried out using a TDR 100 unit with constant dielectric readings (every 15 min). To test the consistency of TDR-estimated percolation levels in comparison with the observed leachate levels in the drainage lysimeters, the combined null hypothesis was tested at 5% probability. A higher number of probes in the water monitoring system resulted in an approximation of the percolation levels estimated from TDR-based moisture data to the levels measured by lysimeters. The definition of the number of probes required for water monitoring to estimate water percolation by TDR depends on the soil physical properties. For sandy clay soils, three batteries with four probes installed at depths of 0.20, 0.40, 0.60 and 0.80 m, at a distance of 0.20, 0.40 and 0.6 m from the center of lysimeters were sufficient to estimate percolation levels equivalent to the observed. In the sandy loam soils, the observed and predicted percolation levels were not equivalent even when using four batteries with four probes each, at depths of 0.20, 0.40, 0.60, and 0.80 m.

KEY WORDS: drainage; water flow in the soil; soil moisture

Introdução

O conhecimento preciso e acurado do fluxo de água abaixo da zona efetiva do sistema radicular em meio não saturado é imprescindível em se tratando de manejo de irrigação e avaliação da dinâmica de água e de íons no solo em condições irrigadas ou de sequeiro. A equação de Darcy-Buckingham possibilita quantificar o fluxo vertical de água em solos não saturados (Jiménez – Martínez et al., 2009; Ji et al., 2007; Skaggs et al., 2006); entretanto, algumas dificuldades de seu uso são evidenciadas por Reichardt & Timm (2012). O uso da condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ na forma exponencial tem sido evidenciado por propiciar margens a grandes erros para pequenas variações na umidade do solo (Mubarak et al., 2010; Ghiberto & Moraes, 2011).

Apesar das limitações, tem-se observado sucesso no cálculo do balanço hídrico do solo utilizando a relação entre condutividade hidráulica do solo não saturado e umidade do solo (Silva et al., 2009; Campos et al., 2008). Por outro lado, a determinação do fluxo de água no solo utilizando tal relação $K(\theta)$ foi inadequada em alguns trabalhos (Selle et al., 2011; Willis et al., 1997).

Estudos vêm utilizando a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para predizer processos de comportamento da água no solo com variadas finalidades (Previati et al., 2012; Cataldo et al., 2012; Schelde et al., 2011); especificamente para percolação algumas pesquisas podem ser encontradas (Baram et al., 2012; Selle et al., 2011; Wessolek et al., 2008). Neste caso, não se tem a necessidade da predeterminação de propriedades hidráulicas, como a curva de retenção de água e a relação da condutividade hidráulica não saturada com a umidade, $K(\theta)$, apenas a calibração do conjunto sonda-TDR em função da variabilidade dos solos. Apesar de teoricamente bem fundamentado (Silva et al., 2009) tem-se que o uso da TDR para avaliação da percolação em meio não saturado ainda apresenta limitações quanto a decisão do número necessário e localização das sondas de leituras em um perfil.

O presente trabalho examina uma metodologia para estimar a percolação com uso de reflectometria no domínio do tempo utilizando-se de diferentes números, posições de leitura e de planos de monitoramento da umidade do solo.

Material e Métodos

O experimento foi realizado na Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas - BA, com latitude 12°48'S, longitude 39°06'W e altitude de 225 m. As parcelas experimentais foram dois lisímetros de drenagem feitos com fibra de vidro, os quais apresentam capacidade de 5 m³, medindo 2 m de largura, 2,5 m de comprimento e 1 m de profundidade. Para induzir um sistema de drenagem livre, o último 0,2 m do perfil foi dividido em duas camadas de 0,1 m, sendo a inferior composta por um sistema de drenagem com tubos de PVC de 50 mm perfurados e brita zero e a superior com areia lavada. Na Figura 1 apresenta-se alguns procedimentos realizados na instalação da área experimental.



Figura 1. Vista da área experimental. Conjunto Lisimétrico (a), Construção do sistema de Drenagem com tubos de PVC perfurado (b), Montagem do sistema de Drenagem (c), camada de brita acomodada sob o sistema de tubos perfurados (d).

Na escavação do solo para inserção dos lisímetros, teve-se os cuidados de separar as camadas naturais do perfil, para em seguida secar o solo, passar em

peneiras com malhas de 5 mm e posteriormente completar o preenchimento dos lisímetros, utilizando-se também de outro solo adquirido de área externa. Os dois solos de texturas diferentes foram submetidos à análise de composição granulométrica, resultando nas classes texturais Argilo Arenosa (solo 1) e Areia Franca (solo 2). A caracterização físico-hídrica dos solos utilizados nos lisímetros é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Características Físico-Hídricas dos solos utilizados para preenchimento dos lisímetros.

Prof.	Retenção de água - θ cm ³ cm ⁻³ (Solo 1)						Ks m/s	ds (kg/dm ³)	Porosidade (%)	
	0,6 m	1,0 m	3,3 m	10 m	30 m	150 m			Macro	Micro
0,1 m	0,2937	0,229	0,203	0,181	0,167	0,160	5,04.10 ⁻⁶	1,39	15,74	27,99
0,3 m	0,318	0,258	0,240	0,218	0,204	0,192	2,53.10 ⁻⁶	1,45	12,41	30,73
0,5 m	0,306	0,261	0,234	0,218	0,190	0,171	2,61.10 ⁻⁶	1,47	11,34	28,16
0,7 m	0,345	0,287	0,262	0,255	0,224	0,213	2,71.10 ⁻⁶	1,52	7,58	31,04
Prof.	Retenção de água - θ cm ³ cm ⁻³ (Solo 2)						Ks m/s	ds (kg/dm ³)	Porosidade (%)	
	0,6 m	1,0 m	3,3 m	10 m	30 m	150 m			Macro	Micro
0,1 m	0,175	0,144	0,076	0,054	0,040	0,036	3,4.10 ⁻⁶	1,88	11,99	16,31
0,3 m	0,180	0,108	0,069	0,041	0,036	0,029	2,1.10 ⁻⁶	1,89	12,79	12,91
0,5 m	0,184	0,109	0,066	0,048	0,033	0,030	2,0.10 ⁻⁶	1,89	12,33	12,24
0,7 m	0,183	0,111	0,076	0,041	0,040	0,033	2,0.10 ⁻⁶	1,88	12,28	12,24

Lis. – lisímetro; Ks – Condutividade Hidráulica do solo saturado; Dens. – Densidade do Solo.

Sondas de TDR foram construídas com as seguintes características: três hastes de aço inoxidável com comprimento efetivo de 0,1 m fora da resina e espaçadas entre si por 0,017 m; cabos coaxiais de 50 ohms; comprimento da camada de resina de poliéster no início das hastes de 0,05 m. Uma vez construídas, foi feita a calibração quanto às leituras de umidade dos sensores mediante a coleta de amostras de solo com estrutura indeformada nos lisímetros (Figura 2). Na parte inferior do tubo utilizado para retirada das amostras foram colocadas telas finas com a função de apenas permitir a passagem de água para o exterior do tubo. Imediatamente após esta etapa foram inseridas as guias de onda no solo até cobrir completamente as hastes dos sensores. Depois os tubos com solo foram imersos por 24 horas em um recipiente com água de forma que a altura da lâmina alcançasse dois terços da altura do solo para saturação do mesmo.

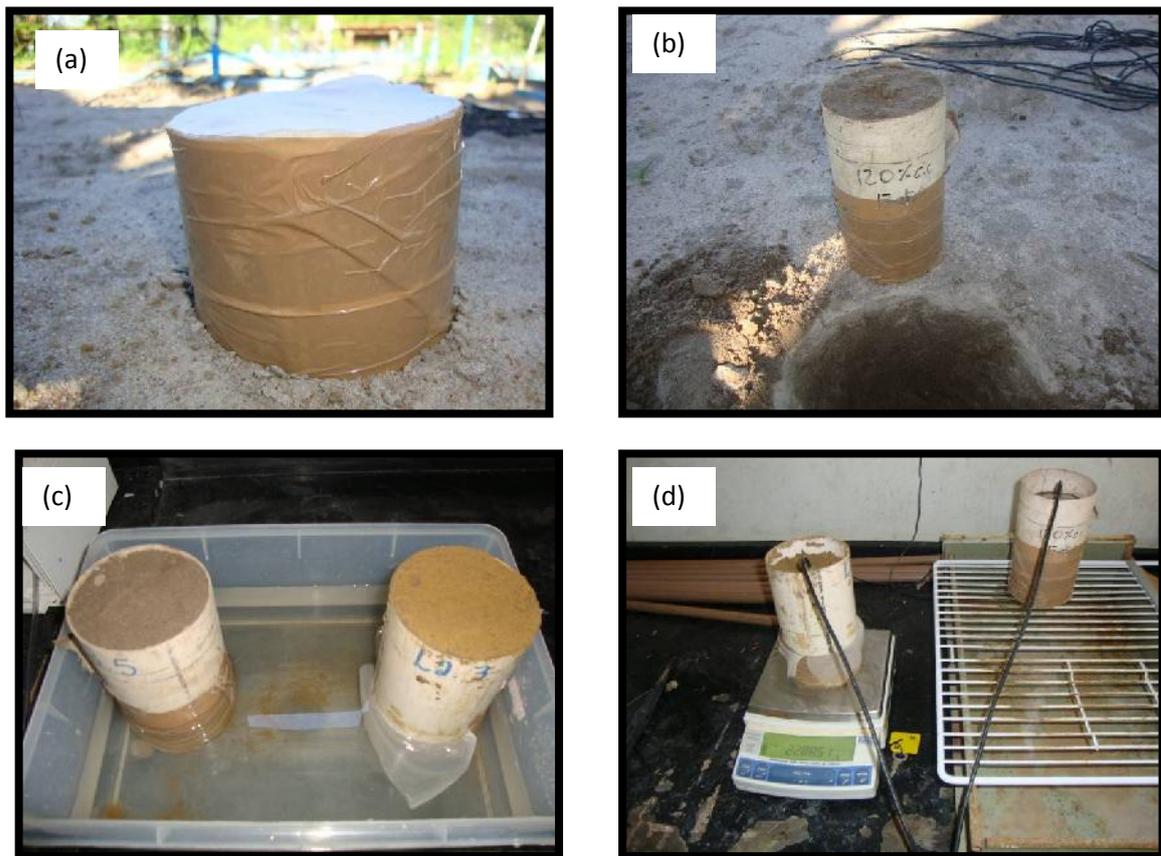


Figura 2. Calibração das sondas de TDR construídas. Retirada de amostras com estruturas indeformadas no campo (a) e (b), saturação do solo (c) e determinação do peso e Constante dielétrica (d).

Realizou-se uma série de leituras do peso do conjunto tubo – sonda – solo – tela feita com balança analítica e estimou-se a umidade pela TDR. Em princípio, as leituras foram feitas de cinco em cinco minutos, pois a perda de água por percolação neste período é muito elevada. À medida que ocorreu a redução na percolação, as leituras passaram a ser feitas em maiores intervalos de tempo. A umidade gravimétrica referente a cada pesagem do conjunto foi determinada pela eq.1:

$$= \left(\frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} \right) \cdot ds \quad (1)$$

em que:

= umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$);

P_1 = massa do conjunto tubo – solo úmido (i) – sonda – tela (kg);

P_2 = massa do conjunto tubo – solo seco – sonda – tela (kg);

P_3 = massa do tubo, sonda e tela (kg); e

d_s = densidade do solo (kg dm^{-3}).

As equações 2 e 3 são resultantes da relação dos valores de constante dielétrica (K_a) e umidade volumétrica (Figura 3), as quais permitiram o desenvolvimento deste estudo em intervalos de umidade volumétrica nas faixas de $0,0408 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,3749 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de $0,0157 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ a $0,3056 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para os solos de textura Argilo-Arenoso e Areia Franca, respectivamente.

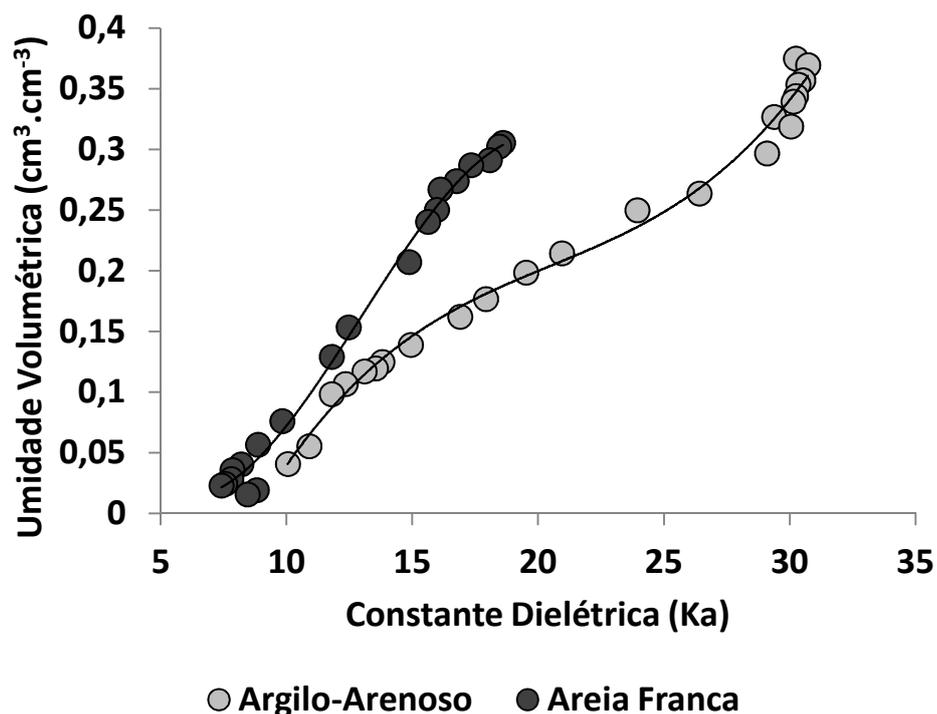


Figura 3. Relações entre umidade volumétrica (θ) e constante dielétrica (K_a) para as duas classes texturais de solo utilizados no experimento.

$$\theta_{\text{Areia Franca}} = -0,00023K_a^3 + 0,00883K_a^2 - 0,08224K_a + 0,23844 \quad (2)$$

$$\theta_{\text{Argilo Arenoso}} = 0,000065K_a^3 - 0,003979K_a^2 + 0,090141K_a - 0,528860 \quad (3)$$

A umidade do solo na parcela experimental foi monitorada em um perfil, no qual foi instalada uma malha de pontos (r, z) de $0,20 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$ sendo r e z as distâncias horizontal e vertical da origem situada na superfície do solo no centro do lisímetro. Nesses pontos foram inseridas horizontalmente sondas de TDR (Figura 4). O monitoramento da umidade foi feito em quatro seções (baterias) do perfil, nas quais se utilizou diferentes números de sondas de TDR: P1 -

monitoramento com quatro sondas; P2 - monitoramento com oito sondas; P3 - monitoramento com 12 sondas; P4 - monitoramento com 16 sondas.

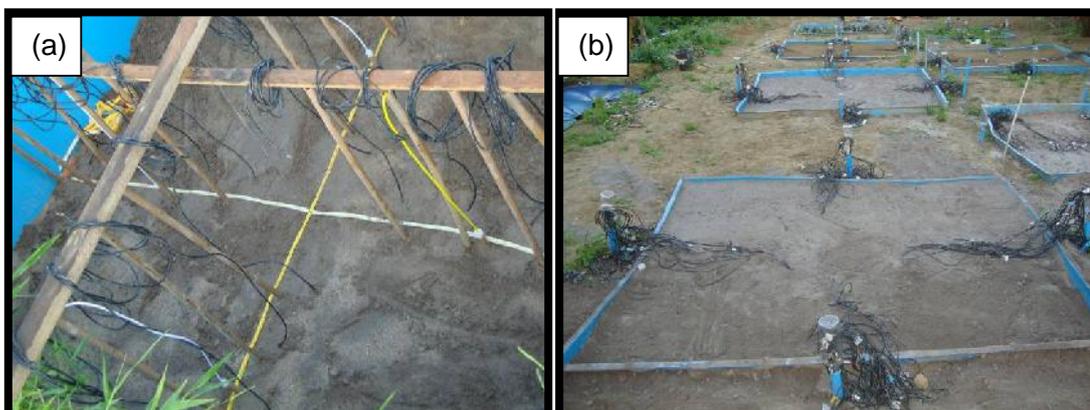


Figura 4. Disposição e instalação das Sondas de TDR nos lisímetros. instalação (a) e sondas instaladas (b).

As parcelas foram saturadas e cobertas com lona plástica para evitar a evaporação (Figura 6). Assim, procedeu-se um ensaio de drenagem interna com um sistema de aquisição automática de dados com uma TDR 100, Campbell Scientific, conectada a multiplexadores e programada a realizar leituras de K_a em intervalos de 15 minutos que foram arquivadas em um dispositivo de armazenamento de dados (“*data logger*”) modelo CR1000 durante 670 horas (Figura 7).

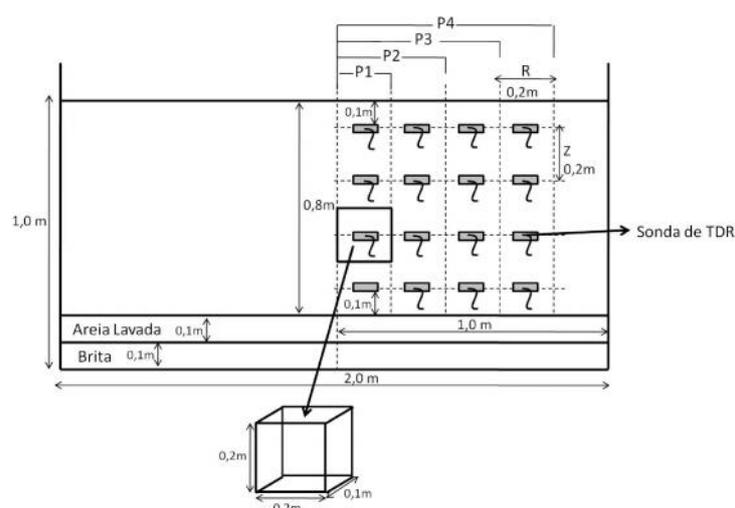


Figura 5. Detalhe da disposição das sondas no perfil da parcela formando as diferentes baterias de monitoramento de água com 4 sondas (P1); 8 sondas (P2); 12 sondas (P3) e 16 sondas (P4).



Figura 6. Ensaio de drenagem interna. Saturação (a) e cobertura com lona plástica para evitar evaporação (b).

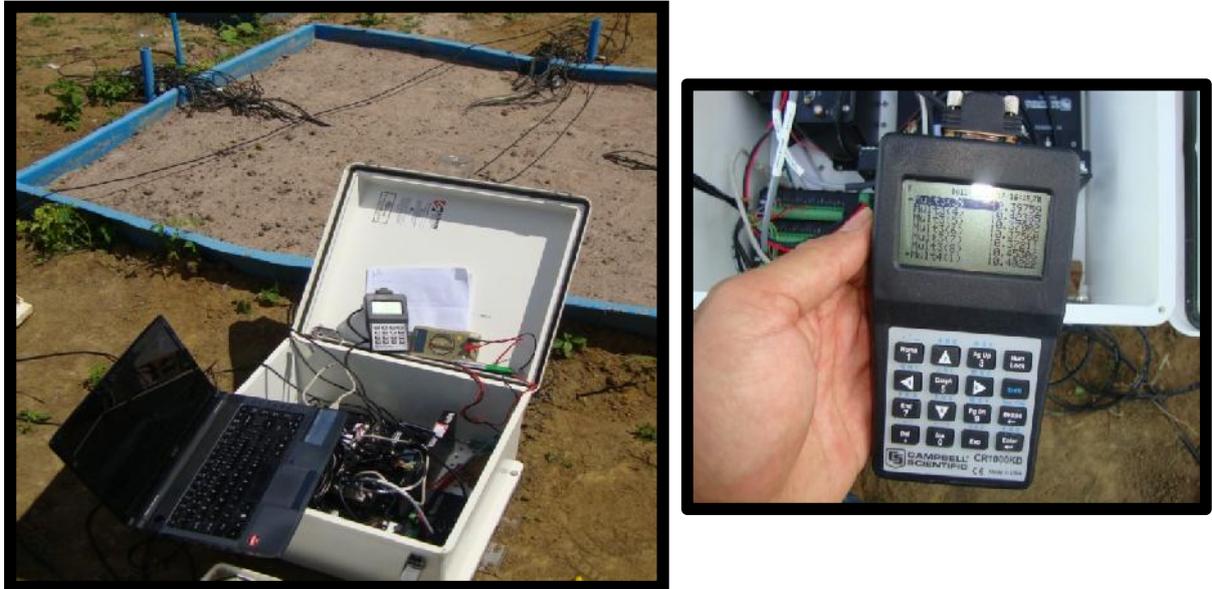


Figura 7. Sistema de aquisição de dados de umidade do solo.

Os valores de K_a foram transformados em umidade volumétrica com os quais, foi possível calcular, para cada tempo de interesse (t) o armazenamento de água no solo:

$$h(r)_L = \int_0^L \theta(z) dz \quad (4)$$

em que: $\theta(z)$ é a função representativa do perfil de umidade e dz a diferencial da variável independente z . L é a profundidade total do plano ($L=0,8m$). Para resolução da integral numérica utilizou-se da regra de Simpson.

As lâminas drenadas nos lisímetros foram medidas nas saídas dos sistema de drenagem dos mesmos (Figura 8) em intervalos de tempo (Δt) variando de 1 h até 24 h, aumentando-se o intervalo de tempo de coleta na medida em que se percebia a diminuição da redistribuição de água no solo. Para estes mesmos intervalos de tempo, calculou-se a variação de armazenagem de água com os dados obtidos pela TDR.



Figura 8. Coleta do volume drenado.

Portanto, como a saída de água da parcela se deu apenas por drenagem, foi possível, com base na redução dos valores de armazenagem entre os tempos de coleta de água, estimar as lâminas de percolação (LP) pela equações abaixo:

$$LP = \frac{\sum_{i=1}^4 \left(\int_0^L \theta_t dZ - \int_0^L \theta_{t+1} dZ \right)}{i} \quad (5)$$

em que: LP é a lâmina percolada estimada por TDR (mm) no intervalo de tempo Δt ; θ_t é a umidade no início do intervalo de tempo Δt (mm cm^{-1}); θ_{t+1} é a umidade no final do intervalo de tempo Δt ; Z é a profundidade (cm); L é a profundidade total do plano considerado (cm); i é o número de planos utilizados para estimativa.

Para verificar a normalidade da distribuição dos valores de umidade do perfil utilizou-se da metodologia recomendada por Jones (1969) com 5% de probabilidade. A comparação dos valores das lâminas de percolação estimadas pela TDR aos valores observados na saída dos drenos dos lisímetros de drenagem foi feita conforme proposto por Tedeshi (2006), ajustando-se um modelo de regressão linear simples com os valores observados y sobre os valores estimados x, por equações do tipo: $y = ax + b + v$ sujeito à hipótese de nulidade conjunta dos parâmetros estimados a e b: $H_0: a=1$ e $b=0$, comprovando-se ou rejeitando-se tais hipóteses por meio do teste F sugerido por (Mayer et al., 1994). Se qualquer uma das duas hipóteses de nulidade for rejeitada ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), os valores de percolação estimados com TDR não

são equivalentes aos valores observados na saída dos drenos dos lisímetros. Para verificar a homoscedasticidade dos resíduos utilizou-se do teste diagnóstico recomendado por Draper & Smith (1981). Considerou-se a raiz quadrada do erro médio (RMSE) como avaliação complementar das estimativas das lâminas de percolação (Willmott, 1981):

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad (6)$$

Em que: P_i são os valores das lâminas de percolação estimadas (mm); O_i os valores das lâminas de percolação observadas e N o número de pares de valores.

Resultados e Discussão

Homogeneização da parcela experimental

Os valores dos coeficientes de assimetria e curtose revelaram que a umidade do perfil de monitoramento seguiu uma distribuição normal nos quatro tempos de avaliação seguindo os critérios estabelecidos por Jones (1969), com um grau de confiança de 95% (Tabela 2). Com base nos valores dos coeficientes de variação e nos valores das médias e medianas, pode-se considerar que o sistema de saturação inicial do solo proporcionou uma adequada distribuição da água nos lisímetros garantindo as condições de uniformidade desejadas para o experimento.

Tabela 2. Estatísticas descritivas para umidade no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) nos dezesseis pontos de monitoramento e em quatro tempos durante a redistribuição da água no solo.

Tempo (h)	Média	D.P	C.V* (%)	Coef. De Assimetria	Coef. De Curtose	A.T*	Mediana
Argilo - Arenoso							
24h	0,3416	0,0505	14,79	0,6172	1,9597	0,1530	0,3212
120h	0,3240	0,0559	17,27	0,3806	1,7847	0,1710	0,3212
360h	0,3068	0,0529	17,26	0,3438	1,7737	0,1587	0,2913
620h	0,3051	0,0531	17,42	0,1972	1,7428	0,1620	0,3000

Areia-Franca							
24h	0,2331	0,0127	5,48	-0,1795	3,70	0,051	0,2272
120h	0,2216	0,0134	6,07	0,1970	2,83	0,047	0,2219
360h	0,2117	0,0134	6,36	-0,1223	2,86	0,047	0,2099
620h	0,2112	0,0130	6,20	-0,1926	3,12	0,047	0,2096

*C.V-Coefficiente de Variação; A.T-Amplitude Total.

Na Figura 9 pode-se visualizar o comportamento da umidade média ao longo do tempo nas quatro profundidades para os dois solos avaliados. Verifica-se que, para as profundidades $z = 0,2 \text{ m}$; $0,4 \text{ m}$; $0,6 \text{ m}$ e $0,8 \text{ m}$ os valores de umidade, obtidos pela média nas quatro distâncias horizontais (r) de monitoramento atingem o máximo, respectivamente em $0,367 \pm 0,010 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,336 \pm 0,009 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,346 \pm 0,019 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,354 \pm 0,012 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no solo argilo arenoso e em $0,255 \pm 0,017 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,280 \pm 0,016 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,278 \pm 0,039 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,304 \pm 0,004 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no solo de textura areia franca. Estes valores se encontram abaixo do limite máximo de umidade obtido no ajuste dos valores de K_a e quando da calibração das sondas em laboratório (Figura 1). As taxas de redução da umidade com o tempo (inclinação da curvas) se comportaram de maneira semelhante para todas as profundidades avaliadas (Figura 3), o que para Libardi & Melo Filho (2006) é um indicativo de que o processo de redistribuição e secagem se deu de forma aproximadamente uniforme em todo período de avaliação.

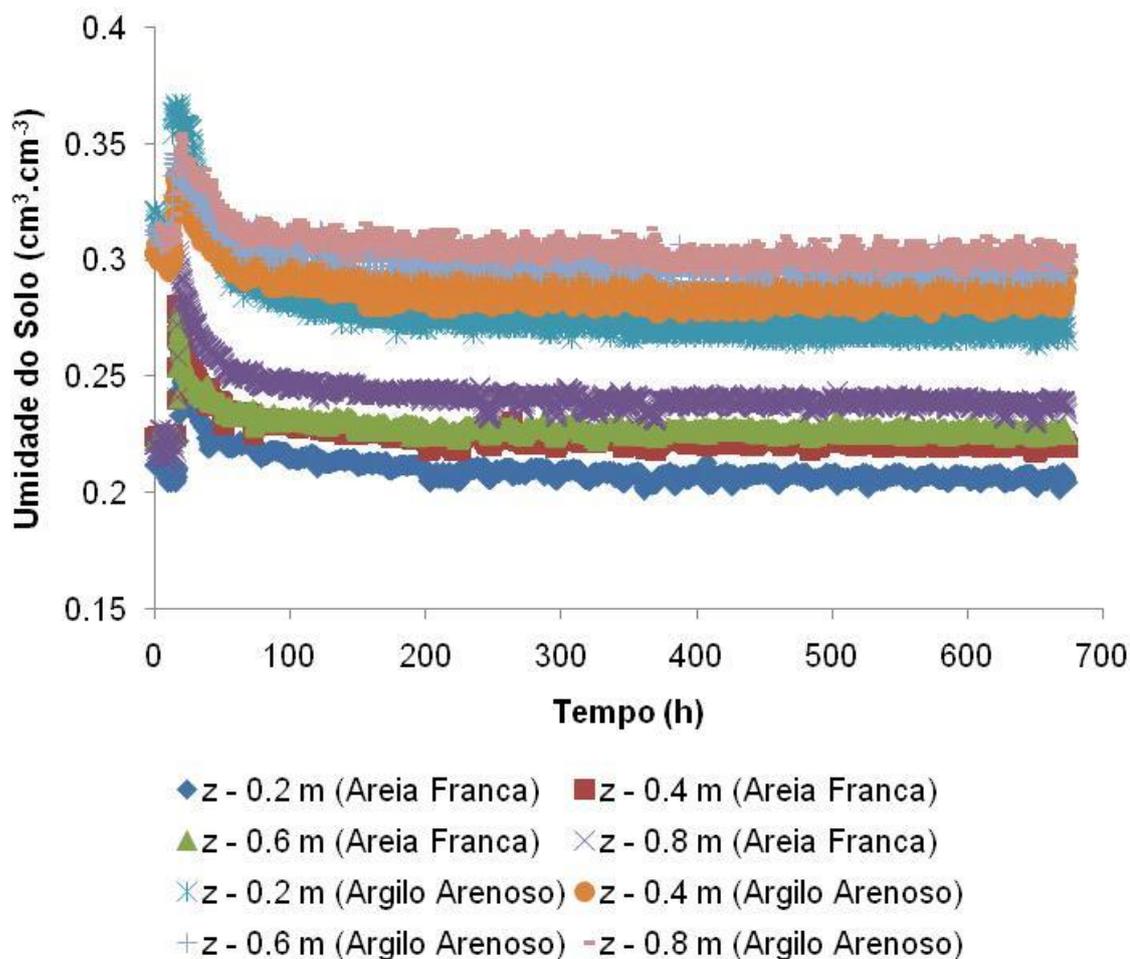


Figura 9. Distribuição da umidade na parcela experimental ao longo do tempo de experimentação.

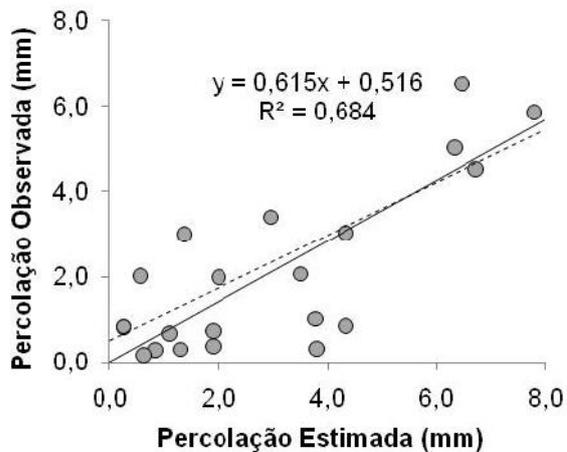
Diagnóstico da estimativa das lâminas de percolação

Na Figura 10 são apresentadas para os diferentes cenários, as regressões lineares entre os dados de percolação estimados e observados. Com base nos coeficientes de determinação, pode-se verificar que, de um modo geral na medida em que se elevou o número de sondas de monitoramento, aumentou-se a qualidade das regressões, o que é reforçado pela diminuição dos valores do RMSE (Tabela 3). Não obstante, observa-se com base nos valores dos coeficientes de regressão que os valores unitários (1 mm) da percolação observada, estão correspondendo em média a valores estimados na ordem de 0,786 mm; 0,838 mm; 1,06 mm e 0,88 mm quando da utilização de 4 sondas; 8 sondas; 12 sondas e 16 sondas, respectivamente, na avaliação feita no solo de textura argilo arenosa. Para o solo de textura areia franca, os coeficientes de

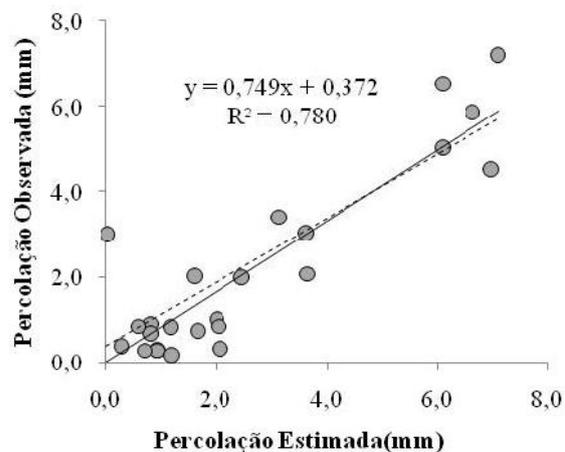
regressão indicam que em média a variação unitária dos valores da variável observada correspondem a valores de 2,49 mm; 1,50 mm; 1,29 mm e 1,06 mm da variável estimada. Apesar da aparente qualidade do ajustamento dos valores das lâminas percoladas observadas com os valores estimados com uso da TDR (R^2 variando de 0,87 a 0,96), as hipóteses de nulidade conjuntas não foram verdadeiras, isto é, as estimativas da percolação diferiram dos valores observados na drenagem do lisímetro com uso de até 16 sondas no solo areia franca ($P < 0,05$). Para o solo de textura Argilo-Arenoso houve melhor ajustamento dos valores estimados e observados da percolação utilizando três a quatro baterias de sonda, com quatro profundidades (12 e 16 sondas no monitoramento) a hipótese de nulidade conjunta foi verdadeira ($P > 0,05$), isto é, as lâminas de percolação estimadas e observadas não diferiram entre si (Tabela 2). Mesmo sendo estes resultados obtidos a partir de uma condição experimental em que se assume um fluxo unidimensional (Reichardt & Timm, 2012; Libardi, 2005) o acompanhamento preciso do processo de drenagem no perfil necessita de mais de duas baterias com sondas monitorando a umidade. A vantagem de se maximizar o número de pontos de monitoramento é que assim como realizaram Wessolek et al. (2008), quantificando a percolação em área plantada com *Pinus sylvestris* fez uso de 95 sondas de TDR em um perfil de 1m de profundidade e 2,9m de largura, pode-se identificar a presença de fluxos preferenciais no solo. Uma técnica bastante utilizada para fins de determinação da percolação é o HYDROS, porém Selle et al. (2011) avaliando a precisão das estimativas de percolação estimadas com o HYDROS 1-D em lisímetros de drenagem não obtiveram sucesso, provavelmente, segundo os autores pela não possibilidade de identificação dos fluxos preferenciais com o modelo. Este mesmo problema é também mencionado por Séré et al. (2012).

Argilo - arenoso

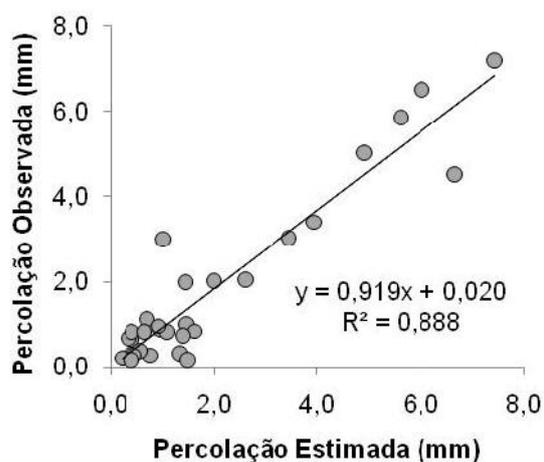
P1



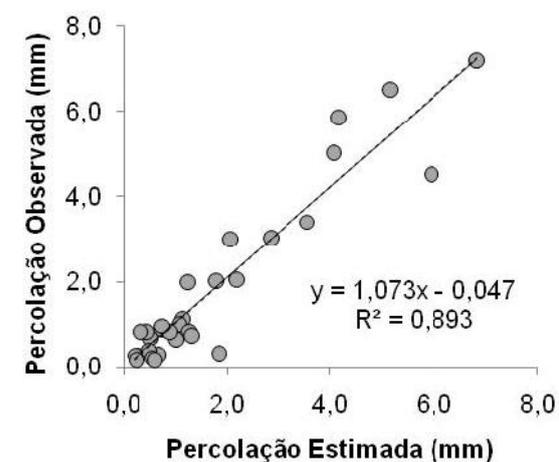
P2



P3

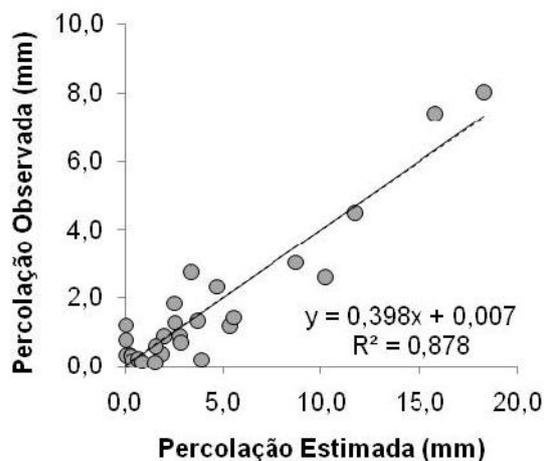


P4

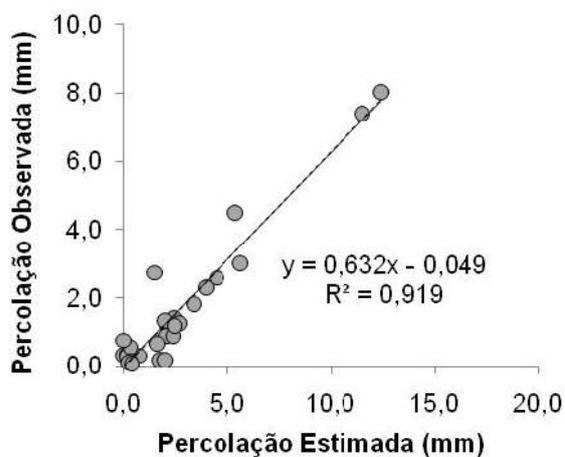


Areia-Franca

P1



P2



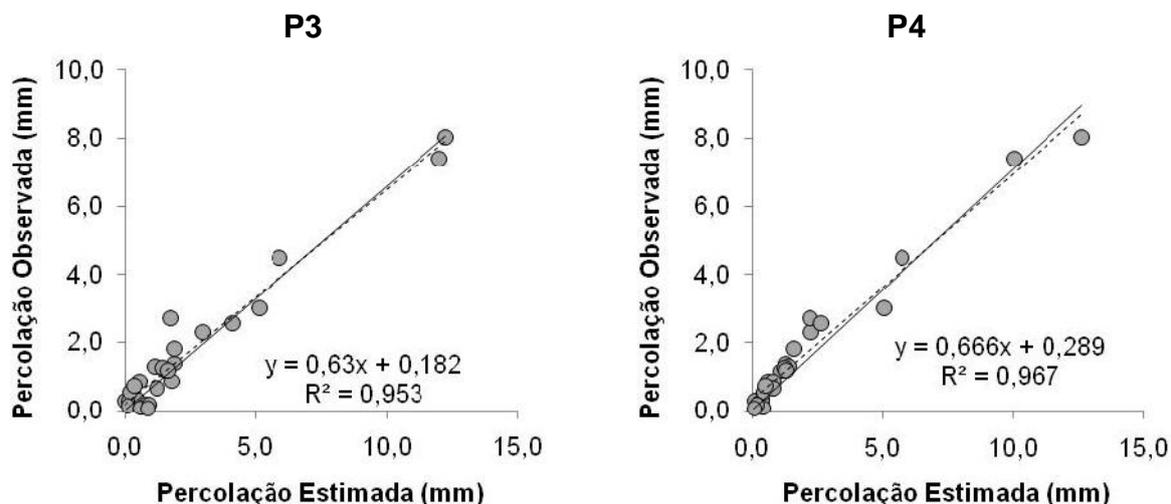


Figura 10. Preditos vs. observados valores de lâminas de percolação.

Tabela 3. Estatística para regressão entre os valores das lâminas de percolação observadas em lisimetria e preditas pela TDR.

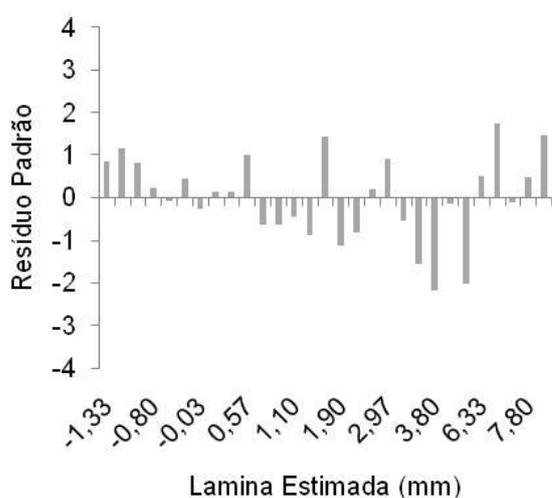
Ítem	Argilo-Arenoso			
	P1	P2	P3	P4
Intercepto	0,516	0,372	0,020	-0,047
Inclinação	0,615	0,749	0,919	1,073
Valor P ($H_0: a = 0$ e $b = 1$)	<0,01	<0,01	0,2447	0,469
RMSE	1,566	1,115	0,703	0,670
	Areia Franca			
Intercepto	0,007	-0,049	0,182	0,289
Inclinação	0,3989	0,632	0,629	0,666
Valor P ($H_0: a = 0$ e $b = 1$)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
RMSE	3,758	1,601	1,383	1,108

O diagnóstico dos resíduos padrão das regressões obtidas em função dos valores das lâminas de percolação estimadas por TDR e observadas em lisímetros foi feito a partir da distribuição dos seus valores em torno de zero (Figura 11). O efeito do aumento dos valores das lâminas de percolação não influenciou a estimativa das equações 4 e 5. A variância do resíduo se manteve constante com este aumento, ou seja, não houve qualquer tendência forte nos pontos, podendo-se considerar que os mesmos encontram-se aleatoriamente

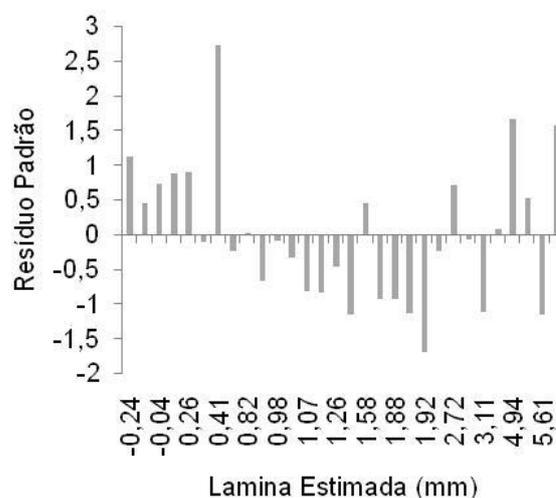
distribuídos em torno do valor zero. Desta forma, de acordo com Draper & Smith (1966) pode-se considerar que a variância dos resíduos das lâminas de percolação estimada pela metodologia apresentada é homoscedástica. Os intervalos de confiança destes resíduos revelam a presença de um *outliers* na condição P2, dois *outlier* na condição P3, e um *outlier* na condição P4 do solo Argilo-arenoso, sendo que para todos os casos, 95% ou mais dos valores dos resíduos encontram-se entre os limites (-2;2).

Argilo - arenoso

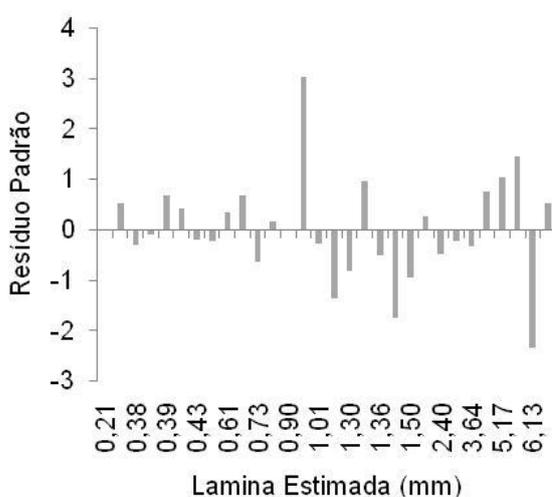
P1



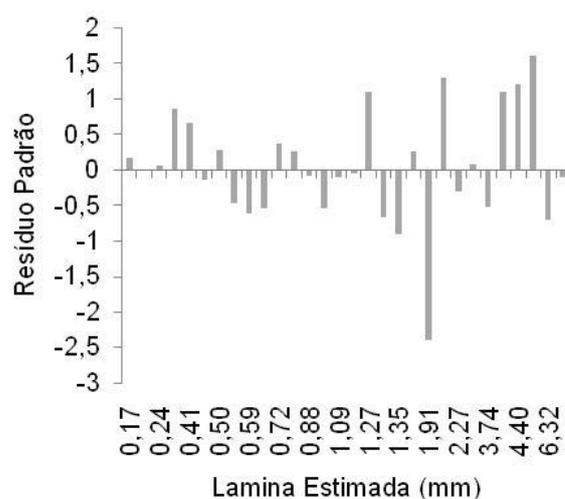
P2



P3



P4



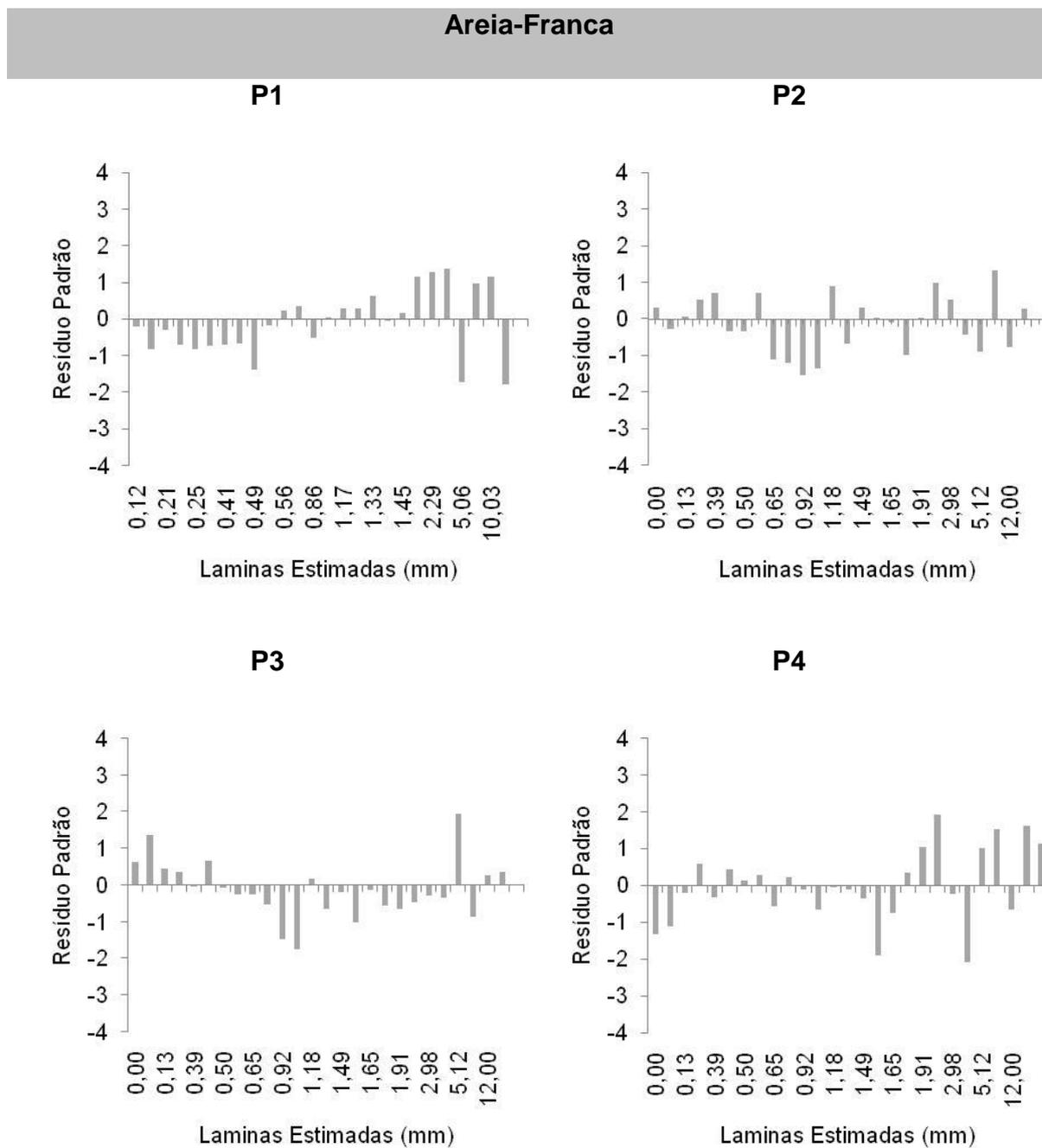


Figura 11. Resíduo padrão das regressões dos valores das lâminas estimadas por TDR e observadas em lisímetros.

Conclusões

O aumento da quantidade de sondas no perfil de monitoramento de água aproxima os valores das lâminas de percolação estimada com uso de dados de

umidade obtidos com TDR aos valores das lâminas observadas nos lisímetros com solos de texturas diferentes.

Para solos de textura Argilo-Arenosa três baterias com quatro sondas às profundidades 0,20, 0,40, 0,60 e 0,80 m e a 0,20, 0,40 e 0,6 m do ponto de origem do perfil são suficientes para estimar a percolação equivalente à observada.

Em solos de textura Areia Franca, não há equivalência entre as lâminas de percolação estimadas e observadas mesmo para quatro baterias de quatro sondas cada nas profundidades 0,20, 0,40, 0,60 e 0,80 m.

Referências Bibliográficas

BARAM, S.; KURTZMAN, D.; DAHAN, O. Water percolation through a clayey vadose zone. *Journal of Hydrology*. v. 424-425, p.165-171, 2012.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L. & GHIBERTO, P.J. Water flux density, actual evapotranspiration and water storage in two sugar-cane cropped soils. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:295-303, 2009.

CAMPOS, J.H.B .; SILVA, V.P.R.;AZEVEDO, P. V.; BORGES, C. J.R.; SOARES, J.M.; MOURA, M. S.B.; SILVA, B.B. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.12, n.2, p.150–156, 2008.

CATALDO, A.; CANNAZZA, G.; BENEDETTO, E.; GIAQUINTO, N.; A New Method for Detecting Leaks in Underground Water Pipelines. *Sensors Journal*, vol. 12, n.6, 2012.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. New York: J. Wiley, 709 p, 1981.

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

GHIBERTO, P. J.; MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um latossolo vermelho-amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. vol.35, n.4, pp. 1177-1188. 2011.

JARVIS, N.J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58, 523–546, 2007.

JI, X.B., KANG, E.S., CHEN, R.S., ZHAO, W.Z., ZHANG, Z.H., JIN, B.W.A. A mathematical model for simulating water balances in cropped sandy soil with conventional flood irrigation applied. *Agricultural Water Management*. v. 87, n.3, p 337–346, 2007.

JIMÉNEZ-MARTÍNEZA, J.; SKAGGS, T.H.; VAN GENUCHTEN, M.Th.; CANDELA, L. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*. vol. 367, n .1–2, p.138–149, 2009.

JONES, T. A. Skewness and kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. *Journal Sedimentary Petrology*, Northeast Georgia, v.39, p.1622-1627, 1969.

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

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: EDUSP, 335p, 2005.

MAYER, D.G.; STUART, M.A.; SWAIN, A.J. Regression of real-world data on model output: an appropriate overall test of validity. *Agricultural System*, v.45, n.2, p.93-104, 1994.

MUBARAK, I.; ANGULO-JARMILLO, R.; MAILHOL, J.C.; RUELLE, P.; KHALEDIAN, M. & VAUCLIN, M. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent? *Agricultural Water Management*, vol.97, n. 10, p1517-1526, 2010.

POLAK, A.; WALLACH, R. Measuring soil moisture dynamics in an irrigated orchard by time domain reflectometry method. *Acta Hort. (ISHS)* 562:39-46, 2001.

PREVIATI, M.; CANONE, D.; BEVILACQUA, I.; BOETTO, G.; POGNANT, D.; FERRARIS, S. Evaluation of wood degradation for timber check dams using time domain reflectometry water content measurements. *Ecological Engineering*. v. 44, p. 259-268, 2012.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo, Planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. ed. – Barueri, SP: manole, 500p, 2012.

SCHELDE, K.; RINGGAARD, R.; HERBST, M.; THOMSEN, A.; FRIBORG, T.; SOGAARD, H. Comparing evapotranspiration rates estimated from atmospheric flux and TDR Soil Moisture Measurements. *Vadose Zone Journal*. v. 10, n. 1, p. 78-83, 2011.

SELLE, B.; MINASNY, B.; BETHUNE, M.; THAYALAKUMARAN, T.; SUBHASH, C. Applicability of Richards' equation models to predict deep percolation under surface irrigation. *Geoderma*, vol. 160, n. 3-4, p.569–578, 2011.

SERÉ, G.; OUVRARD, S.; MAGNET, V.; PEY, B.; MOREL, J. L.; SCHWARTZ, C. Predictability of the Evolution of the Soil Structure using Water Flow Modeling for a Constructed Technosol. *Vadose Zone Journal*, v. 11, n.1, 2012.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. de and WORKMAN, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. vol.44, n.7. p 730 - 737, 2009.

SILVA, M.M.; LIBARD, P.L. & FERNANDES, F.C.S. Nitrogen doses and water balance components at phenological stages of corn. *Sci. Agric.*, 66:515-521, 2009.

SKAGGS, T.H., SHOUSE, P.J., POSS, J.A. Irrigating forage crops with saline waters: 2. Modeling root uptake and drainage. *Vadose Zone Journal*. Vol.5, p.824–837, 2006.

SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V. Spatial and temporal characterization of water and solute distribution patterns. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)* [online]. 2010, vol.67, n.1], pp. 09-15.

TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*. v. 89, n.2, 2006.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, Washington, v. 16, n. 3, p. 574-582. 1980.

WESSOLEK, G., SCHWARZEL, K., GREIFFENHAGEN, A. & STOFFREGEN, H. Percolation characteristics of a water-repellent sandy forest soil. *European Journal of Soil Science*. v.59, p.14–23, 2008.

WILLIS, T. M.; SCOTT BLACK, A.; MEYER, S. W.; Estimates of deep percolation beneath cotton in the Macquarie Valley. *Irrigation Science*.v.17, n.4, p.141-150,1997.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, p.184-194, 1981.

CAPÍTULO 2

ESTIMAÇÃO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO POR DIFERENTES METODOLOGIAS USANDO TDR²

² Artigo submetido para publicação na Revista Brasileira de Ciência do Solo.

Estimação da Percolação de Água no Solo por Diferentes Metodologias usando TDR

RESUMO - O conhecimento acurado da percolação de água no solo é crucial para resolver problemas de irrigação e drenagem, recarga e poluição de aquíferos subterrâneos. O objetivo deste trabalho foi analisar a estimativa da percolação com reflectometria no domínio do tempo utilizando a lei de Darcy com funções $K(\theta)$ determinadas por métodos de campo e laboratório, bem como através da variação de armazenagem de água no perfil com dezesseis pontos de medidas de umidade em diferentes intervalos de tempo. Um solo foi saturado e coberto com lona plástica para evitar a evaporação, procedendo-se um ensaio de drenagem interna em um lisímetro de drenagem. Para testar a adequação dos valores de percolação estimados aos valores observados nos lisímetros, utilizou-se do teste da hipótese de nulidade conjunta ao nível de 5% de probabilidade. Obteve-se semelhança entre os valores observados e os estimados pela variação de armazenagem de água do perfil e pela lei de Darcy com a função $K(\theta)$ determinada pelo método de Hillel et al. (1972) para estimativas em intervalos de tempo maiores que 1 hora. Ao se utilizar as funções $K(\theta)$ determinadas pelos métodos de Libardi et al. (1980), Sisson et al. (1980) e van Genuchten (1980) os valores estimados foram menores que os observados.

PALAVRAS CHAVE: drenagem interna, condutividade hidráulica não saturada, perfil instantâneo, reflectometria no domínio do tempo

Estimation of Soil Water Percolation by different methods using TDR

ABSTRACT - Accurate knowledge of deep percolation is crucial to solve problems of irrigation and drainage, aquifer recharge and groundwater contamination. The aim of this work was to analyze the estimation of soil water percolation with TDR using Darcy's law with determination of $K(\theta)$ functions by direct field methods and indirect laboratory methods, as well as by monitoring water storage variation in soil profile monitored by sixteen points of moisture measurements at different time intervals. A soil was saturated and covered with plastic sheet to avoid evaporation, proceeding thus, an assay of internal drainage in a drainage lysimeters. A null hypothesis test at 5% of probability was used to test the suitability of percolated water depth estimated by TDR to the observed values in the drains of drainage lysimeters. The estimated and observed values for time intervals greater than 1 hour are similar when was used monitoring of water storage variation and Darcy's law with hydraulic conductivity function determined by Hillel et al. (1972) method. The use of Darcy's law with $K(\theta)$ function determined by Libardi et al. (1980), Sisson et al. (1980) and van Genuchten (1980) methods provides smaller values than those observed in drainage lysimeters.

KEY WORDS: Internal drainage, unsaturated soil hydraulic conductivity, instantaneous profile, time domain reflectometer

Introdução

O conhecimento dos padrões de movimento de água no interior do solo é essencial para a solução de problemas envolvendo irrigação, drenagem, conservação de água, recarga e poluição de aquíferos subterrâneos, bem como infiltração e controle de escoamento superficial (Hillel et al., 1972). Sob condições não saturadas, a equação de Darcy-Buckingham tem sido frequentemente utilizada para estimar o fluxo de água no solo (Ghiberto et al., 2011; Jiménez-Martínez et al., 2009; Silva et al., 2007):

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (1)$$

em que q é a densidade de fluxo da solução (m s^{-1}); $K(\theta)$ é a função condutividade hidráulica não saturada (m.s^{-1}) e $\partial H / \partial z$ é o gradiente de potencial hidráulico (m.m^{-1}).

A função $K(\theta)$ pode ser determinada em campo ou laboratório. A metodologia proposta por Hillel et al., (1972) permite o cálculo da função $K(\theta)$ no campo a partir da variação temporal da umidade, em um processo de drenagem interna onde não existe fluxo na superfície do solo. Baseados nesta metodologia, porém admitindo no processo de drenagem interna o gradiente unitário, Libardi et al. (1980) e Sisson et al. (1980) propuseram, de formas distintas, metodologias para determinação de $K(\theta)$. Os métodos indiretos possibilitam o cálculo teórico da função $K(\theta)$ a partir de dados de retenção de água no solo obtidos em laboratório (Weynants et al., 2009; van Genuchten, 1980).

Ambos os métodos, diretos e indiretos, requerem tempo, apresentam custo elevado, são propensos a erros e apresentam resultados de escala local (Arya & Heitman, 2010; Mermoud & Xu, 2006), o que faz da obtenção do conhecimento acurado da percolação de água em solo não saturado, uma tarefa ainda difícil (Selle, et al., 2011; Mavimbela & van Rensburg, 2012; Dikinya, 2005). Estudos revelam que a forma exponencial da função $K(\theta)$ propicia margens a grandes erros para pequenas variações na umidade do solo (Mubarak et al., 2010; Ghiberto & Moraes, 2011; Reichardt & Timm, 2012) e que a condutividade hidráulica estimada por diferentes métodos são altamente variáveis, resultando

em incertezas no cálculo do fluxo de água no interior do solo (Adhanom et al, 2012; Dye et al., 2011).

Recentemente, pesquisas utilizam a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para estimativa do fluxo de água em solos não saturados (Baram et al., 2012; Séré et al., 2012; Selle et al., 2011; Silva et al., 2009; Wessoleka, 2008). Neste caso, conhecendo-se os procedimentos necessários ao uso da técnica TDR, pode-se proceder ao cálculo das laminas de percolação, sem a necessidade da predeterminação de propriedades hidráulicas, como a curva de retenção, a função condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ e a condutividade hidráulica saturada (K_s), tornando necessária apenas a calibração do conjunto sonda-TDR para leituras de umidade a partir da constante dielétrica (Sant'ana et al., 2012). Desta forma, monitorando a umidade em um perfil de solo com dimensões horizontal (R) e vertical (L), no qual sondas de TDR são distribuídas em pontos (r, z) do perfil, pode-se determinar a lâmina de percolação de água pela variação de armazenagem de água em curtos intervalos de tempo, conforme Silva et al., (2009):

$$LP = \frac{\sum_{i=1}^4 \left(\int_0^L \theta_t dZ - \int_0^L \theta_{t+1} dZ \right)}{i} \quad (2)$$

em que LP é a lamina de percolação estimada no intervalo de tempo Δt (mm), θ_t é a umidade no início do intervalo de tempo Δt (mm cm^{-1}); θ_{t+1} é a umidade no final do intervalo de tempo Δt (mm cm^{-1}), Z é a profundidade (m); L é a profundidade total do plano considerado (m); i é o número de planos utilizados para estimativa.

O objetivo deste trabalho foi analisar a estimativa da percolação de água do solo utilizando a equação de Darcy-Buckingham com funções $K(\theta)$ determinadas por métodos diretos em campo e indireto no laboratório, bem como pela variação de armazenagem de água no perfil monitorado por dezesseis pontos de medidas de umidade em diferentes intervalos de tempo com uso de reflectometria no domínio do tempo (TDR).

Material e Métodos

O experimento foi realizado na EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas - BA, com latitude $12^{\circ}48'S$, longitude $39^{\circ}06'W$ e altitude média de

225 m. Utilizou-se de um lisímetro de drenagem construído com fibra de vidro, o qual apresenta volume de 5 m^3 , medindo 2 m de largura, 2,5 m de comprimento e 1 m de profundidade. Para induzir um sistema de drenagem livre, o último 0,2 m do perfil foi dividido em duas camadas de 0,1m, sendo a inferior composta por um sistema de drenagem com tubos de PVC de 50 mm perfurados e brita zero e a superior com areia lavada. O solo utilizado para completar o preenchimento do lisímetro foi submetido à análise de composição granulométrica, resultando na classe textural Argilo-Arenosa. O resultado da análise físico-hídrica do solo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados Físico-hídricos do solo utilizado para preenchimento dos lisímetros em diferentes profundidades. Prof. – Profundidade (m); Lis. – lisímetro; Ks – Condutividade Hidráulica do solo Saturado; ds – densidade do solo.

Composição granulométrica (g/kg)											
Areia								Silte	Argila	Classificação textural	
Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Total						
33	64	196	188	62	543	101	356	Argila Arenosa			
Prof	Retenção de água - $\theta \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$							Ks	ds	Porosidade (%)	
	0,01m	0,6m	1,0m	3,3m	10m	30m	150m	m/s	(kg/dm^3)	Macro	Micro
0,1	0,476	0,2937	0,229	0,203	0,181	0,167	0,160	$5,04 \cdot 10^{-6}$	1,39	15,74	27,99
0,3	0,454	0,318	0,258	0,240	0,218	0,204	0,192	$2,53 \cdot 10^{-6}$	1,45	12,41	30,73
0,5	0,445	0,306	0,261	0,234	0,218	0,190	0,171	$2,61 \cdot 10^{-6}$	1,47	11,34	28,16
0,7	0,427	0,345	0,287	0,262	0,255	0,224	0,213	$2,71 \cdot 10^{-6}$	1,52	7,58	31,04

Sondas de TDR foram construídas com as seguintes características: três hastes de aço inoxidável de 0,003m de diâmetro com comprimento efetivo de 0,1 m fora da resina e espaçadas entre si por 0,017 m; cabos coaxiais de 50 ohms; comprimento da camada de resina de poliéster no início das hastes de 0,05 m. A determinação da umidade do solo foi feita tomando-se como base o ajuste dos valores obtidos por gravimetria, em relação aos dados da constante dielétrica aparente (K_a) medidos. A faixa de umidade que resultou na equação 3 foi de de $0,0408 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,3749 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 1).

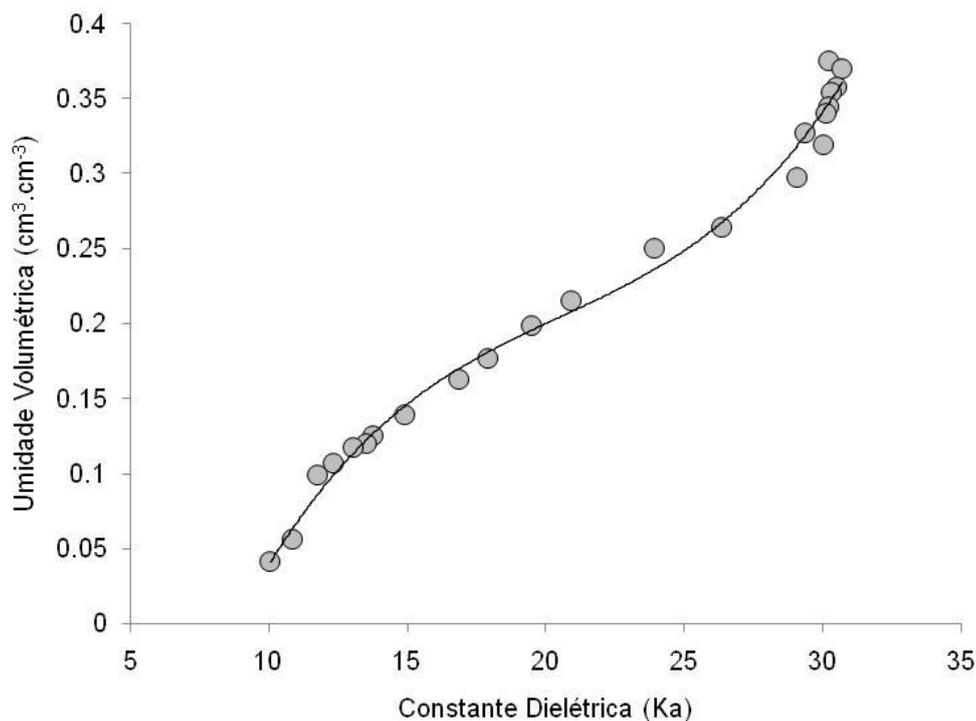


Figura 1. Relação entre umidade volumétrica (θ) e constante dielétrica (K_a) para o solo utilizado no experimento.

$$=0,000065ka^3 - 0,003979ka^2 + 0,090141ka - 0,528860 \quad (1)$$

A umidade do solo no interior do lisímetro foi monitorada em um perfil, no qual foi instalada uma malha composta por sondas de TDR distribuídas em pontos (r, z) de 0,20 m x 0,20 m sendo r e z as distâncias horizontal e vertical da origem situada na superfície do solo no centro do lisímetro. As sondas foram instaladas na medida em que se acomodava o solo no interior do lisímetro. No total, foram inseridas horizontalmente no perfil dezesseis sondas de TDR, as quais formaram um perfil de monitoramento, conforme a Figura 2.

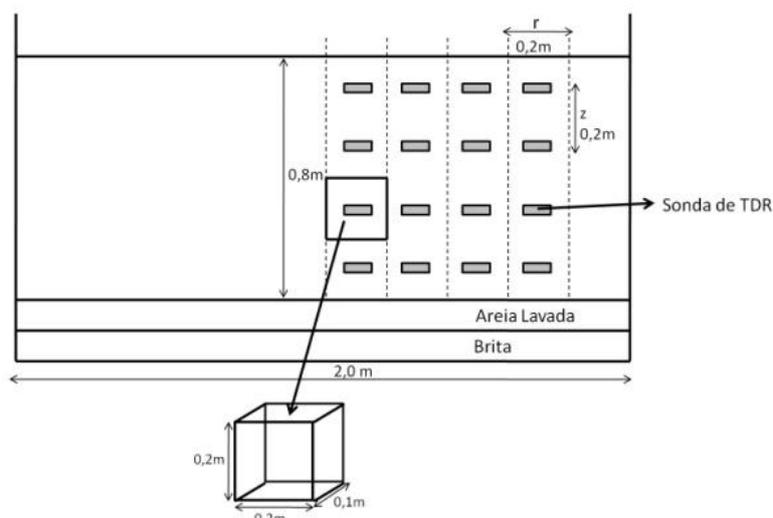


Figura 2. Disposição das sondas no perfil para o monitoramento da água no lisímetro.

O lisímetro foi saturado e coberto com lona plástica para evitar a evaporação. Assim, procedeu-se um ensaio de drenagem interna com um sistema de aquisição automática de dados composto por uma TDR 100, Campbell Scientific, conectada a multiplexadores. Para automatização das leituras de umidade, utilizou-se da linguagem BASIC (aplicativo *CR Basic*) para transferência de informações a um *data logger* modelo CR 1000 o que possibilitou a determinação e armazenamento de valores de constante dielétrica em intervalos de 15 minutos durante 670 horas. Os valores de K_a foram transformados em umidade volumétrica, utilizando-se da equação 3, com os quais, no processo de redistribuição de água, calculou-se a função $K(\theta)$ seguindo critérios propostos por Hillel et al. (1972), com base na solução para equação:

$$K(\theta)_z = \frac{\int_0^z \frac{\partial}{\partial t} dZ}{\left(\frac{\partial H}{\partial z}\right)_z} \quad (4)$$

em que θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) é a umidade volumétrica, t é o tempo (h), K é a condutividade hidráulica (m s^{-1}); H é o potencial total de água (m) e z é a profundidade (m).

Considerando $\partial H / \partial z = 1$ fez-se uso dos métodos propostos por Libardi et al. (1980) e Sisson et al. (1980), para determinação dos parâmetros da equação 5:

$$K(\theta) = K_0 e^{x(\theta - \theta_0)} \quad (5)$$

em que: x é o coeficiente angular da reta $\ln K$ em função de θ , K_0 e θ_0 valores de K e θ no tempo zero de redistribuição.

Substituindo a equação 5 na equação 4, obteve-se:

Para Libardi et al. (1980):

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{a} \ln t + \frac{1}{a} \ln \left(\frac{K_0}{az} \right) \quad (6)$$

Para Sisson et al. (1980):

$$\ln \left(\frac{z}{t} \right) = \ln(K_0) + (a - \theta_0) \quad (7)$$

sendo as equações 6 e 7 obtidas no processo de redistribuição a partir de regressões lineares de $\theta - \theta_0$ em função de $\ln(t)$ (Libardi et al., 1980) e $\theta - \theta_0$ versus $\ln(z/t)$ (Sisson, 1980). Em que t é o tempo decorrido, z a profundidade e $a = x / \bar{x}$. Para os dois casos, tomou-se x e K_0 pelos coeficientes angulares e lineares das regressões.

De forma indireta no laboratório, obteve-se a relação $K(\theta) \times x$ a partir da curva de retenção de água e da condutividade hidráulica do solo saturado (van Genuchten, 1980):

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \theta^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (8)$$

em que: $\Theta = (u - u_r) / (u_s - u_r)$ é a saturação efetiva, com u_r a umidade residual e u_s a umidade à saturação do solo, e $m = 1 - 1/n$ são os parâmetros adimensionais da curva de retenção de água no solo.

As lâminas drenadas no lisímetro foram medidas na saída do sistema de drenagem do mesmo em intervalos de tempo (Δt) variando de 1 h até 24 h, aumentando-se o intervalo de tempo de coleta na medida em que se percebia a diminuição da redistribuição de água no solo. Para os tempos correspondentes aos de coleta dos drenos, estimou-se o fluxo de água no solo na profundidade $z = 0,6$ m através da equação 1 utilizando as funções $K(\theta)$ obtidas pelos métodos de Hillel et al. (1972), Libardi et al. (1980), Sisson et al. (1980) e van Genuchten, (1980).

Para $\Delta t > 1$ h, integrou-se a equação 1 em relação ao final do intervalo de tempo, obtendo-se q_i valores:

$$q_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} q dt \quad (9)$$

em que q_i é o fluxo estimado no intervalo de tempo $\Delta t > 1$ h (mm); t_i corresponde ao início do intervalo de tempo Δt ; t_{i+1} o final do intervalo de tempo Δt , e $q = (t - t_{i+1}) / \Delta t$.

Com uso da equação 2, estimaram-se as lâminas de percolação correspondente aos tempos de coleta de drenos nos lisímetros, considerando a integral dos valores de umidade dos dezesseis pontos de monitoramento, nos tempos específicos, para camada 0,1 m - 0,7 m.

Os valores do potencial matricial (Ψ_m) foram calculados por meio dos dados de umidade obtidos pela equação 3 e do ajuste da curva de retenção de água no solo segundo van Genuchten (1980):

$$\Psi_m = \frac{\left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}}{r} \quad (10)$$

Para verificar a normalidade da distribuição dos valores de umidade do perfil utilizou-se da metodologia recomendada por Jones (1969) com 5% de probabilidade. A comparação dos valores das lâminas de percolação estimadas pela TDR aos valores observados na saída dos drenos dos lisímetros de drenagem foi feita considerando o conjunto de dados obtidos para todos intervalos de tempo e também agrupando-os em classes de Δt , quais sejam: $\Delta t < 1$ h; $1 \text{ h} < \Delta t < 7 \text{ h}$ e $7 \text{ h} < \Delta t < 25 \text{ h}$. Avaliou-se as estimativas de percolação por meio de um ajuste de um modelo de regressão linear simples com os valores observados y sobre os valores estimados x , por equações do tipo: $y = ax + b$ sujeito à hipótese de nulidade conjunta dos parâmetros estimados a e b : $H_0: a=1$ e $b=0$ (Mayer et al., 1994). Se qualquer uma das duas hipóteses de nulidade for rejeitada ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), os valores de percolação estimados não são equivalentes aos valores observados na saída dos drenos dos lisímetros. Considerou-se a raiz quadrada do erro médio (RMSE) como avaliação complementar das estimativas das lâminas de percolação (Willmott, 1981):

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad (11)$$

em que: P_i são os valores das lâminas de percolação estimadas (mm); O_i os valores das lâminas de percolação observadas e N o número de pares de valores.

Resultados e Discussão

Distribuição da umidade no perfil de monitoramento

Para testar a normalidade dos valores de umidade obtidos ao longo do tempo no interior do lisímetro, utilizou-se da metodologia recomendada por Jones (1969), com um grau de confiança de 95%. Assim, a hipótese de que os valores de umidade obtidos nos dezesseis pontos de monitoramento segue distribuição normal não foi rejeitada, pois os valores de assimetria (\hat{r}_3) e de curtose (\hat{s}_2) calculados para quatro diferentes momentos de avaliação (Tabela 2) estiveram dentro das faixas de recomendação: $-1.019 < \hat{r}_3 < +1.019$ e $1.68 < \hat{s}_2 < 4.73$. Com base nos valores dos coeficientes de variação e nos valores das médias e medianas, pode-se considerar que o sistema de saturação inicial do solo proporcionou uma adequada distribuição de água no lisímetro garantindo as condições de uniformidade desejadas para o experimento.

Tabela 2. Estatísticas descritivas para umidade no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) nos dezesseis pontos de monitoramento e em quatro tempos durante a redistribuição da água no solo.

Tempo (h)	Média	D.P*	C.V* (%)	Coef. De Assimetria	Coef. De Curtose	A.T*	Mediana
24h	0,3416	0,0505	14,79	0,6172	1,9597	0,1530	0,3212
120h	0,3240	0,0559	17,27	0,3806	1,7847	0,1710	0,3212
360h	0,3068	0,0529	17,26	0,3438	1,7737	0,1587	0,2913
620h	0,3051	0,0531	17,42	0,1972	1,7428	0,1620	0,3000

*D.P –Desvio padrão ;C.V – Coeficiente de Variação; A.T – Amplitude Total;

Na Figura 3 pode-se visualizar o comportamento dos valores de umidade média ao longo do tempo nas quatro profundidades do solo no interior do lisímetro. Verifica-se que, para todas as profundidades, os máximos e mínimos valores de umidade encontram-se dentro do limite obtido no ajuste dos valores de K_a e quando da calibração das sondas em laboratório. Nota-se na Figura 3, que as taxas de redução da umidade com o tempo (inclinação das curvas) se comportaram de maneira semelhante para todas as profundidades avaliadas, o que para Libardi & Melo Filho (2006) é um indicativo de que o processo de

redistribuição e secagem ocorreu de forma aproximadamente uniforme em todo período de avaliação. Assim, como a saída de água do perfil se deu apenas por drenagem foi possível estimar as lâminas de percolação correspondentes aos do intervalo de tempo de coleta de dreno do lisímetro devido a possibilidade do cálculo da variação de armazenamento em cada ponto de monitoramento para o intervalo de tempo de automação da TDR.

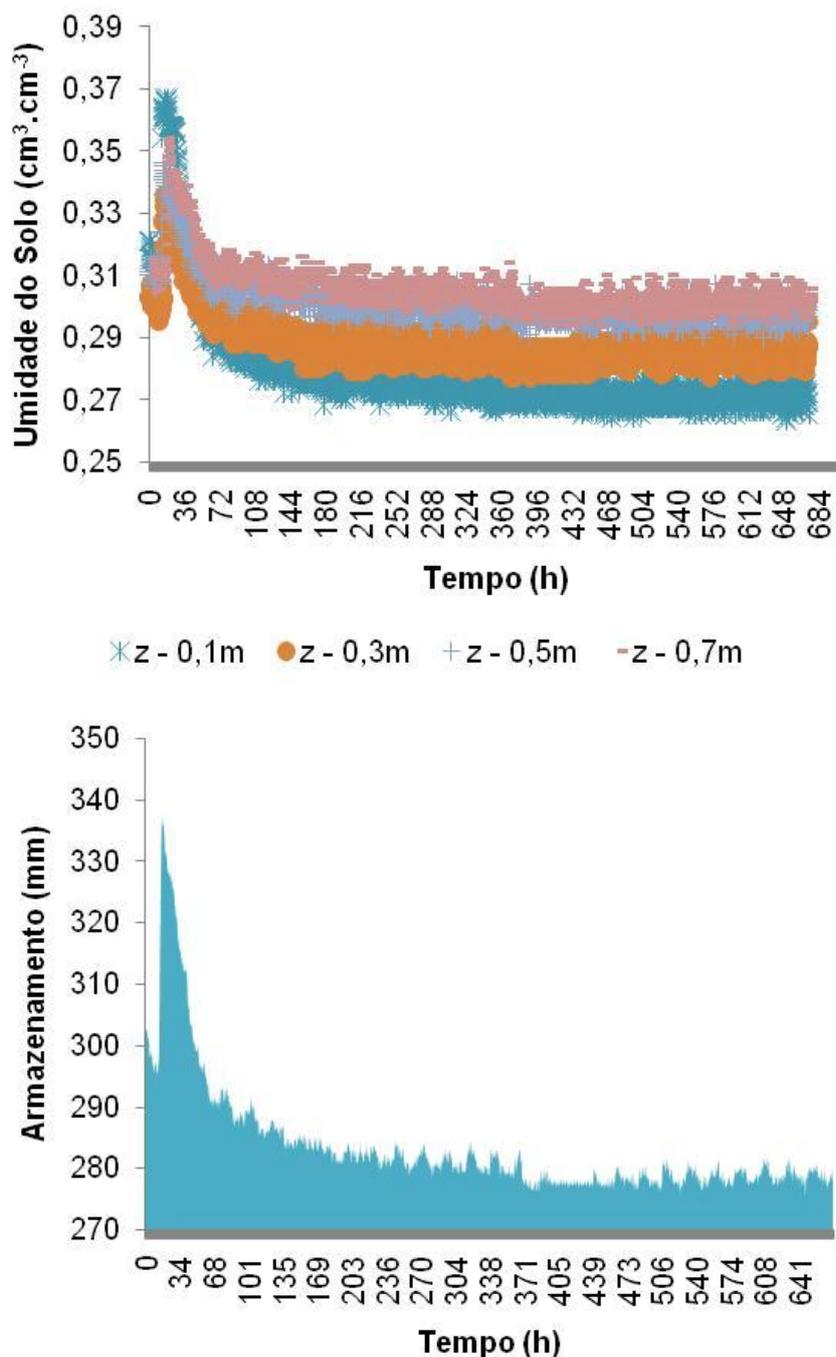


Figura 3. Distribuição da umidade média nas profundidades e armazenamento de água no perfil de monitoramento.

Determinação dos parâmetros da função $K(\theta)$

Nas Tabelas 3 e 4, apresentam-se os valores dos parâmetros obtidos na determinação das equações de estimativa da função $K(\theta)$ pelos diferentes métodos estudados. Destaca-se que para os métodos diretos determinaram-se as funções $K(\theta)$ em três profundidades (0,2 m; 0,4 m e 0,6 m), pois os cálculos do gradiente ($\partial H/\partial z$) foram obtidos entre 0,1 m e 0,3 m; 0,3 m e 0,5 m e 0,5 m e 0,7 m, sendo que para efeito da estimativa das lâminas de percolação através da equação 1, foi considerado o fluxo ocorrido na última camada.

Observando-se os parâmetros de ajuste K_0 e α da equação $K(\theta) = K_0 e^{\alpha(\theta - \theta_0)}$, notam-se as diferenças entre os valores obtidos em função dos diferentes métodos e também das profundidades do solo. A partir da razão entre o desvio padrão e a média dos valores do parâmetro K_0 nas diferentes profundidades, resultam-se valores na ordem de 62,70; 45,58 e 58,97%, ao se utilizar as metodologias propostas por Hillel et al. (1972), Libardi et al. (1980) e Sisson (1980). Segundo Reichards & Timm (2012) as variações se justificam, por terem sido os valores de K_0 determinados na redistribuição de água no solo. De fato, no presente estudo, obtiveram-se no tempo inicial de leituras com a TDR valores de θ_0 não uniformes nas três diferentes profundidades, conforme pode-se observar na Tabela 2 e na Figura 4. Reichardt et al. (1998) observaram que cada eleição de um tempo para escolha de θ_0 resulta em um determinado valor de K_0 . Observa-se que as umidades no tempo zero (θ_0) obtidas no método do perfil instantâneo foram menores que as umidades volumétrica saturada (θ_s) obtida em laboratório, por isso, a condutividade hidráulica no tempo inicial (K_0) fez-se não equivalente a condutividade hidráulica saturada (K_s), o que resultou em uma estimativa da função $K(\theta)$ com uma faixa de umidade ($\Delta\theta$, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) dos modelos distintas, considerando os métodos de campo e de laboratório.

Para o parâmetro α , as variações nos valores obtidos nas diferentes profundidades, foram menores que as encontradas para o parâmetro K_0 . Verifica-se para este parâmetro variações na ordem de 11,21; 23,06 e 25,86%, ao se utilizar dos métodos de Hillel et al. (1972), Libardi et al. (1980) e Sisson et al. (1980), respectivamente.

A evolução dos valores de $K(\theta)$ estimados pelos diferentes métodos em função do tempo, para a profundidade de 0,6 m, revela que o maior distanciamento dos valores de $K(\theta)$ estimados pelos diferentes métodos ocorre no início do processo de redistribuição de água no solo, sendo os valores estimados pelos métodos diretos superiores aos estimados através do ajuste de dados obtidos em laboratório (Figura 4). Mermoud & Xu (2006) comparando o método do perfil instantâneo e o de van Genuchten (1980) também estimaram para o primeiro, valores de condutividade hidráulica maiores e atribuíram este fato as diferenças de escala de medida de θ envolvida nas duas metodologias. Os valores de $K(\theta)$ estimados tenderam a se aproximar à medida que ocorreu redistribuição de água no solo, sendo que os métodos de Sisson (1980) e Libardi et al. (1980) foram aqueles que apresentaram comportamento mais semelhante.

Tabela 3. Parâmetros de ajuste da função $K(\theta)$ obtidas para uso do método de van Genuchten (1980).

Profundidade (m)	Parâmetros				
	α (m^{-1})	n	θ_r ($cm^3 cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3 cm^{-3}$)	Ks (m/s)
0,2	3,73	2,09	0,1718	0,4767	$5,04 \cdot 10^{-6}$
0,4	4,89	1,72	0,1978	0,454	$2,53 \cdot 10^{-6}$
0,6	7,67	1,48	0,1733	0,4457	$2,61 \cdot 10^{-6}$
0,8	4,62	1,50	0,2097	0,4273	$2,71 \cdot 10^{-6}$

Tabela 4. Parâmetros da função $K(\theta)$ obtidos para uso dos métodos de Hillel et al. (1972), Libardi et al (1980) e Sisson et al. (1980).

z (m)	Hillel et al. (1972)			Libardi et al. (1980)			Sisson et al. (1980)			
	K_0 (m/s)	χ	R^2	K_0 (m/s)	χ	R^{2*}	K_0 (mm.h ⁻¹)	χ	R^{2*}	
0,2	0,339	$3,2 \cdot 10^{-7}$	51,45	0,918	$6,1 \cdot 10^{-7}$	124,53	0,96	$4,9 \cdot 10^{-7}$	120,2	0,96
0,4	0,3485	$1,1 \cdot 10^{-6}$	43,64	0,976	$1,4 \cdot 10^{-6}$	114,15	0,92	$1,1 \cdot 10^{-6}$	105,3	0,92
0,6	0,360	$1,5 \cdot 10^{-6}$	54,47	0,936	$1,7 \cdot 10^{-6}$	78,125	0,90	$1,9 \cdot 10^{-6}$	70,47	0,90

* R^2 referente à regressão ($K_0 -$) em função de $\ln(t)$ e ($\chi -$) em função de $\ln(z/t)$.

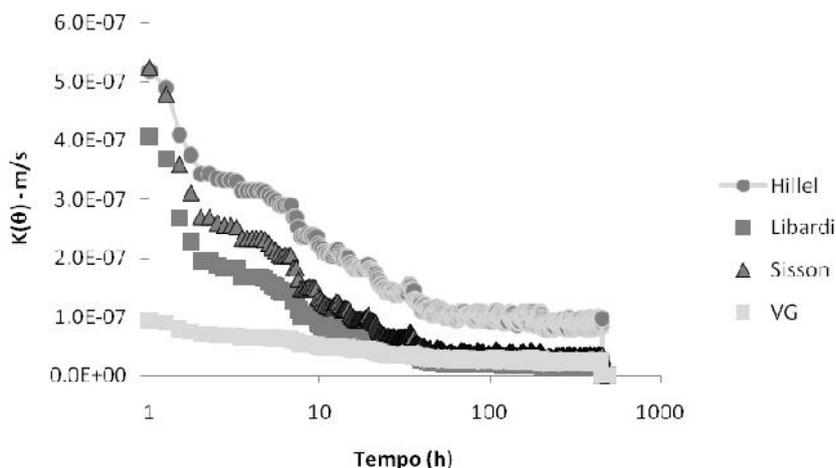


Figura 4. Evolução dos valores de $K(\theta)$ estimados pelos diferentes métodos no tempo

Análise das estimativas da percolação

As regressões entre os valores das lâminas de drenagem observadas no lisímetro e as estimadas pelas equações 1 e 2, para todos os intervalos de tempo de drenagem, encontram-se apresentadas na Figura 5. A avaliação conjunta do intercepto e do coeficiente de inclinação das equações de regressão dos valores observados sobre os estimados pelos diferentes métodos avaliados, apontou a não rejeição da hipótese de nulidade ($P > 0,05$) para os valores preditos pela equação 2 e de Darcy-Buckingham utilizando a função $K(\)$ obtida pela metodologia proposta por Hillel et al. (1972) (Tabela 5). Agrupando o conjunto de valores de lâminas observadas e estimadas em classes de intervalos de tempo como $\Delta t = 1$ h; $1 \text{ h} < \Delta t \leq 7$ h e $7 \text{ h} < \Delta t \leq 25$ h verificou-se que o uso da metodologia de Hillel et al. (1972) para estimativas de lâminas de percolação em intervalos de tempo iguais ou menores que 1 h tornou-se menos acurado que quando utilizado para estimativas em intervalos de tempo maiores (Tabela 5).

Na análise da regressão linear das lâminas de percolação observadas no lisímetro e estimadas por meio dos métodos de van Genuchten (1980), Sisson et al. (1980) e Libardi et al. (1980) obteve-se valores de $P < 0,05$ pelo teste de hipótese para nulidade conjunta (Mayer et al., 1994) e, assim, as lâminas de drenagem estimadas por estes métodos não apresentaram equivalência e foram inferiores às observadas em lisímetros.

Verifica-se na relação entre as lâminas drenadas estimadas pela equação de Darcy-Buckingham utilizando-se da função $K(\)$ obtida pelo método de VG e as

observadas no lisímetro, que a variação unitária (1 mm) da lâmina observada corresponde a 0,03 mm nas lâminas estimadas. Marion (1994) declara que uma das vantagens de se utilizar o método de VG é a possibilidade de obter valores de $K(z)$ em ampla faixa. De fato, observou-se neste estudo que a faixa dos parâmetros obtidos em laboratório para prever a função $K(z)$ é mais ampla, entretanto, não correspondeu com aquela obtida em campo, levando a erros na predição do fluxo de água. Ghiberto & Moraes (2011) acrescentam que, possivelmente, a falta de concordância deste método deve-se também ao fato de que o seu desempenho depende do valor de K_s , o que para eles constitui uma grande simplificação.

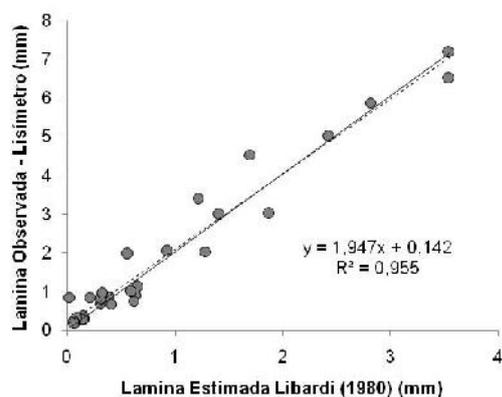
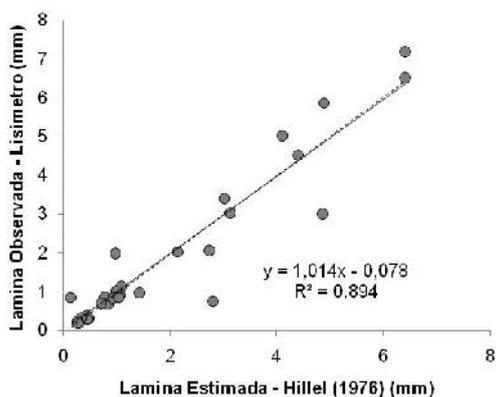
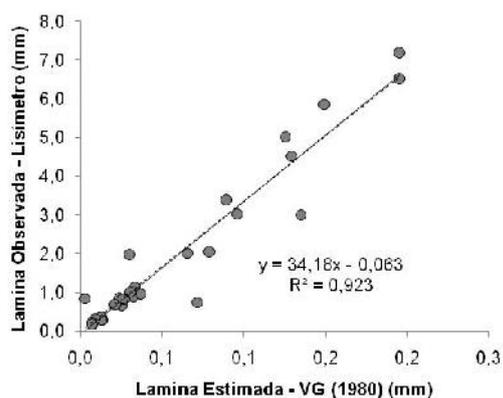
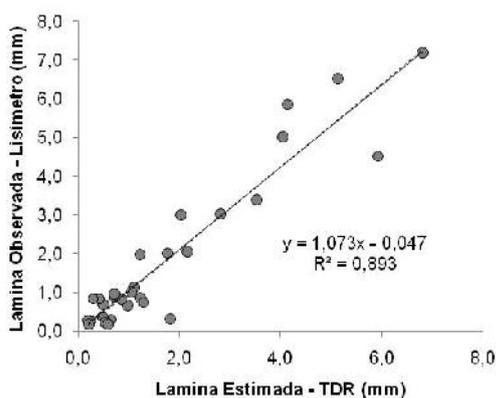
Apesar das diferenças metodológicas envolvidas nos métodos de Libardi et al. (1980) e Sisson (1980) no cálculo de $K(z)$, observou-se semelhança nos valores das lâminas drenadas estimadas pela equação 1 utilizando-se das funções $K(z)$ ajustadas por estes métodos. Nota-se que a proporção da variação das lâminas de drenagem observadas nos lisímetros é descrita pela variabilidade das lâminas estimadas pelos dois métodos de forma semelhante e satisfatória: 95,5% e 95,9%. Entretanto, com base nos coeficientes de regressão, verifica-se que as lâminas estimadas pela equação de Darcy-Buckingham ao se utilizar a função $K(z)$ ajustada por Libardi et al. (1980) e Sisson et al. (1980) subestimam os valores das lâminas observadas em 44% e 65%, respectivamente. Isto revela que, não obstante o alto grau de concordância da relação $(H_0 - H) \text{ versus } \ln(t)$ e $(H - H_0) \text{ versus } \ln(z/t)$, admitir $\partial H / \partial z = 1$ resultou em erros na estimativa da condutividade hidráulica no perfil, o que proporcionou distanciamento dos valores estimados e observados das lâminas de percolação.

Tabela 5. Estatística para regressão entre os valores das lâminas de percolação observadas em lisimetria e estimadas pela TDR.

Ítem ($y = a + bx$)	TDR	Darcy - Buckingham			
		vG* (1980)	Hillel et al. (1972)	Libardi et al. (1980)	Sisson et al. (1980)
Conjunto de valores ($0 < \Delta t < 25h$)					
Intercepto (a)	-0,047	-0,063	-0,078	0,142	0,076
Inclinação (b)	1,073	34,18	1,014	1,947	1,410
Valor P ($H_0: a = 0$ e RMSE)	0,4694	<0,05	0,89784	<0,05	<0,05
	0,6701	2,662	0,6525	1,432	0,919

	Δt 1h				
Intercepto (a)	0,1283	-0,1541	-0,2063	0,1132	0,06
Inclinação (b)	0,7124	36,73	1,1765	1,4777	1,13
Valor P ($H_0: a= 0$ e	0,1874	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
RMSE	0,2186	0,6898	0,1218	0,3124	0,1632
	$1 < \Delta t$ 7h				
Intercepto (a)	-0,55	-0,0608	-0,1020	0,1562	0,1038
Inclinação (b)	1,37	37,22	1,1410	1,9068	1,4027
Valor P ($H_0: a= 0$ e	0,1119	<0,05	0,2820	<0,05	<0,05
RMSE	0,8062	2,6562	0,5519	1,3995	0,9128
	$\Delta t > 8h$				
Intercepto (a)	0,3567	-0,1579	-0,2868	0,5443	0,3627
Inclinação (b)	0,9473	33,4467	1,0056	1,8377	1,3412
Valor P ($H_0: a= 0$ e	0,7246	<0,05	0,8542	<0,05	<0,05
RMSE	0,8058	3,8044	1,015	2,0829	1,3296

vG – van Genuchten



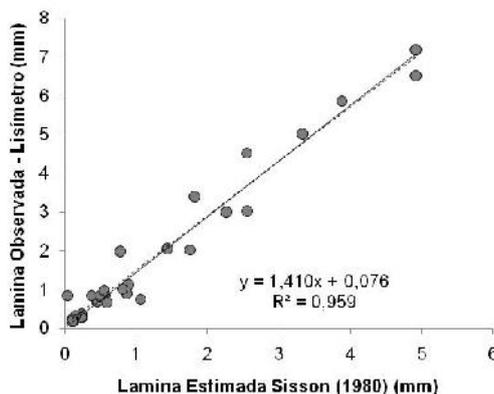


Figura 5. Regressões entre os valores das lâminas de drenagem observadas no lisímetro e as estimadas para todos os intervalos de tempo obtidos.

Conclusões

Os valores das lâminas de percolação estimada com reflectometria no domínio do tempo a partir da variação do armazenamento de água com uso de 16 pontos de monitoramento no perfil do solo foram semelhantes às medidas nos lisímetros de drenagem.

O uso da equação de Darcy-Buckingham para estimativa das lâminas de percolação com uso da função $K(\theta)$ estimada pela metodologia de Hillel et al. (1972) proporcionou estimativas de percolação de água com valores compatíveis aos obtidos no lisímetro de drenagem para intervalos de tempo maior que 1 hora.

Os valores estimados de percolação de água pela equação de Darcy-Buckingham com funções $K(\theta)$ obtidas pelas metodologias de Libardi et al. (1980), Sisson et al. (1980) e van Genuchten, (1980) foram inferiores aos observados em lisímetros de drenagem.

Referências Bibliográficas

ADHANOM, G.T.; STIRZAKER, R.J.; LORENTZ, S.A.; ANNANDALE, J.G.; STEYN, J.M. Comparison of methods for determining unsaturated hydraulic conductivity in the wet range to evaluate the sensitivity of wetting front detectors. Water SA. v. 38, p.67 – 76, 2012.

ARYA, L.M.; HEITMAN, J.L. Hydraulic Conductivity Function from Water Flow Similarity in Idealized- and Natural-Structure Pores. *Soil Science Society of America Journal*. v. 74, p.787-796, 2010

BARAM, S.; KURTZMAN, D.; DAHAN, O. Water percolation through a clayey vadose zone. *Journal of Hydrology*, v.424-425, p.165-171, 2012.

CAMPOS, J.H.B .; SILVA, V.P.R.;AZEVEDO, P. V.; BORGES, C. J.R.; SOARES, J.M.; MOURA, M. S.B.; SILVA, B.B. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.12, n.2, p.150–156, 2008.

DIKINYA, O. Comparison of the instantaneous profile method and inverse modeling for the prediction of effective soil hydraulic properties. *Australian Journal of Soil Research*, v.43, p.599-606, 2005.

DYE, H.B.;HOUSTON,B.D.;WELFERT,B.D.Influence of unsaturated soil properties uncertainty on moisture flow modeling. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 29, p.161-169, 2011.

GHIBERTO, P. J.; MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um latossolo vermelho-amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. vol.35, n.4, p. 1177-1188, 2011.

GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Components of the water balance in soil with sugarcane crops. *Agricultural Water Management*. vol. 102, n.1, p 1-7, 2011.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristic in situ. *Soil Science*, vol.114, p.395 - 400,1972.

JIMÉNEZ-MARTÍNEZA, J.; SKAGGS, T.H.; van GENUCHTEN, M.Th.; CANDELA, L. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Jornal of Hydrology*. vol.367, n.1 - 2, p.138–149, 2009.

JONES, T. A. Skewness and kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. *Journal Sedimentary Petrology*, Northeast Georgia, v.39, p.1622-1627, December, 1969.

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

LIBARDI, P.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.P. & BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, vol.44, p.3-7, 1980.

MARION, J. M.; OR, D.; ROLSTON, D. E.; KAVVAS, M. L.; BIGGAR, J. W. Evaluation of Methods for Determining Soil-Water Retentivity and Unsaturated Hydraulic Conductivity. *Soil Science*. vol.158, p.1-13, 1994.

MAVIMBELA, S.S.W.; van RENSBURG, L.D. Evaluating models for predicting hydraulic characteristics of layered soils. *Hydrology and earth System Sciences Discussions*. v.9, p.301-336, 2012.

MERMOUD, A.; XU, D. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. *Soil Tillage Resource*. vol.87, p.89–100, 2006.

MUBARAK, I.; ANGULO-JARMILLO, R.; MAILHOL, J.C.; RUELLE, P.; KHALEDIAN, M. & VAUCLIN, M. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent? *Agricultural Water Management*, vol. 97, p.1517-1526, 2010.

MAYER, D.G.; STUART, M.A.; SWAIN, A.J. Regression of real-world data on model output: an appropriate overall test of validity. *Agricultural System*, v.45, n.2, p.93-104, 1994.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C.; *Solo, Planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. 2. Ed. – Barueri, SP: manole, 500p, 2012.

REICHARDT, K.; PORTEZAN, O.; LIBARDI, P.L.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; OLIVEIRA, J.C.M. & FALLEIROS, M.C. Critical analysis of the Field

determination of soil hydraulic conductivity functions using the flux-gradient approach. *Soil & Tillage Research*, vol.48, p.81-89, 1998.

SANT'ANA J. A. do V.; COELHO, E.F.; SILVA JUNIOR, J.J.; SANTANA JUNIOR, E. B.; VEINROMBER JUNIOR, L. A.A. Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*.v.36, n.4, p.1123-1130, 2012.

SILVA, A.L.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO-NETO, D. On the use of soil hydraulic conductivity functions in the field. *Soil & Tillage Research*, v.93, p.162-170, 2007.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. de.; WORKMAN, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.44, p.730-737, 2009.

SELLE, B.; MINASNY, B.; BETHUNE, M.; THAYALAKUMARAN, T.; SUBHASH, C. Applicability of Richards' equation models to predict deep percolation under surface irrigation. *Geoderma*. vol. 160, p. 569–578, 2011.

SÉRÉ, G.; OUVARD, S.; MAGNET, V.; PEY, B.; MOREL, J. L.; SCHWARTZ, C. Predictability of the Evolution of the Soil Structure using Water Flow Modeling for a Constructed Technosol. *Vadose Zone Journal*. v. 11. doi:10.2136/vzj2011.0069; 2012.

SISSON, J.B.;FERGUSON,A.H.;VAN GENUCHTEN, M. Th. Simple methods for prediction drainage from field plots. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 1147-52, 1980.

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

WESSOLEK, G.; SCHWARZEL, K.; GREIFFENHAGEN, A.; STOFFREGEN, H. Percolation characteristics of a water-repellent sandy forest soil. *European Journal of Soil Science*, v. 59, p.14–23, 2008.

WEYNANTS, M.; VEREECKEN, H.; JAVAUX, M.. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone Journal*. vol.8, p.86–95, 2009.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, p.184-194, 1981.

CAPÍTULO 3

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DAS DEPLEÇÕES DE ÁGUA NA REGIÃO DO SOLO EXPLORADA PELAS RAÍZES DA BANANEIRA IRRIGADA³

³ Artigo a ser submetido em periódico a se definir.

Variabilidade Espacial e Temporal das Depleções de Água na Região do Solo explorada pelas Raízes da Bananeira

RESUMO - O conhecimento das variações de armazenamento de água no solo no espaço e no tempo na região explorada pelas raízes das plantas é de suma importância para orientar estudos que visam determinar o balanço de água no solo, verificar a zona efetiva de extração de água no solo, indicar a correta região para manejo de água, fertilizantes e pesticidas. Os objetivos deste trabalho foram: (i) utilizar a técnica da TDR para avaliar a variabilidade da extração de água na região radicular da bananeira (ii) verificar a ocorrência de diferenças nos percentuais de saída de água na região radicular da bananeira em diferentes distâncias da planta e profundidade do solo ao se utilizar um, dois, três e quatro perfis de monitoramento de umidade e (iii) indicar as regiões de atividade radicular da bananeira em diferentes fases de desenvolvimento. O experimento foi realizado no campo experimental da EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas – BA, em uma área plantada com bananeira em lisímetros de drenagem. Instalou-se um sistema de aquisição automática de dados composto por TDR, datalogger e 10 multiplexadores, para leitura e armazenamento de valores de umidade em 72 pontos de monitoramento no interior de um lisímetro. As leituras foram realizadas em intervalos de 15 minutos e os valores de extração de água do solo foram quantificados com base nas variações de umidade nos pontos monitorados. Verificou-se que a variabilidade da extração de água da região explorada pelas raízes da bananeira em função do tempo e do espaço não é igual para todas as camadas de solo e varia em escala de média a alta. Com exceção do verificado na fase de crescimento vegetativo da bananeira em que se encontraram diferenças entre a distribuição percentual da extração de água no solo nas camadas dos diferentes perfis, para as demais fases de desenvolvimento da planta a partição da extração de água no perfil do solo em percentual foi igual para os quatro perfis monitorados. A região indicada como a de maior atividade do sistema radicular da bananeira é a delimitada pela distância 0,7 m e profundidade 0,3 m nas fases de desenvolvimento inicial e crescimento vegetativo e 0,9 m e 0,4 m nas fases de floração e crescimento de frutos.

PALAVRAS CHAVE: extração de água no solo, manejo da irrigação, banana

Spatial and temporal variation of soil water storage in the region explored by banana roots

ABSTRACT - Knowledge of spatial and temporal variation of soil water storage in the region explored by plant roots is important to guide researchers studying soil water balance, root water uptake and to indicate the placement indication of water, fertilizers and pesticides. The objectives of this work were: (i) use the TDR technical for assess the variability of water extraction in root system region of the banana crop; (ii) verify the occurrence of differences in the percentages of water uptake by banana crop at different distances from the plant and soil depth when using one, two, three and four profiles soil moisture monitoring; (iii) indicate the region of banana root activity at different stages of development. The experiment was conducted on an experimental field of EMBRAPA Cassava and Fruits, Cruz das Almas – BA. Banana tree was planted in drainage lysimeters. Instead a system for automatic data acquisition consists of TDR, datalogger and 10 multiplexers for reading and storage of soil moisture values at 72 monitoring points within a lysimeter. The soil moisture values were recorded at 15-minute intervals and values of uptake were quantified based on variations of moisture in the monitored points. It was found that the variability of the water uptake in the root system region of banana in space and time is not equal for all soil layers and varies from medium to high scale. Obtaining differences between the percentage distribution of water extraction in soil layers of different profiles found in vegetative growth phase of banana was an exception. In the others stages of plant development, the partition of the extraction of water in the soil profile in percentage was the same for the four profiles monitored. The region indicated as the highest activity of the root system is bounded by the distance 0.7 m and depth of 0.3 m in the initial stages of development and vegetative growth. For stages of flowering and fruit growth the region indicated as the highest activity of the root system is bounded by the distance 0.9 m and depth of 0.4 m.

KEY WORDS: water extraction in soil, irrigation management, banana

Introdução

O conhecimento das variações de armazenamento de água no solo no espaço e no tempo na região explorada pelas raízes das plantas é de suma importância para orientar estudos que visam determinar o balanço de água no solo, verificar a zona efetiva de extração de água no solo, indicar a correta região para manejo de água, fertilizantes e pesticidas.

O desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis requer melhor entendimento do processo biofísico da extração de água no solo pelas culturas (Green et al., 2006). Algumas recomendações de posicionamentos de sensores e de aplicação de nutrientes têm sido feita com base na distribuição de raízes no solo (Sokalska et al., 2009; Sant'Ana et al., 2012; Lucas et al., 2012). Em outros trabalhos, entretanto, tem-se verificado que a extração de água pelas raízes nem sempre ocorre em direção proporcional à concentração de raízes (Clothier & Green, 1994; Silva et al., 2009; Javaux et al., 2008; Raza et al., 2013). Assim, Tumlinson et al. (2008) observando a variação de umidade que ocorre na região explorada pelas raízes de milho (*Zea mays*) chamaram a atenção para a necessidade de mais investigações detalhadas da dinâmica temporal da umidade nesta região. Neste sentido algumas orientações de manejo de água e nutrientes já vêm sendo realizadas levando em consideração as zonas efetivas de extração de água pelas plantas (Coelho et al., 2007; Guohua et al., 2010), porém, melhor entendimento das variações das depleções de água existente na rizosfera das culturas ainda são necessários.

Segundo Green et al. (2006), a primeira solução para descrever o movimento de água para as raízes das plantas foi proposta por Gardner (1960). Desde então, muitos modelos têm sido recomendados (Gardner, 1964; Molz e Remson, 1970; De Jong van Lier et al., 2008; Couvreur et al., 2012). Nimah e Hanks (1973) dividem as soluções para estimativa do fluxo de água para raízes das plantas em dois tipos: microscópicas, que consideram o fluxo radial em direção a raízes individuais (Philip, 1957; Gardner, 1960) e macroscópicas, que consideram toda extensão do sistema radicular e desconsideram a geometria e extração da água do solo das raízes individuais (Gardner, 1964; Molz & Remson, 1970; Jong van Lier et al., 2008).

Para Moradi et al., (2011) a aquisição de dados que possibilitem a visão da dinâmica da água no solo na região radicular de uma cultura ainda é tecnicamente desafiador. Estes autores utilizaram a tomografia com nêutrons para quantificar e visualizar o conteúdo de água na rizosfera de plantas de grão-de-bico (*Cicer arietinum*), lupino branco (*Lupinus albus*) e milho (*Zea mays*). Zarebanadkouki et al. (2012) propuseram o uso da tomografia com nêutrons combinado com injeção de água deuterada (D₂O) para quantificar as depleções de umidade ao longo do sistema radicular de lupino branco.

Outros experimentos monitoram a variação de umidade na região radicular das culturas em nível de campo por meio de técnicas clássicas como Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) (Coelho et al., 2010; Silva et al., 2009) e sonda de nêutrons (Koumanov et al. 2006; Duursma et al., 2011; Neale et al., 2012). Nestes, de posse dos dados de umidade ao longo do tempo em diversos pontos da região radicular, integram-se os resultados individuais de variação de umidade em duas direções no solo e as depleções de água no solo são consideradas como extração de água pela planta. Como a redução da umidade na região explorada pelas raízes de um planta não ocorre apenas devido a extração de água, tem-se o cuidado de considerar a evaporação, redistribuição e perdas por percolação. Neste sentido, Coelho & Or (1996) quantificaram a contribuição da evaporação com duas sondas de TDR instaladas horizontalmente à 0,03 m de profundidade e Andreu et al. (1997) separaram a redistribuição de água iniciando as medidas de redução de umidade 8 h após o início da irrigação e desprezaram a evaporação em função do sombreamento da área pela cultura.

Para van der Ploeg et al. (2010) dados de variação de umidade na região das raízes das plantas são bastantes úteis para melhorar a acurácia dos modelos de extração de água pelas raízes. Porém, a hipótese de que a obtenção da variação de umidade em diferentes profundidades e distâncias da planta obtida em um perfil é suficiente para representar o que ocorre em todo entorno da planta para estimativa de processos como evapotranspiração, transpiração, profundidade e distância efetiva de extração de água pelas culturas precisa ser testada para diferentes condições de cultivo.

A distribuição da extração de água no solo da bananeira já foi estudada por Coelho et al. (2010), Silva et al. (2009) e Silva et al. (2012), porém, as

informações limitam-se a um perfil de monitoramento de água no solo com a planta em fase de produção e irrigada por microaspersão e gotejamento. Os esforços relativos aos estudos de campo envolvendo a caracterização da extração de água pela cultura da bananeira se justificam pelo fato da cultura representar uma importante commodity agrícola para muitos países em desenvolvimento (Ding et al., 2013) e ser muito exigente em água (Akinro et al. 2012) e adubação (Ratke et al., 2012). De acordo com Turner et al. (2007) a água é o mais provável fator limitante não biológico que afeta a produção da bananeira e de acordo com a FAO a produção mundial da cultura foi de cerca de 95,6 milhões de toneladas em 2009.

Os objetivos deste trabalho foram: (i) utilizar a técnica da TDR para avaliar a variabilidade da depleção de água na rizosfera da bananeira em função do espaço e do tempo durante o primeiro ciclo de produção da cultura; (ii) verificar a ocorrência de diferenças nos percentuais de saída de água na região radicular da bananeira em diferentes distâncias da planta e profundidade do solo ao se utilizar um, dois, três e quatro perfis de monitoramento de umidade e (iii) indicar as regiões de atividade radicular da bananeira em diferentes fases de desenvolvimento.

Material e Métodos

O experimento foi realizado na Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas - BA, com latitude 12°48'S, longitude 39°06'W e altitude de 225 m. Em uma área de experimentos com lisímetros foram transplantadas mudas micropropagadas de bananeira variedade 'BRS Platina' no dia 23/12/2011 para lisímetros com volume de 5,00 m³, medindo 2,0 m de largura, 2,5 m de comprimento e 1,0 m de profundidade (Figura 1).



Figura 1. Bananeiras plantadas nos lisímetros. Plantas jovens e plantas adultas. Lado esquerdo é a cultivar Platina e lado direito Galil.

Para induzir um sistema de drenagem livre nos lisímetros, os últimos 0,2 m do perfil foi dividido em duas camadas de 0,1m, sendo a inferior composta por um sistema de drenagem com tubos de PVC de 50 mm perfurados e brita zero e a superior com areia lavada. O solo utilizado para completar o preenchimento dos lisímetros foi submetido à análise de composição granulométrica, resultando na classe textural Argilo-Arenosa. O resultado da análise físico-hídrica do solo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Composição granulométrica do solo utilizado para preenchimento dos lisímetros.

Prof	Composição granulométrica (g/kg)										
	Areia							Silte	Argila	Classificação textural	
	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Total					
	33	64	196	188	62	543	101	356	Argila Arenosa		
Prof	Retenção de água - $\theta \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$							Ks m/s	Dens. (kg/dm^3)	Porosidade (%)	
	0,01m	0,6m	1,0m	3,3m	10m	30m	150			Macro	Micro
0,1	0,476	0,293	0,229	0,203	0,181	0,167	0,160	$5,04 \cdot 10^{-6}$	1,39	15,74	27,99
0,3	0,454	0,318	0,258	0,240	0,218	0,204	0,192	$2,53 \cdot 10^{-6}$	1,45	12,41	30,73
0,5	0,445	0,306	0,261	0,234	0,218	0,190	0,171	$2,61 \cdot 10^{-6}$	1,47	11,34	28,16
0,7	0,427	0,345	0,287	0,262	0,255	0,224	0,213	$2,71 \cdot 10^{-6}$	1,52	7,58	31,04

Prof. – Profundidade (m); Ks – Condutividade Hidráulica do solo Saturado; Dens.- Densidade do Solo.

O método de irrigação utilizado na área foi a microaspersão, utilizando-se microaspersores com raio de ação de 3,5 m, os quais foram espaçados entre si por 2,5 m entre emissores na linha, dispostos na área de forma triangular e a sobrepor seus raios de molhamento resultando em um molhamento total da área de plantio com uma distribuição média de intensidade de aplicação de $5,5 \text{ mm h}^{-1}$. Com esta disposição, por meio de ensaios de distribuição de água obtidos na superfície da área do interior do lisímetro, observou-se com base na metodologia de Christiansen (1942) um valor médio de Coeficiente de Uniformidade de 91,24%.

Para monitorar a umidade no interior do lisímetro, sondas de TDR foram construídas com as seguintes características: três hastes de aço inoxidável de 0,003m de diâmetro com comprimento efetivo de 0,1 m fora da resina e

espaçadas entre si por 0,017 m; cabos coaxiais de 50 ohms; comprimento da camada de resina de poliéster no início das hastes de 0,05 m. A determinação da umidade do solo foi feita, tomando-se como base o ajuste dos valores de constante dielétrica aparente (K_a) obtidos através da TDR em relação ao conteúdo de água obtido por gravimetria (θ), sendo a relação entre as duas variáveis ($K_a \times \theta$) determinada para o solo do experimento apresentada na Figura 2 e equação 1.

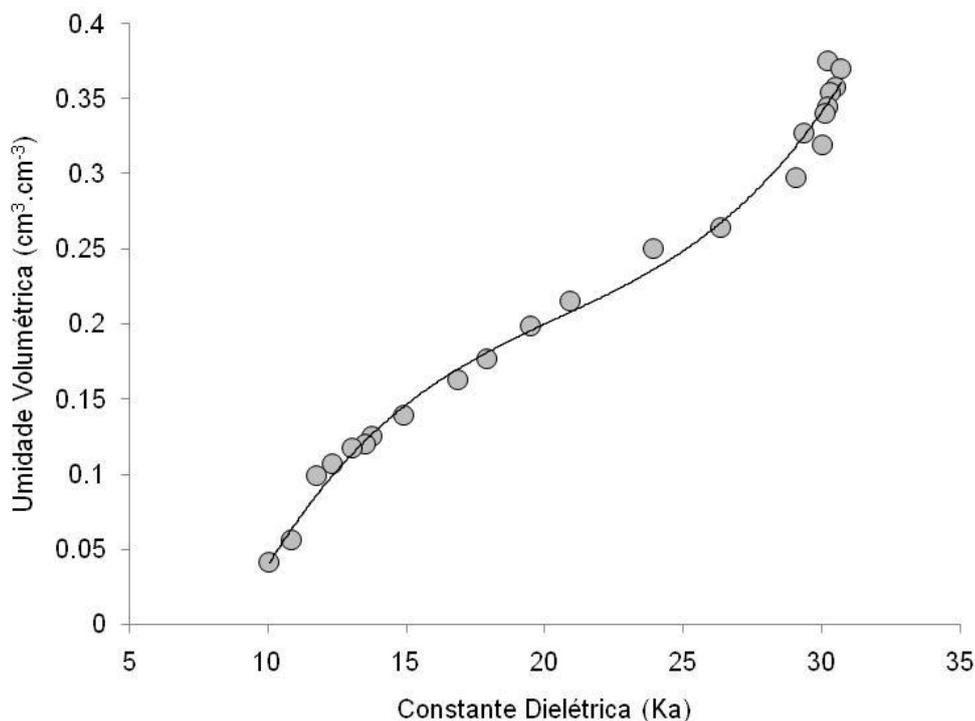


Figura 2. Relação entre umidade volumétrica (θ) e constante dielétrica (K_a) para o solo utilizado no experimento.

$$=0,000065ka^3 - 0,003979ka^2 + 0,090141ka - 0,528860 \quad (1)$$

Instalou-se um sistema de aquisição automática de dados composto por uma TDR 100, Campbell Scientific, um data logger modelo CR1000 e 10 multiplexadores, procedendo-se a uma programação em linguagem *basic* para leitura e armazenamento de valores de K_a através de 72 sondas de TDR instaladas no lisímetro. As leituras foram realizadas em intervalos de 15 minutos.

O manejo da irrigação foi feito com base nos dados de umidade das sondas de TDR coletados, verificando o volume de água necessário para retornar os valores de umidade à capacidade de campo. A frequência de irrigação adotada foi de dois dias.

Setenta e duas sondas de TDR foram distribuídas em quatro perfis no interior do lisímetro: P1, P2, P3 e P4, conforme ilustrado na Figura 3. Fez-se com que P1, P2, P3 e P4 representassem as parcelas experimentais. As parcelas foram divididas em subparcelas, quais sejam: Posições de monitoramento em relação à Distância da planta (R_i) e Profundidade do solo (Z_i), formando-se assim um experimento em parcelas subdivididas. As diferentes posições de monitoramento R foram as seguintes: 0,3 m; 0,5 m; 0,7 m; 0,9 m; 1,1 m e Z: 0,1 m; 0,3 m; 0,5 m e 0,7 m. Para dois dos quatro perfis, os valores da última posição $R=1,1\text{m}$ foram obtidos através do processo de Krigagem utilizando os dados obtidos até a distância $R=0,9\text{ m}$.

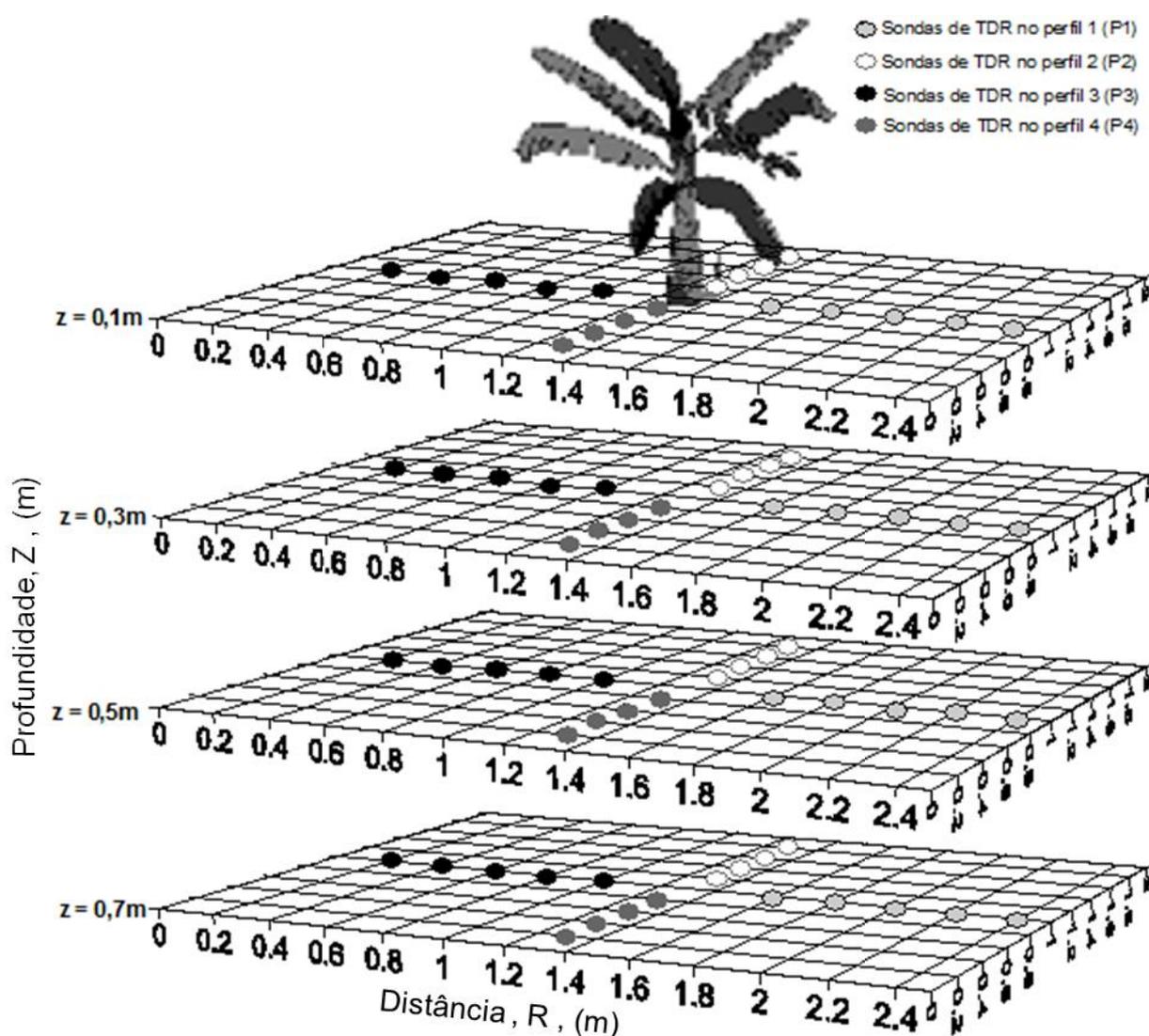


Figura 3. Distribuição das sondas de TDR no interior do lisímetro.

As repetições foram representadas pelos eventos de irrigação, utilizando-se dados de seis eventos de irrigação em cada fase de desenvolvimento da planta. Parte do estudo consistiu em testar as seguintes hipóteses:

H₀: a percentagem de extração de água da zona radicular da bananeira nas diferentes posições de monitoramento em relação ao total de cada perfil é igual para os quatro perfis monitorados.

H₁: a percentagem de extração de água da zona radicular da bananeira nas diferentes posições de monitoramento em relação ao total de cada perfil é diferente em pelo menos um dos perfis monitorados.

As fases de desenvolvimento da bananeira foram estabelecidas do seguinte modo: Inicial: 23/03 a 22/05/2012 - 92 a 152 Dias após o Transplântio DAT; Crescimento vegetativo: 23/05 a 01/09/2012 – 153 a 254 DAP; Floração: 02/09/2012 à 02/10/2012 – 255 a 285 DAP (Emissão da inflorescência ocorreu no dia 06/09/2012) e crescimento dos Frutos: 03/10/2012 a 06/01/2013. 286 a 381 DAP (Colheita do cacho ocorreu em 06/01/2013).

A caracterização biométrica da bananeira no início das diferentes fases de desenvolvimento durante o primeiro ciclo de produção foi a exposta na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização biométrica da bananeira no início das diferentes fases de desenvolvimento.

Fase da Planta	Altura (m)	Diâmetro do pseudo-caule (m)	Área Foliar (m ²)
Inicial	0,66	0,065	1,84
Crescimento Vegetativo	1,1	0,11	3,97
Floração	2,48	0,248	8,39
Crescimento dos Frutos	2,49	0,254	8,95



Figura 4. Lisímetro selecionado para procedimentos de coleta de dados.

A extração de água (EA) da zona radicular da bananeira foram quantificadas pela equação 2 aplicada a uma região de interesse no perfil (R_i, Z_i):

$$EA = \frac{\sum_{i=1}^5 \left(\int_0^{L_i} \theta_{t+1} dz - \int_0^{L_i} \theta_{t2} dz \right)}{i} \quad (2)$$

em que: EA é o valor da extração de água do solo em uma região de interesse no perfil (R_i, Z_i) – $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; θ_{t+1} é o valor de umidade 8 h após o início da irrigação em um ponto de monitoramento (r_i, z_i); θ_{t2} é o valor de umidade imediatamente antes da irrigação subsequente em um ponto de monitoramento (r_i, z_i) e R_i e Z_i são os limites de distância e profundidade.

Para cada ponto de monitoramento determinou-se as percentagens de água disponível no solo, tomando como base os valores de umidade referentes à capacidade de campo e ponto de murcha permanente, empregando-se a equação 3:

$$AD_{(R_i, Z_i)} = \left(\frac{(R_i, Z_i) - pmp}{cc - pmp} \right) \quad (3)$$

em que $AD_{(R_i,Z_i)}$ é a percentagem de água disponível em um ponto (R_i,Z_i) do perfil do solo; $\theta_{(R_i,Z_i)}$ é a umidade volumétrica em um ponto (R_i,Z_i) do perfil do solo ($m^3 m^{-3}$); θ_{pmp} é a umidade referente ao ponto de murcha permanente e θ_{cc} é a umidade referente a capacidade de campo.

A variabilidade da extração de água da zona radicular da bananeira obtida em função das diferentes posições de monitoramento de umidade e do tempo foram classificadas com base nos valores de coeficiente de variação, seguindo os critérios propostos por Warrick & Nielsen (1980) em que se considera a variabilidade como baixa quando o $CV < 12\%$, média quando $12\% < CV < 60\%$ e alta quando $CV \geq 60\%$.

Em cada fase de desenvolvimento da planta, procedeu-se a uma análise descritiva dos dados de extração de água do solo com base nos valores da média, coeficiente de variação, assimetria e curtose calculados para quatro perfis e seis eventos de irrigação.

Verificou-se a normalidade dos dados percentuais obtidos em cada posição de monitoramento em relação ao total de água extraído do perfil nos quatro diferentes perfis com base na metodologia proposta por Jones (1969) com um grau de confiança de 95%. Para verificar se ocorre diferenças entre os valores dos percentuais de extração de água nos diferentes pontos de monitoramento dos perfis utilizou-se do teste de Kruskal-Wallis para os casos em que o conjunto de valores obtidos não seguiram distribuição normal e do teste F (Fisher) para os casos em que os dados seguiram distribuição normal.

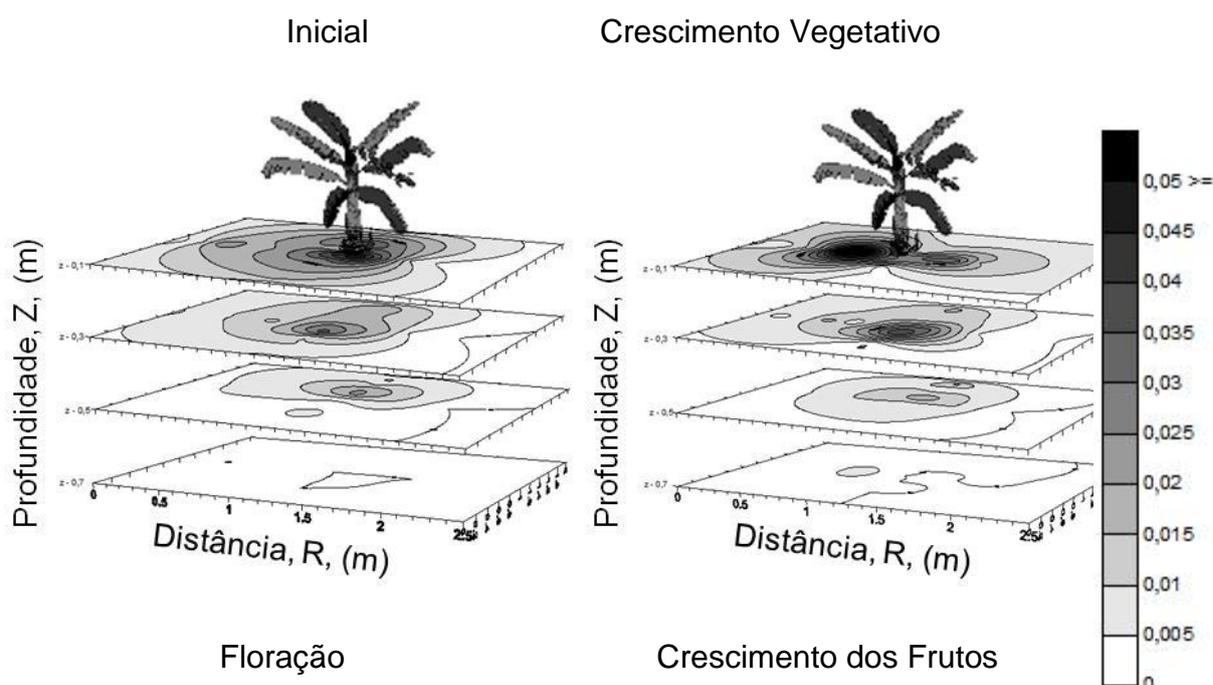
Resultados e Discussão

Distribuição da extração de água na região radicular da bananeira

Na Figura 5 nota-se distinção na distribuição de extração de água do perfil com a mudança da fase de desenvolvimento da bananeira. Ocorre predominância de maior extração a partir da floração, sobretudo nas duas camadas superiores ($z=0,1$ m e $z=0,3$ m) indicando aumento da intensidade de extração de água pela planta a partir desta fase. Na fase inicial de crescimento da planta obteve-se valores médios diários de extração de água variando de $5,3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,0167 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na camada mais superficial do solo $z=0,1$ m (média obtida com os

valores de todas as distâncias radiais). Para esta mesma camada, nas fases de crescimento vegetativo, floração e crescimento de frutos encontrou-se valores médios diários de extração de água variando de $8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,0241 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $0,0152 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,0355 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,0086$ a $0,0331 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente.

Apesar do aumento com o tempo dos valores de depleção dos teores de água na primeira camada a partir da floração, a fração do percentual do total de água extraído no perfil em $z=0,1$ m em relação às outras camadas monitoradas não aumentou, indicando aumento da atividade do sistema radicular também em profundidade na floração. A percentagem de saída de água observada na camada $z=0,1$ m em relação ao total quantificado no perfil foi de 50,83%, 68,12%, 40,34% e 38,28% nas fases inicial, crescimento vegetativo, floração e crescimento de frutos, respectivamente.



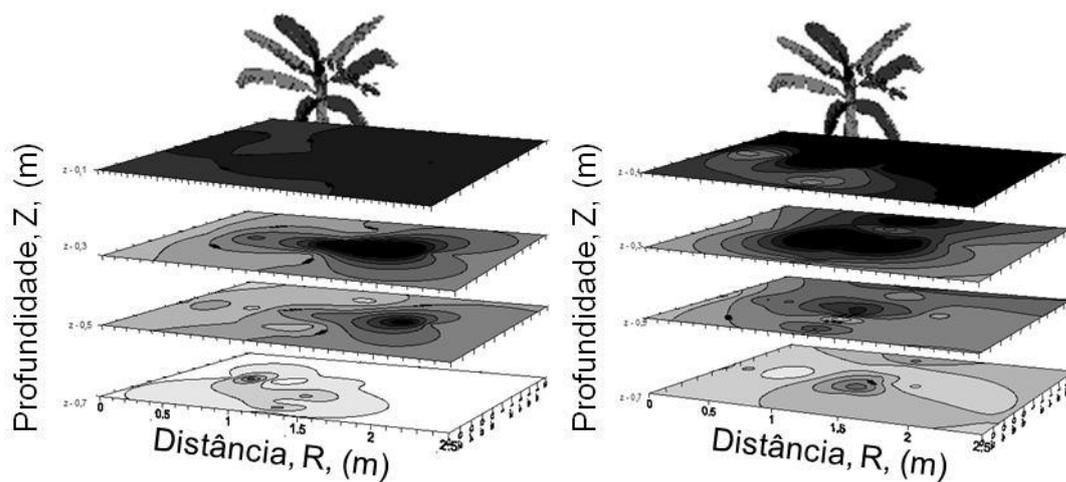
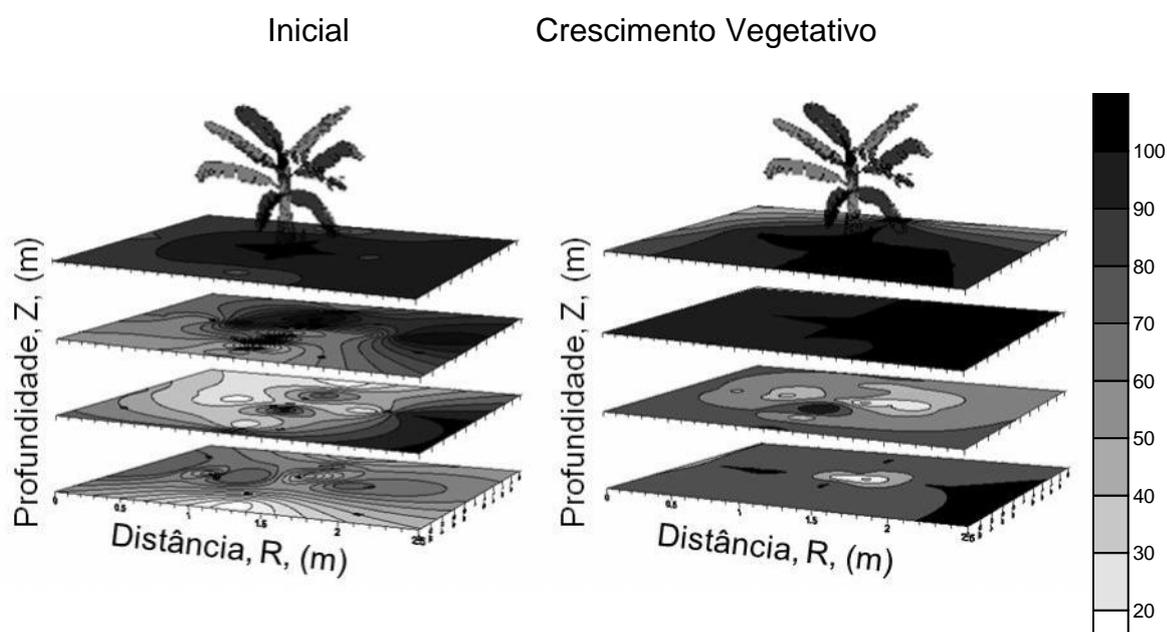


Figura 5. Distribuição tri-dimensional da extração de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) da zona radicular da bananeira irrigada em diferentes fases de desenvolvimento.

Os valores apresentados na Figura 4 são médias obtidas nos mesmos eventos de irrigações em que se calcularam os valores de extração de água apresentados na Figura 5. Verifica-se que os valores distribuídos na camada mais superficial encontram-se sempre próximos a 100%, indicando adequação do manejo da irrigação com base na variação de armazenamento de água na região das raízes da bananeira, devido à reposição de água no solo ser calculada em função da integração do volume de água necessário para retornar a umidade do solo à capacidade de campo em cada ponto de monitoramento com TDR.



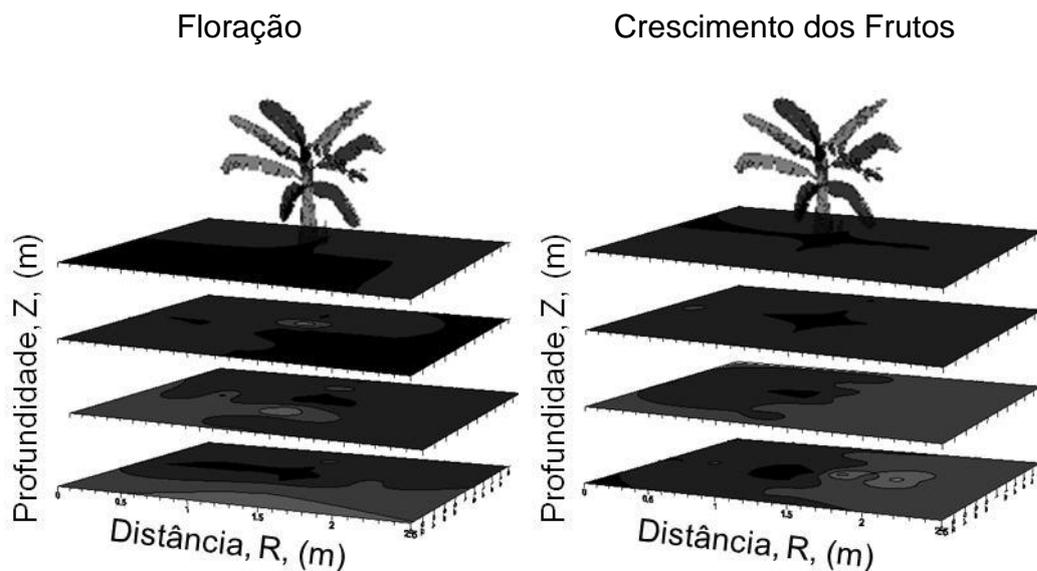


Figura 6. Distribuição dos valores do conteúdo de água disponível no solo (%) no interior do lisímetro 8 h após a irrigação para as diferentes fases de desenvolvimento da bananeira.

Com relação à variabilidade dos teores de água disponível obtidos após as irrigações no interior do lisímetro, tomando como base os valores de coeficiente de variação obtidos para os valores que geraram a Figura 6 pode-se considerar como baixa a variabilidade na distribuição de água no solo na camada $z=0,1$ m obtida nas irrigações em todas as fases de desenvolvimento da planta (Tabela 3). No entanto, para esta mesma camada a variabilidade dos valores de extração de água obtidos para os valores que geraram a Figura 5 foram classificados como de médio a alto. Indicando que, mesmo com baixa variabilidade na distribuição de água no solo a variabilidade na extração de água pela planta é alta.

Tabela 3. Valores de coeficiente de variação (%) para a distribuição da extração de água (E.A) e água disponível (A.D) radialmente a cultura da bananeira em diferentes profundidades (z).

Z (m)	Inicial		Crescimento		Floração		Cresc. Frutos	
	E.A	A.D	E.A	A.D	E.A	A.D	E.A	A.D
Coeficiente de Variação (%)								
0,1	64,63	11,93	98,49	3,81	57,19	2,34	38,90	1,29
0,3	65,08	34,03	89,71	2,40	70,30	7,33	45,51	4,18
0,5	82,02	49,25	80,57	20,70	70,79	10,19	30,75	7,55
0,7	172,68	47,01	217,52	10,79	110,24	9,91	44,65	12,07

A Figura 7 mostra que não houve uma relação bem definida entre a variabilidade espacial da distribuição de água disponível e extração de água na região do solo explorada pelas raízes da planta. Na tentativa de explicar as causas de variação da extração de água no solo pelas plantas, tem-se na literatura distintas hipóteses. Por exemplo, Atkinson (1981) afirma que a distribuição de raízes finas reflete o potencial de atividade de extração de água de uma cultura. Já Nnyamah and Black (1977) declaram que o padrão de extração de água pela planta é semelhante a distribuição de raízes finas quando a água no solo não é limitante. Por outro lado, Green e Clothier (1995) em análise da extração de água em cultivo de kiwi perceberam que a extração de água pelas raízes são mais dependentes da disponibilidade de água no solo que da distribuição de raízes finas. Há ainda outros estudos que indicam que o diâmetro de raízes laterais também é um fator altamente variável no solo (Yorke & Sagar, 1970; Cahn et al ., 1989; Varney et al ., 1991; Jordan et al ., 1993; Thaler & Pagès, 1996); e Lecompte et al. (2005) revelam que esta variabilidade é consequência de fatores como heterogeneidade do solo, estrutura do sistema radicular, disponibilidade e partição de carbono nas raízes, sendo que a contribuição relativa de cada um destes determinantes permanecem largamente desconhecida. Outros fatores têm sido demonstrados como que influenciam a extração de água pelas raízes das plantas, tais como diferenças na maturação do xilema e no número e diâmetro dos vasos do xilema bem como diferenças na formação da endoderme e exoderme com o desenvolvimento das raízes (Steudle & Frensch, 1996; Barrowclough et al., 2000; Watt et al., 2008; Draye et al., 2010)..

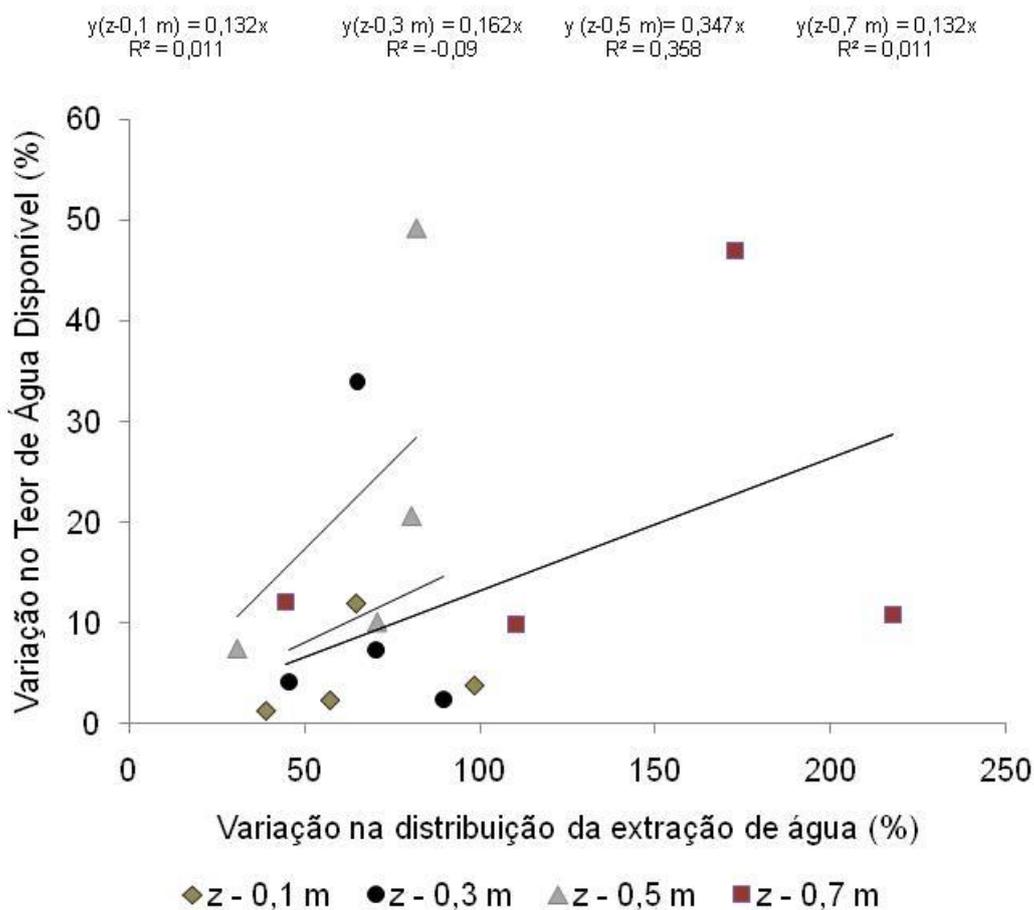


Figura 7. Relação entre a variabilidade da distribuição dos teores de água disponível e depleção de água após a irrigação em camadas da região do sistema radicular da bananeira.

Distribuição percentual do total de água extraído em camadas no perfil do solo

Apresenta-se na Tabela 4 o resultado da estatística descritiva para os valores percentuais de extração de água na região do solo explorado pelas raízes da bananeira quantificados nas diferentes posições de monitoramento para seis eventos de irrigação realizados em cada fase de desenvolvimento da planta. Os dados foram utilizados para verificação da hipótese de que a distribuição percentual da extração de água obtida em um perfil é equivalente à obtida em quatro perfis. Os valores de coeficiente de variação indicam que a variabilidade dos valores percentuais de extração de água nas camadas em relação ao espaço e ao tempo não é igual para todas as posições de monitoramento, variando entre

média e alta a classificação obtida segundo os critérios de Warrick & Nielsen (1980) (Tabela 4).

Seguindo os critérios proposto por Jones (1969) para aceitar a hipótese de que uma amostra com 24 valores segue distribuição normal (4 perfis x 6 irrigações) os valores limites de assimetria (G_1) e curtose (G_2) para o conjunto de dados de percentagem de extração de água obtidos no interior do lisímetro em cada posição de monitoramento (R_n, Z_n) é $-0,96$ G_1 $0,96$ e $-1,20$ G_2 $2,32$ ($n=24$). Portanto, com base nos valores obtidos verifica-se que nem todos os conjuntos de valores percentuais de extração de água obtidos nas distâncias da planta (R) e nas profundidades (Z) seguem distribuição normal. A fase de enchimento de frutos foi a única fase em que se obteve normalidade na distribuição dos dados de percentual de extração de água no solo para todas as posições de monitoramento, tanto em R como em Z. Já a hipótese de que a distribuição percentual da quantidade de água extraída pela bananeira nos diferentes pontos de monitoramento em R e Z é igual para os quatro perfis monitorados foi rejeitada apenas ao se comparar as médias obtidas nas diferentes profundidades na fase de crescimento vegetativo (Tabela 5) o que pode ser explicado devido à maior taxa de crescimento de raízes da bananeira nesta fase. Pois, de acordo com Belalcázar et al. (2003) aproximadamente 62% do crescimento das raízes da bananeira no primeiro ciclo de produção ocorre do sexto ao décimo mês após o plantio. Segundo Draye et al (2003) diversos estudos apontam a interrupção da formação do sistema radicular da bananeira a partir dos 15 dias até 75-90 dias após o plantio e que após a retomada a bananeira cessa o desenvolvimento de raízes na fase de floração.

Nas demais fases de desenvolvimento da planta verificou-se por meio dos resultados do teste F (Fischer) e de Kruskal-Wallis, ambos com um grau de confiança de 95%, que a distribuição percentual da extração de água no solo nas diferentes distâncias (R) e profundidades (Z) são equivalentes.

Tabela 4. Estatística descritiva para as percentagens de extração de água na região explorada pelas raízes da bananeira em cada posição de monitoramento no solo (%) relativas a quatro perfis e a seis eventos de irrigação em cada fase de desenvolvimento da bananeira.

R (m)	\bar{x} total ($\pm s$)	C.V (%)	G ₁	G ₂	Z (m)	\bar{x} total ($\pm s$)	C.V (%)	G ₁	G ₂
Fase Inicial									
0.3	33,05 ($\pm 16,97$)	51,35	0,42	-1,30	0.1	50,83* ($\pm 15,03$)	29,56	0,93	0,88
0.5	27,69 ($\pm 13,70$)	50,05	1,18	3,36	0.3	32,67* ($\pm 11,52$)	35,28	-0,24	1,84
0.7	24,22 ($\pm 9,35$)	38,17	1,60	2,60	0.5	14,37* ($\pm 10,59$)	73,74	0,38	-0,75
0.9	12,52 ($\pm 9,56$)	75,10	1,92	3,19	0.7	2,11 ($\pm 4,47$)	212,21	2,93	9,65
1.1	4,54 ($\pm 8,70$)	191,58	2,30	3,87					
Crescimento Vegetativo									
0.3	30,69* ($\pm 6,18$)	20,14	0,34	-1,05	0.1	68,12* ($\pm 13,50$)	19,81	-0,92	1,62
0.5	26,49* ($\pm 5,19$)	19,61	0,26	-0,82	0.3	14,35* ($\pm 8,04$)	56,00	0,52	-0,66
0.7	21,60* ($\pm 6,29$)	29,14	-0,82	-0,33	0.5	13,49* ($\pm 7,13$)	52,87	0,91	0,43
0.9	11,69 ($\pm 5,84$)	46,07	1,68	4,21	0.7	4,02* ($\pm 4,03$)	100,35	0,43	-1,13
1.1	9,52 ($\pm 5,02$)	52,74	2,04	4,77					
Floração									
0.3	25,06* ($\pm 7,35$)	29,33	0,27	-1,08	0.1	40,34* ($\pm 9,65$)	23,63	0,82	2,23
0.5	25,44* ($\pm 5,78$)	22,74	0,90	-0,38	0.3	32,38* ($\pm 6,17$)	20,03	-0,39	-0,99
0.7	15,80* ($\pm 4,86$)	30,80	0,25	-0,09	0.5	17,90* ($\pm 5,37$)	28,29	-0,27	-0,20
0.9	19,25 ($\pm 6,77$)	35,18	-0,19	-1,24	0.7	9,44* ($\pm 8,06$)	86,61	0,42	-1,16
1.1	14,43 ($\pm 4,72$)	32,76	0,18	-1,63					
Crescimento dos Frutos									
0.3	29,65* ($\pm 12,10$)	40,81	-0,05	-1,13	0.1	38,28* ($\pm 18,82$)	49,16	0,72	0,36
0.5	17,23* ($\pm 5,37$)	31,18	0,25	-1,10	0.3	31,20* ($\pm 4,84$)	15,51	0,94	-0,29
0.7	19,37* ($\pm 5,54$)	28,61	0,46	-0,45	0.5	20,77* ($\pm 6,55$)	31,54	-0,24	0,46
0.9	16,42* ($\pm 5,17$)	31,53	0,64	-0,29	0.7	10,98* ($\pm 6,30$)	57,37	0,87	1,70
1.1	17,30* ($\pm 6,48$)	37,49	0,03	-0,50					

*segue distribuição normal (Jones, 1969); R- Distância da planta; Z – profundidade; C.V- Coeficiente de variação; G₁- Assimetria; G₂- Curtose;

Tabela 5. Médias dos valores percentuais de extração de água no solo obtidos em diferentes posições de monitoramento de quatro perfis na região do sistema radicular da bananeira.

R (m)	\bar{x}_{P1}	\bar{x}_{P2}	\bar{x}_{P3}	\bar{x}_{P4}	Z (m)	\bar{x}_{P1}	\bar{x}_{P2}	\bar{x}_{P3}	\bar{x}_{P4}
Fase Inicial									
0.3	37,83	27,59	40,05	28,04	0.1	57,51	50,05	48,90	46,87
0.5	30,14	24,96	21,34	34,30	0.3	31,39	30,95	38,74	29,59
0.7	22,36	28,75	20,33	25,43	0.5	10,56	13,14	11,39	22,36
0.9	7,29	14,66	12,57	15,55	0.7	0,48	5,84	0,95	1,15
1.1	2,33	5,51	5,69	4,64					
Crescimento Vegetativo									
0.3	30,35	24,77	34,79	32,85	0.1	80,48b	68,23ab	73,37b	50,39a
0.5	28,21	24,77	27,36	25,60	0.3	12,98	13,35	8,15	22,94
0.7	25,19	26,51	19,20	15,49	0.5	6,47a	11,22ab	14,72ab	21,55b
0.9	8,42	14,36	11,01	12,97	0.7	0,04	7,18	3,75	5,10
1.1	7,80	9,58	7,62	13,06					
Floração									
0.3	21,23	22,92	28,64	27,44	0.1	39,14	32,71	40,76	48,76
0.5	25,13	30,02	24,01	22,58	0.3	36,32	33,42	29,68	30,11
0.7	15,67	18,81	14,35	14,39	0.5	20,62	19,80	15,80	15,39
0.9	26,59	14,29	18,21	17,91	0.7	3,90	14,05	14,07	5,72
1.1	11,36	13,92	14,77	17,65					
Crescimento dos Frutos									
0.3	35,52	32,28	30,73	20,08	0.1	40,88	37,33	28,29	46,62
0.5	15,84	19,55	19,25	14,28	0.3	29,51	30,45	36,50	28,34
0.7	20,97	17,40	18,05	21,07	0.5	19,39	23,00	19,22	21,44
0.9	13,89	14,82	16,70	20,27	0.7	10,19	9,20	13,47	11,07
1.1	13,76	15,92	15,24	24,28					

Recomendação da região efetiva de extração de água da região radicular da bananeira

Apesar da evidente distinção na intensidade de extração de água pela bananeira nas camadas ao longo do tempo, resultante do processo de desenvolvimento e conseqüente aumento da demanda de água pela planta, verificou-se que a distribuição percentual do total extraído no perfil não varia tanto quanto a intensidade de extração de água ao longo do tempo. Na fase inicial de crescimento da bananeira, do total de água extraído no perfil, 83,50% ocorre até a profundidade $z = 0,3$ m. Na fase de crescimento vegetativo, 82,47% do total de água extraído ocorre até a camada $z = 0,3$ m. Na floração e crescimento dos frutos, tem-se que 72,72% e 69,48% da extração total de água da bananeira situa-se até 0,4 m. Considerando a região de maior intensidade de saída de água da região radicular da bananeira como sendo aquela em que se obtém 80% do total de água extraído nas dimensões laterais e em profundidade, fez-se uma recomendação de região adequada para realização do manejo de água e

nutrientes da planta com base na orientação das distâncias e profundidades máximas em que se deve proceder a localização do sensor de umidade e aplicação de fertilizantes ou pesticidas (Tabela 6). Silva et al. (2012) determinaram a profundidade e distância efetiva de extração de água pela bananeira em fase de produção no mesmo local de realização do presente estudo e verificaram que em relação a distância ocorre efetiva atividade de extração de água até a distância 0,7 m, 0,8 m e 1 m, quando a bananeira é irrigada com um microaspersor de 32 L h⁻¹ para quatro plantas, um microaspersor de 60L h⁻¹ para quatro plantas e um microaspersor de 60 L h⁻¹ para duas plantas, respectivamente. Para todos os sistemas, a profundidade efetiva teve seu limite em 0,25 m.

Coelho et al. (2010) estudaram também nas mesmas condições do presente estudo as regiões efetivas de extração de água da bananeira irrigada por dois emissores de 4 L h⁻¹ por planta em uma lateral por fileira de plantas; quatro emissores de 4 L h⁻¹ por planta em uma lateral por fileira de plantas e cinco emissores de 4 L h⁻¹ por planta em faixa contínua com uma lateral por fileira; pelos resultados obtidos, os autores verificaram que as regiões de maior atividade do sistema radicular são as limitadas pelas distâncias e profundidades de 0,2 m e 0,4 m; 0,5 m e 0,35 m; 0,55 m e 0,35 m, respectivamente.

Tabela 6. Limites de distância e profundidade máxima da atividade efetiva de extração de água pela bananeira em diferentes fases de desenvolvimento.

Fase de desenvolvimento	Distância máxima do pseudocaule (m)	Profundidade máxima (m)
Inicial	0,7	0,3
Crescimento vegetativo	0,7	0,3
Floração	0,9	0,4
Crescimento de Frutos	0,9	0,4

Conclusões

A variabilidade da extração de água da região explorada pelas raízes da bananeira em função do tempo e do espaço não é igual para todas as camadas de solo e varia entre média a alta;

Com exceção do verificado na fase de crescimento vegetativo da bananeira em que se encontraram diferenças entre a distribuição percentual da extração de

água no solo nas camadas dos diferentes perfis, para as demais fases de desenvolvimento da planta a partição da extração de água no perfil do solo em percentual foi igual para os quatro perfis monitorados;

A região indicada como a de maior atividade do sistema radicular da bananeira é a delimitada pela distância de 0,7 m e profundidade de 0,3 m nas fases de desenvolvimento inicial e crescimento vegetativo e 0,9 m e 0,4 m nas fases de floração e crescimento de frutos.

Referências Bibliográficas

AKINRO, A.O.; OLUFAYO, A.A.; OGUNTUNDE, P.G. Crop Water Productivity of Plantain (*Musa Sp*) in a Humid Tropical Environment. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. vol. 5, n.1, p. 19-25, 2012.

ANDREU, L.; HOPMANS, J.W.; SCHWANKL, L.J. Spatial and temporal distribution of soil waterbalance for a drip-irrigated almond tree. *Agricultural Water Management*. vol. 35, p. 123-146, 1997.

ATKINSON, D. The distribution and effectiveness of the roots of tree crops. *Horticultural Reviews*. vol. 2, p. 424-490, 1981.

BARROWCLOUGH, D.E.; PETERSON C.A.; STEUDLE, E. Radial hydraulic conductivity along developing onion roots. *Journal of Experimental Botany*. vol. 51, p.547–557, 2000.

BELALCÁZAR, S.; ROSALES, F.E.; POCASANGRE, L.E. Development and formation of plantain roots (*Musa AAB Simmonds*). In: *Banana Root System: towards a better understanding for its productive management*. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, p.3-5, 2003.

BEUGNON M. & J. CHAMPION. 1966. Etude sur les racines du bananier. *Fruits* 21:309-327

CAHN M.D.; ZOBEL R.W.; BOULDIN D.R. Relationship between root elongation rate and diameter and duration of growth of lateral roots of maize. *Plant and Soil*. vol.119, p.271–279, 1989.

CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by Sprinkling. Berkley: University of California, 1942. 124 p.

CLOTHIER B. E., GREEN S. R. Rootzone Processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management*. vol. 25, p. 1-12, 1994.

CLOTHIER, B.E., GREEN, S.R., 1994. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agric. Water Manage.* 25, 1-12.

CLOTHIER, B.E., SMETTEM, K.R.J., RAHARDJO, P., 1990. Sprinkler irrigation, roots and the uptake of water. In: *Field-scale water and solute flux in soils*. Monte Verita. Birkhauser Verlag Basel, pp. 101-108.

COELHO, E. F.; SANTOS, D. B. dos and AZEVEDO, C. A. V. de. Sensor placement for soil water monitoring in lemon irrigated by micro sprinkler. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* vol.11, n.1, pp. 46-52, 2007.

COELHO, E.F.; Or, D.; A parametric Model for Two-Dimensional Water Uptake Intensity by Corn Roots under Drip Irrigation. *Soil Science Society America Journal*, vol.60, p.1039-1049, 1996.

COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; MIRANDA, J.H. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. *Engenharia Agrícola*. vol.30, n.4. 2010.

COUVREUR, V.; VANDERBORGHT, J.; JAVAUX, M. A simple three-dimensional macroscopic root water uptake model based on the hydraulic architecture approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol.16, p.2957–2971, 2012.

DING, Z.; WEN, Z.; WU, R.; LI, Z.; ZHU, J.; LI, W.; JIAN, M. Surface energy balance measurements over a banana plantation in South China. *Theoretical Applied Climatology*. DOI 10.1007/s00704-013-0849-5

DRAYE X, KIM Y, LOBET G, JAVAUX M. 2010. Model-assisted integration of physiological and environmental constraints affecting the dynamic and spatial patterns of root water uptake from soils. *Journal of Experimental Botany* 61: 2145–2155.

DRAYE, X.; LECOMPTE, F.;PAGÈS, L. Distribution of banana roots in time and space: new tools for an old science. In: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November, 2003

DUURSMA R.A.; BARTON, C.V.M.; EAMUS, D.; MEDLYN, B.E.; ELLSWRTH, D.S.; FORSTER, M.A.; TISSUE, D.T.; LINDER, S.; MCMURTRIE, R.S.; Rooting depth explains [CO₂]×drought interaction in *Eucalyptus saligna*. Tree Physiol. vol.31, n.9, p.922-931 , 2011

GARDNER, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Science. vol.89, p.63–73, 1960.

GARDNER, W.R. Relation of root distribution to water uptake and availability. Agronomy Journal. vol.56, p.41–45, 1964.

GOUSSELAND J. 1983. Etude de l'énracinement et de l'emission racinaire du bananier 'Giant Cavendish'(Musa acuminata AAA, sous-groupe Cavendish) dans les andosols de la Guadeloupe. Fruits 38:611-623.

GREEN, S.R.; CLOTHIER, B.E. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. Plant and Soil. v. 173, p.317-328, 1995.

GREEN, S.R.; KIRKHAM, M.B.; CLOTHIER, B. E. Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigation. Agricultural Water Management. vol.86, p.165 – 176, 2006.

GUOHUA,L.; KANG, Y.; LI, L.; WAN, S.; Effect of irrigation methods on root development and profile soil water uptake in winter wheat. Irrigation Science, vol.28, p.387-398, 2010.

JAVAUX, M.; SCHRODER, T.; VANDERBORGHT, J.; VEREECKEN, H. Use of a Three-Dimensional Detailed Modeling Approach for Predicting Root Water Uptake. Vadose Zone Journal. vol. 7, n. 3, p. 1079-1088, 2008.

JONES, T. A. Skewness and kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. Journal Sedimentary Petrology, Northeast Georgia, v.39, p.1622-1627, December, 1969.

JONG VAN LIER, Q.; VAN DAM, J.C.; METSELAAR, K, de JONG R, DUIJNISVELD WHM. Macroscopic root water uptake distribution using a matrix flux potential approach. *Vadose Zone Journal*. vol. 7, p.1065–1078, 2008.

JORDAN, M.O.; HARADA, J.; BRUCHOU, C.; YAMAZAKI, K. Maize nodal root ramification: absence of dormant primordia, root classification using histological parameters and consequences on sap conduction. *Plant and Soil*. vol. 153, p. 125–143, 1993.

KOUMANOV, K. S.; HOPMANS, J.W.; SCHWANKL, L.W.; Spatial and temporal distribution of root water uptake of an almond tree under microsprinkler irrigation. *Irrigation Science*. vol.24, p.267 – 278, 2006.

LAMOND, M.; TAVAKOL, R.; RIEDACKER, A. 1983. Influence d'un blocage de l'extrémité du pivot d'un semis de chêne, sur la morphogénèse de son système racinaire. *Annales des Sciences Forestières* 40: 227–250.

LECOMPTE, F.; PAGÈS, L.; LAFONTAINE, H. O.; Patterns of variability in the diameter of lateral roots in the banana root system. *New Phytologist*. vol. 167, p.841-850, 2005.

LUCAS, A. A. T.; FRIZZONE, J. A.; COELHO FILHO, M. A. Características da distribuição radicular de maracujazeiro sob fertirrigação. *Irriga*. v. 17, n.2, p.245-250, 2012.

MARQUELLI, W.A.; CARRIJO, O.A.; ZOLNIER, S. Variabilidade espacial do sistema radicular do tomateiro e implicações no manejo da irrigação em cultivo sem solo com substratos. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.23, n.1, p.57-60, jan.-mar. 2005.

MOLZ, F.J.; REMSON, I. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resources Research*. vol. 6, p.1346–1356, 1970.

MORADI, A.B.; CARMINATI, A.; VETTERLEIN, D.; VONTOBEI, P.; LEHMANN, E.; WELLER, U.; HOPMANS, J.W.; VOGEL, H.J.; OSWALD, S.E. Three-dimensional visualization and quantification of water content in the rhizosphere. *New Phytologist*. vol.192, p.653-663. 2011.

NEALE, C. M.U.; GELI, H. M. E.; KUSTAS, W.P.; JOSEPH, G. A.; GOWDA.; EVETT, S. R.; PRUEGER, J. H.; HIPPS, L. E.; HOWELL, T.A. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. *Advances in Water Resources*. vol.50, p. 152-161, 2012.

NIMAH, M.N., HANKS, R.J., Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37, 522–527, 1973.

NIMAH, M.N.; HANKS, R.J. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Science Society of America*. Vol.37, p.522–527, 1973.

NNYAMA, J.U.; BLACK, T.A. Rates and patterns of water uptake in a Douglas fir forest. *Soil Science Society of America*. vol.41, p.972-979, 1977.

PHILIP, J.R. The physical principles of soil water movement during the irrigation cycle. In: *Proceedings of the Third Congress on International Comm. Irrigation Drainage*. R.7, Question 8. pp. 8:125–8:154. 1957.

RATKE, Rafael Felipe et al. Desenvolvimento e produção de bananeiras Thap Maeo e Prata-Anã com diferentes níveis de adubação nitrogenada e potássica. *Revista Brasileira de Fruticultura*. vol.34, n.1, p. 277-288, 2012.

RAZA, A.; FRIEDEL, J.K.; MOGHADDAM, A.; ARDAKANI, M. R.; LOISKANDL, W.; HIMMELBAUER, M.; BODNER, G. Modeling growth of different lucerne cultivars and their effect on soil water dynamics. *Agricultural Water Management*. Vol. 119, p. 100-110, 2013.

SANT'ANA, J. A. V.; COELHO, E. F.; FARIA, M. A.; SILVA, E. L.; DONATO, S. L. R. Distribuição de raízes de bananeira 'Prata-Anã' no segundo ciclo de produção sob três sistemas de irrigação. *Revista Brasileira de Fruticultura*. v. 34, p.124-133, 2012.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. de and WORKMAN, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. vol.44, n.7. 2009.

SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. Sensor placement for irrigation scheduling in banana using micro-sprinkler system. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 1, p. 15-23, 2012.

SOKALSKA, D. I.; HAMAN, D.Z.; SZEWCZUK, A.; SOBOTA, J.; DEREN, D. Spatial root distribution of mature Apple trees under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*. vol. 96, p. 917-924, 2009.

STEUDLE, E.; FRENSCH, J. Water transport in plants: role of the apoplast. *Plant and Soil*. vol.187, p. 67–79, 1996.

THALER, P.; PAGÈS, L. Periodicity in the development of the root system of young rubber trees (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.): relationship with shoot development. *Plant, Cell & Environment*. vol. 19, p. 59–64, 1996.

TUMLINSON, L.G.; LIU, H.Y.; SILK, W.K.; HOPMANS, J.W. Thermal neutron computed tomography of soil water and plant roots. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 72, p.1234–1242, 2008.

TURNER, D. W.; FORTESCUE, J. A.; THOMAS, D. S.; Environmental physiology of the bananas (*Musa* spp.). *Brazilian Journal. Plant Physiology*. vol. 19, n.4, p.463-484, 2007.

van der PLOEG, M.J., H.P.A., GOOREn, G., BAKKER, C.W., HOOGENDAM, C., HUISKES, L.K., KOOPAL, H., KRUIDHOF, and G.H., DE ROOIJ. 2010. Polymer tensiometers with ceramic cones: Direct observations of matric pressures in drying soils. *Hydrology and Earth System Sciences*. vol. 14, p.1787–1799, 2010

VARNEY, G.T.; CANNY, M.J. Rates of water uptake into the mature root system of maize plants. *New Phytologist*. vol.123, p.775–786, 1993.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 350 p.

WATT, M.; MAGEE, L.J.; MCCULLY, M.E. Types, structure and potential for axial water flow in the deepest roots of field-grown cereals. *New Phytologist*. vol. 178, p. 135–146, 2008.

YORKE, J.S.; SAGAR, G.R. Distribution of secondary root growth potential in the root system of *Pisum sativum*. *Canadian Journal of Botany*. vol. 48, p.699–704, 1970.

ZAREBANADKOUKI, M. KIM, Y.X.; MORADI, A.B.; VOGEL, H.J.; KAESTHER, A. CARMINATI, A. Quantification and Modeling of Local Root Water Uptake Using Neutron Radiography and Deuterated Water. *Vadose Zone Journal*. v. 11, n. 3, 2012.

ZOTARELLI, L.; SCHOLBERG, J.M.; DUKES, M.D.; MUNOZ-CARPENA, R.; ICERMAN, J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*. 95, 23-34. 2009.

CAPÍTULO 4

ESTIMAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA BANANEIRA PELO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO EM LISÍMETROS⁴

⁴ Trabalho a ser enviado para periódico a se definir.

Estimação da evapotranspiração da bananeira pelo balanço hídrico no solo em lisímetros

RESUMO - O volume de solo a ser considerado para o cálculo do balanço hídrico é determinado arbitrariamente e este fato leva a incertezas devido ao não controle total da variação do teor de umidade na região explorada pelas raízes de uma cultura. O objetivo deste trabalho foi estimar o consumo hídrico da bananeira cultivada em lisímetro e verificar se ocorrem diferenças na estimativa dos valores de evapotranspiração em função da variação do número de perfis de monitoramento de umidade na região explorada pelas raízes da planta, bem como determinar o número mínimo de baterias de TDR necessário para o cálculo do balanço hídrico na região do solo explorado pelas raízes da bananeira. O experimento foi realizado no campo experimental da Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas – BA. Foram transplantadas mudas micropropagadas de bananeira variedade 'BRS Platina' no dia 23/12/2011 para lisímetros com volume de 5,00 m³, medindo 2,0 m de largura, 2,5 m de comprimento e 1,0 m de profundidade. O balanço hídrico no interior do lisímetro foi calculado em quatro perfis, sendo que em cada perfil formaram-se 5 baterias de monitoramento de umidade com sondas de TDR. Verificou-se não haver diferenças na estimativa dos valores de evapotranspiração da bananeira por meio do balanço hídrico ao se variar o número de perfis de monitoramento de umidade no solo. São necessárias no mínimo 4 baterias de sondas de TDR com 0,7 m de profundidade, distanciadas 0,2 m uma da outra para estimativa da evapotranspiração da bananeira com acurácia próxima a dos lisímetros de drenagem. O consumo médio e total de água da bananeira para o primeiro ciclo de cultivo no recôncavo baiano é 3 mm dia⁻¹ e 1.143 mm ciclo⁻¹. Os valores de kc representativos de cada fase de desenvolvimento da bananeira foram: 0,5 na fase inicial, 0,8 na fase de crescimento vegetativo, 1,1 na floração e 1,03 na fase de crescimento dos frutos.

PALAVRAS CHAVE: lisímetro de drenagem, posicionamento de sensores, manejo da irrigação

Analysis of estimate Evapotranspiration in the Banana plantations by Soil Water Balance

ABSTRACT - The soil volume to be considered for the water balance calculation is determined arbitrarily and this fact leads to uncertainties due to lack of full control of soil moisture in the root system region of the crop. The objective of this study was to estimate the water consumption of banana crop cultivated in lysimeters and to verify that occur differences in the estimation of evapotranspiration by different numbers of soil moisture profile monitoring in the region explored by plant roots and to determine the minimum number of batteries required for soil water balance calculation using TDR. The experiment was conducted on an experimental field of EMBRAPA Cassava and Fruits, Cruz das Almas – BA. In an experimental area were transplanted banana plantlets variety 'Platina. Were transplanted banana plantlets variety 'BRS Platina' on 12/23/2011 for lysimeters with a volume of 5 m³, measuring 2 m wide, 2.5 m long and 1 m depth. The water balance inside the lysimeter was calculated using four profiles, and that each profile consists of five batteries to soil moisture monitoring with TDR. There was no difference in the estimation of banana evapotranspiration through the soil water balance with variation in the number of profiles monitoring soil moisture. It takes at least 4 batteries of TDR probes with 0.7m depth and 0.2m apart from each other to estimate evapotranspiration of banana with accuracy close to that of drainage lysimeters. The total water banana consumption is 1143 mm and the average daily is 3 mm dia⁻¹. Banana Kc values representative of each stage of development were: 0.5 in the initial phase, 0.8 in vegetative growth, 1.1 in flowering and 1.03 in fruit growth.

KEY WORDS: drainage lysimeters, sensors placement, irrigation management

Introdução

O conhecimento da necessidade de água de uma cultura é o principal requisito para execução de uma irrigação eficiente. É ainda essencial para outras aplicações, tais como zoneamento agrícola, drenagem e estudos hidrológicos (Flumignan et al., 2011). Este consumo é representado pela combinação de dois processos separados em que por um lado a água é perdida pela superfície do solo por evaporação e por outro lado pela transpiração das culturas, sendo que juntas estas perdas são expressas como evapotranspiração (ET) (Allen et al. 1998). A determinação de ET em fruteiras continua sendo uma tarefa difícil (Marsal et al., 2012) e vários são os métodos utilizados na determinação do consumo de água da bananeira, tais como os micrometeorológicos (Santos et al. 2009), lisimetria (Santana et al., 1993) e balanço de água no solo (Shongwe et al. 2008). Tanto nos lisímetros de drenagem quanto no balanço de água no solo a ET é calculada diretamente através da medição dos componentes da equação 1 aplicado a um período de tempo (Δt) e volume de solo.

$$ET=P+I-\Delta h-D \quad (1)$$

em que P é a precipitação (mm), I é a irrigação (mm), Δh é a variação do armazenamento de água no solo (mm), D é a drenagem (mm). A depender do local de estudo outras variáveis devem ser consideradas, tais como o deflúvio superficial e sub-superficial de entrada e/ou saída, bem como a ascensão capilar.

Para resolver a equação 1 pelo método do balanço de água do solo normalmente busca-se monitorar as variações que ocorrem no conteúdo de água em vários pontos de um volume de solo utilizando-se de instrumentos do tipo tensiômetro, reflectometria no domínio do tempo (TDR), reflectometria no domínio da frequência (FDR) e sondas de nêutrons. Entretanto, o volume de solo a ser considerado para o cálculo do balanço hídrico é determinado arbitrariamente (Hillel, 2004). Este fato pode levar a incertezas devido ao não controle total da variação de umidade na região explorada pelas raízes de uma cultura. Como se pode observar no Quadro 1, existe uma grande variação no número de pontos utilizados para monitorar a umidade do solo em trabalhos que determinam as depleções do armazenamento de água no solo para estimativa da evapotranspiração ou extração de água de um cultivo.

Tabela 1. Número de sensores utilizados para monitoramento de umidade por alguns trabalhos que estudaram a evapotranspiração ou extração de água pelas culturas.

Fonte	Cultura	Sensor (Número de sondas)
Andreu et al. (1997)	Amendoeira	Tensiômetro (46) sonda de nêutrons (31)
Green and Clothier (1995)	kiwi	TDR (22)
Wu et al (1999)	Milho e trigo	Tensiômetro (24) Sonda de nêutrons (2)
Green and Clothier (1999)	Macieira	TDR (90)
Palomo et al (2002)	Oliveira	Sonda de neutrons (4) Tensiômetro (5)
Silva et al (2009)	Banana	TDR (20)
Coelho et al (2007)	Limoeiro	TDR (48)

Allen et al. (2011) apresentam os problemas típicos na estimativa de ET associados ao método do balanço de água no solo, destacando a variabilidade espacial e temporal da atividade de extração de água no solo pelas raízes das plantas, recomendando primeiramente o conhecimento da região de atividade radicular para posterior quantificação das depleções de água no solo. Trabalhos que ilustram a distribuição de extração de água no solo em duas dimensões (Silva et al., 2009; Coelho et al., 2010; Silva et al., 2012) revelam a ocorrência de variabilidade da extração de água no espaço do solo ocupado pelas raízes da bananeira. Este fato instiga a verificação da hipótese de que ocorrem diferenças nos valores de evapotranspiração da bananeira determinados pelo balanço de água no solo em função do número de perfis e de baterias de sensores de umidade instalados na região radicular de uma cultura para monitoramento das variações de umidade no solo. Os esforços relativos à comprovação ou rejeição desta hipótese utilizando a bananeira é devido à cultura representar uma importante *commodity* agrícola para muitos países em desenvolvimento (Ding et al., 2013) e ser muito exigente em água (Akinro et al., 2012) e adubação (Ratke et al., 2012). Conforme Turner et al (2007), a água é o mais provável fator limitante

não biológico que afeta a produção da bananeira e de acordo com a FAO a produção mundial da cultura foi de cerca de 95,6 milhões de toneladas em 2009.

O objetivo deste trabalho foi estimar o consumo hídrico da bananeira, variedade 'Platina', cultivada em lisímetro no Recôncavo Baiano e verificar se ocorrem diferenças na estimativa dos valores de evapotranspiração em função da variação do número de perfis de monitoramento de umidade na região explorada pelas raízes da planta, bem como determinar o número mínimo de sondas de TDR necessário para o cálculo do balanço hídrico na região do solo explorado pelas raízes da bananeira, considerando a distância da planta e profundidade do solo.

Material e Métodos

O experimento foi realizado na EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas - BA, com latitude 12°48'S, longitude 39°06'W e altitude de 225 m. Em uma área experimental foram transplantadas mudas micropropagadas de bananeira variedade 'BRS Platina' no dia 23/12/2011 para lisímetros com volume de 5,00 m³, medindo 2,0 m de largura, 2,5 m de comprimento e 1,0 m de profundidade. Para induzir um sistema de drenagem livre nos lisímetros, os últimos 0,2 m do perfil foi dividido em duas camadas de 0,1m, sendo a inferior composta por um sistema de drenagem com tubos de PVC de 50 mm perfurados e brita zero e a superior com areia lavada. O solo utilizado para completar o preenchimento dos lisímetros foi submetido à análise de composição granulométrica, resultando na classe textural Argilo-Arenosa. O resultado da análise físico-hídrica do perfil é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização físico-hídrica do solo utilizado para preenchimento dos lisímetros.

Prof	Retenção de água - θ cm ³ .cm ⁻³							Ks m/s	ds (kg/dm ³)	Porosidade (%)	
	0,01m	0,6m	1,0m	3,3m	10m	30m	150m			Macro	Micro
0,1	0,476	0,2937	0,229	0,203	0,181	0,167	0,160	5,04.10 ⁻⁶	1,39	15,74	27,99
0,3	0,454	0,318	0,258	0,240	0,218	0,204	0,192	2,53.10 ⁻⁶	1,45	12,41	30,73
0,5	0,445	0,306	0,261	0,234	0,218	0,190	0,171	2,61.10 ⁻⁶	1,47	11,34	28,16
0,7	0,427	0,345	0,287	0,262	0,255	0,224	0,213	2,71.10 ⁻⁶	1,52	7,58	31,04

Prof. – Profundidade (m); Ks – Condutividade Hidráulica Saturada; dg – densidade do solo.

Dados Meteorológicos foram obtidos em uma estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) próxima a área onde foram instalados

os lisímetros. De posse dos dados coletados, valores horários de evapotranspiração de referência, ETo, para grama, foram computados utilizando a equação da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). A Tabela 4 apresenta os valores mensais de precipitação e ETo ocorridos durante o período de coleta de dados do experimento.

Tabela 4. Condição meteorológica durante o período experimental, Cruz das Almas-BA.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2012												
Precipitação (mm)	33	54	16	54	74	115	100	130	49	30	51	4
ETo (mm)	167	140	156	134	106	87	90	105	116	125	124	155

O método de irrigação utilizado na área foi a microaspersão, utilizando-se microaspersores com raio de ação de 3,5 m, os quais foram espaçados entre si por 2,5 m entre emissores na linha, dispostos na área de forma triangular e a sobrepor seus raios de molhamento resultando em um molhamento total da área de plantio com uma distribuição média de intensidade de aplicação de 5,5 mm h⁻¹. Com esta disposição, através de ensaios de distribuição de água obtidos na superfície da área do interior do lisímetro e com base na estatística de Christiansen (1942), observou-se um valor médio de coeficiente de uniformidade de 91,24%.

Para monitorar a umidade no interior do lisímetro, sondas de TDR foram construídas com as seguintes características: três hastes de aço inoxidável com comprimento efetivo de 0,1m fora da resina e espaçadas entre si por 0,017m; cabos coaxiais de 50 ohms; comprimento da camada de resina de poliéster no início das hastes de 0,05m. A determinação da umidade do solo foi feita, tomando-se como base o ajuste dos valores de constante dielétrica aparente (Ka) obtidos pela TDR em relação ao conteúdo de água obtido por gravimetria (θ), sendo a relação entre as duas variáveis ($Ka \times \theta$) para o solo do experimento apresentada na Figura 1:

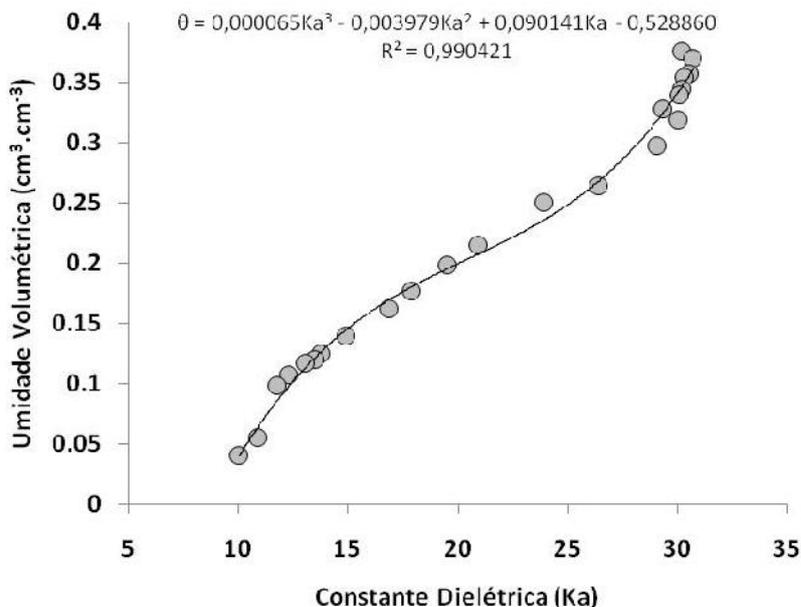


Figura 1. Relação entre umidade volumétrica (θ) e constante dielétrica (K_a) para o solo utilizado no experimento.

Instalou-se um sistema de aquisição automática de dados composto por uma TDR 100, Campbell Scientific, um data logger modelo CR1000 e 10 multiplexadores, procedendo-se a uma programação em linguagem *basic* para leitura e armazenamento de valores de K_a de 72 sondas de TDR em intervalos de 15 minutos. As 72 sondas de TDR foram instaladas no interior do lisímetro em quatro diferentes perfis (P_i): P_1 , P_2 , P_3 e P_4 . Em cada perfil formaram-se 5 baterias de monitoramento de umidade (R) com posicionamento às seguintes distâncias $R = 0,3 \text{ m}$; $0,5 \text{ m}$; $0,7 \text{ m}$; $0,9 \text{ m}$ e $1,1 \text{ m}$ e profundidades $Z = 0,1 \text{ m}$; $0,3 \text{ m}$; $0,5 \text{ m}$ e $0,7 \text{ m}$. Para dois dos quatro perfis, os valores da última bateria ($R = 1,1 \text{ m}$) foram obtidos através do processo de Krigagem, utilizando-se o aplicativo *surfer 7.0*, associando-os com os dados obtidos até a distância $R = 0,9 \text{ m}$. Desta forma, procedeu-se ao cálculo de ET considerando as situações ilustradas na Figura 2 e expostas na Tabela 5.

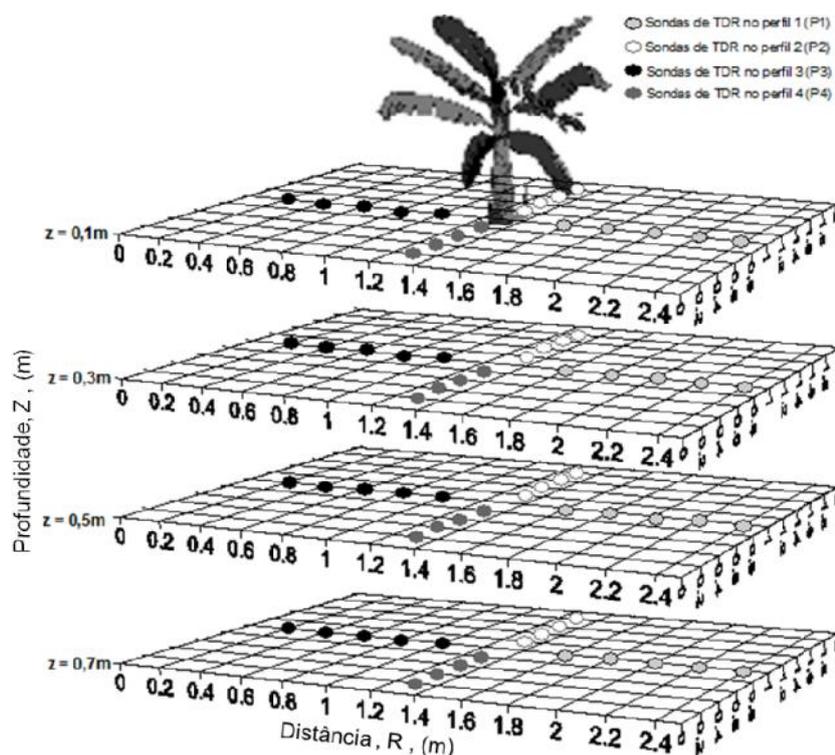


Figura 2. Distribuição das sondas de TDR no interior do lisímetro.

Tabela 5. Descrição das condições do cálculo de ET em função número de perfis (P_i) e de baterias (B_i) de monitoramento de umidade.

Nº de perfis considerados (P_i)	Sigla
1 (P1)	1P
2 (P1+P2)	2P
3 (P1+P2+P3)	3P
4 (P1+P2+P3+P4)	4P
Nº de baterias consideradas (B_i)	Sigla
1 (R = 0,3m)	1B
2 (R = 0,3m e 0,5m)	2B
3 (R = 0,3m; 0,5m e 0,7m)	3B
4 (R = 0,3m; 0,5m; 0,7m e 0,9m)	4B
5 (R = 0,3m; 0,5m; 0,7m; 0,9m e 1,1m)	5B

As fases de desenvolvimento da bananeira foram estabelecidas do seguinte modo: Inicial: 24/12/2011 a 22/05/2012 - 1 a 152 Dias após o Transplântio DAT; Crescimento vegetativo: 23/05 a 01/09/2012 – 153 a 254 DAP; Floração: 02/09/2012 à 02/10/2012 – 255 a 285 DAP (Emissão da inflorescência ocorreu no dia 06/09/2012) e crescimento dos Frutos: 03/10/2012 a 06/01/2013. 286 a 381 DAP (Colheita do cacho ocorreu em 06/01/2013). A caracterização biométrica da

bananeira no início das diferentes fases de desenvolvimento durante o primeiro ciclo de produção foi a exposta na Tabela 6.

Tabela 6. Caracterização biométrica da bananeira no início das diferentes fases de desenvolvimento.

Fase da Planta	Altura (m)	Diâmetro do pseudo-caule (m)	Área Foliar (m ²)
Inicial	0,66	0,065	1,84
Crescimento Vegetativo	1,1	0,11	3,97
Floração	2,48	0,248	8,39
Crescimento dos Frutos	2,49	0,254	8,95

Balanço Hídrico

O balanço de água no solo foi realizado utilizando-se da equação 1 desprezando-se a existência de deflúvios e ascensão capilar. A precipitação (P) foi medida através de um pluviômetro localizado na área experimental e os volumes das irrigações (I) foram quantificados por meio da coleta do volume de água precipitado em quatro coletores distribuídos na superfície do solo. A percolação foi medida nos drenos dos lisímetros. O armazenamento de água no solo (h) foi calculado para cada bateria (B_i) de monitoramento até profundidade total L do volume de solo do lisímetro (0,8m) utilizando a equação 2.

$$h(R) = \int_0^L (z_i) dz \quad (2)$$

em que: z_i é a função representativa do perfil de umidade e dz a diferencial da variável independente z. L é a profundidade total da bateria R_n. Para resolução da integral numérica utilizou-se da regra de Simpson.

Assim, obtendo-se o valor de h em cada bateria de monitoramento de umidade (R) para o intervalo de tempo das irrigações Δt , calculou-se a variação de armazenamento (Δh) conforme o número de baterias desejadas através da equação 3:

$$\Delta h = \frac{\sum_{i=1}^5 \left(\int_0^L \theta_{t_2} dz - \int_0^L \theta_{t_1} dz \right)}{i} \quad (3)$$

em que: Δh é o valor da variação de armazenamento de água do solo em cada posição de monitoramento $(R_i, Z_i) - \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_{t_1} é o valor de umidade antes do início da irrigação em um ponto de monitoramento; θ_{t_2} é o valor de umidade antes da irrigação subsequente em um ponto de monitoramento; R e L são os limites de distância e profundidade estabelecidos em cada condição de cálculo

A extração de água da zona radicular da bananeira foram quantificadas através da equação 4 aplicada a uma região de interesse no perfil (R_i, Z_i) :

$$EA = \frac{\sum_{i=1}^5 \left(\int_0^L \theta_{t+1} dz - \int_0^L \theta_{t_2} dz \right)}{i} \quad (4)$$

em que: EA é o valor da depleção de água do solo em uma região de interesse no perfil $(R_i, Z_i) - \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_{t+1} é o valor de umidade 8h após o início da irrigação em um ponto de monitoramento (R_i, Z_i) ; θ_{t_2} é o valor de umidade imediatamente antes da irrigação subsequente em um ponto de monitoramento (R_i, Z_i) e R_i e Z_i são os limites de distância e profundidade.

A avaliação das estimativas dos valores de ET da bananeira foi baseada no ajustamento de regressão linear simples entre os valores medidos considerando os quatro perfis com as demais condições: 3 perfis, 2 perfis e 1 perfil. A comparação dos valores de ET foi feita conforme recomendação de Tedeshi (2006), ajustando-se um modelo de regressão linear simples com os valores de ET obtidos nos quatro perfis no eixo y sobre as demais condições no eixo x , por equações do tipo: $y = ax + b$ sujeito à hipótese de nulidade conjunta dos parâmetros estimados a e b : $H_0: a=1$ e $H_0: b=0$, comprovando-se ou rejeitando-se tais hipóteses por meio do teste F sugerido por (Mayer et al., 1994), com um grau de confiança de 95%. A mesma análise foi feita reduzindo o cálculo de ET a apenas um perfil e variando o número de bateria de monitoramento. Assim, calculou-se ET em um perfil com 5 baterias de monitoramento e comparou-se com 4 baterias, 3 baterias, 2 baterias e 1 bateria.

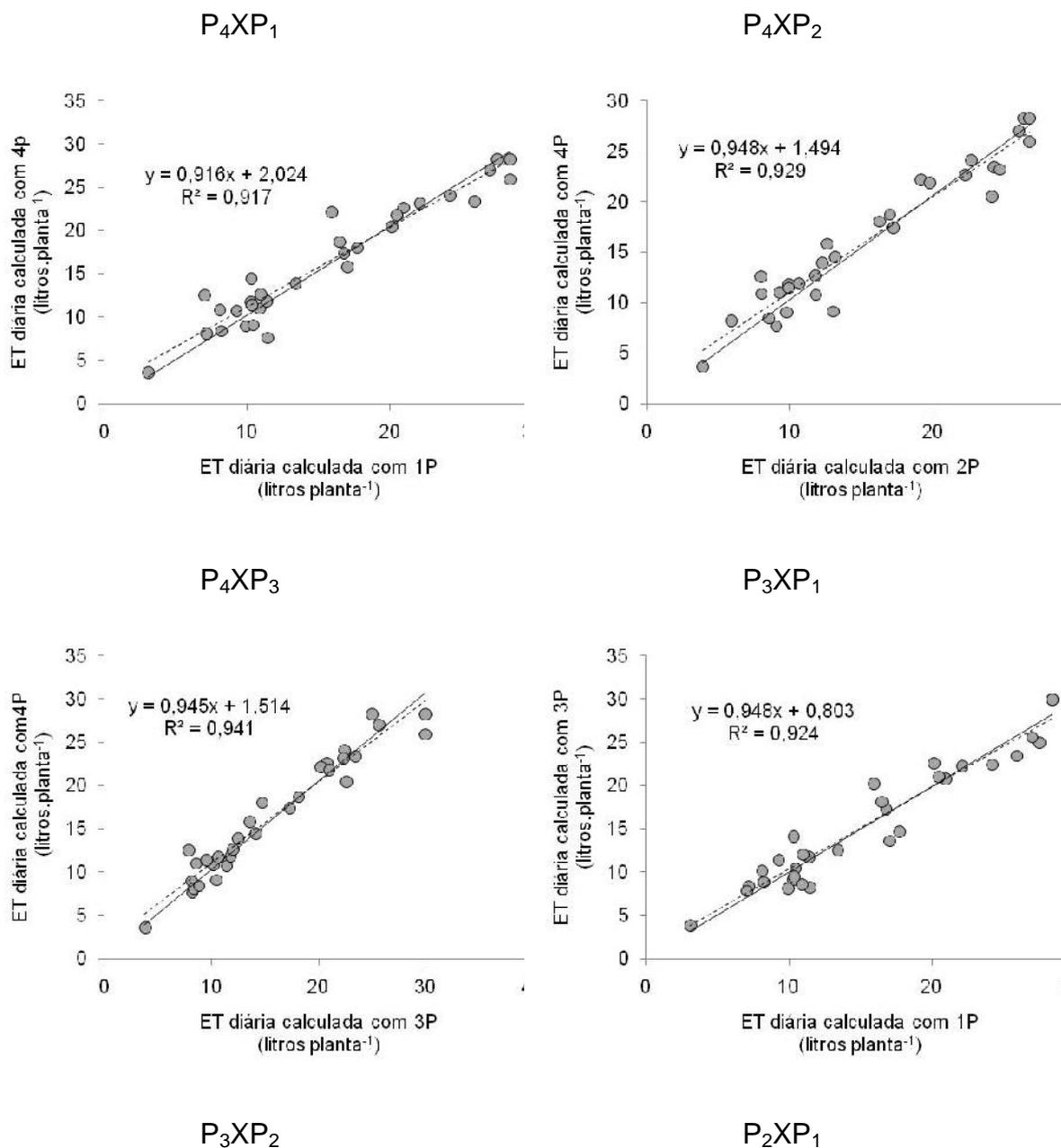
Resultados e Discussão

Na Figura 3 apresenta-se o comportamento dos valores do armazenamento de água no solo (h) quantificados antes das irrigações para a determinação de ET durante o período experimental. Os valores distribuídos na Figura 3 são médias obtidas pelo cálculo realizado com dados de umidade de diferentes números de perfis de monitoramento (1P, 2P, 3P e 4P). Conforme a distribuição dos valores de h e dos volumes percolados ao longo do tempo pode-se considerar que o manejo da irrigação da bananeira através do monitoramento da umidade do solo foi adequado, pois os volumes de água aplicados ao solo foram suficientes para suprir a ET com poucas ocorrências de percolação. Portanto, os dados de ET calculados foram obtidos com a bananeira sob condições de umidade satisfatórias no solo durante todo período experimental.

Ocorreu percolação nos lisímetros em apenas 12 períodos, sendo que os registros dos valores de percolação mais elevados ocorreram nos períodos em que se considerou a quantificação de ET com ocorrência de precipitação. A determinação do balanço de água no solo em períodos de ocorrência de chuva tornou-se difícil devido à variabilidade temporal das chuvas diárias. Como os dados de volume de chuva considerados na equação 1 eram registrados através da coleta do total acumulado em um pluviômetro durante o mesmo intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$ considerado no cálculo de $\Delta h = h_{t_2} - h_{t_1}$, ao ocorrer chuvas de curta duração dentro de um certo intervalo de tempo o valor de Δh tomado pela diferença dos valores de umidade do final (t_2) e início (t_1) de Δt não representa as variações de umidade devidas a interrupção e retorno das chuvas. Chuvas de curta duração ocorreram com frequência nos meses de junho a agosto quando o volume total precipitado foi 344,44mm. Para este período, não se procedeu as quantificações das variáveis do balanço hídrico. A inacurácia na estimativa de ET por meio da medida de variação da umidade na região ativa do sistema radicular das culturas devido à ocorrência de precipitação é citada como uma desvantagem deste método por Allen et al (2011). Problemas semelhantes são expostos por Flumingnan et al. (2011).

Tabela 7. Estatística para regressão entre os valores de evapotranspiração da bananeira estimados por balanço hídrico no solo utilizando 1, 2, 3 e 4 perfis (P_1 , P_2 , P_3 e P_4) de monitoramento de umidade

Ítem ($y=a+bx$)	$P_4 \times P_1$	$P_4 \times P_2$	$P_4 \times P_3$	$P_3 \times P_1$	$P_3 \times P_2$	$P_2 \times P_1$
Intercepto (a)	2,02	1,49	1,51	0,80	0,08	0,98
Inclinação (b)	0,91	0,94	0,94	0,94	0,99	0,93
Valor P ($H_0: a = 0$ e $b = 1$)	0,051	0,085	0,058	0,59	0,98	0,43



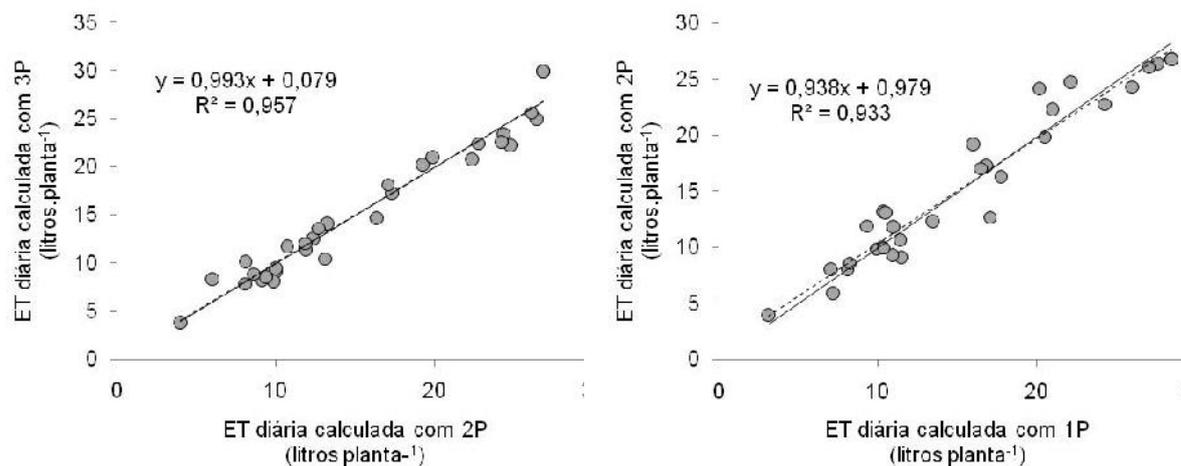


Figura 4. Relação entre os valores de evapotranspiração da bananeira estimados através do balanço de água no solo com variações no cálculo do armazenamento de água mediante a obtenção de dados de umidade em um, dois, três e quatro perfis de monitoramento durante o período experimental.

Os valores de coeficiente de cultivo (k_c) obtidos da relação entre os valores de ET e ETo foram dispostos na Figura 5. Os desvios apresentados nos gráficos são devidos à variação do número de dados de umidade considerados no cálculo de ET. Os maiores desvios encontram-se na fase de crescimento vegetativo o que pode ser devido à maior taxa de crescimento de raízes da bananeira nesta fase. Pois, de acordo com Belalcázar et al. (2003) aproximadamente 62% do crescimento das raízes da bananeira no primeiro ciclo de produção ocorre do sexto ao décimo mês após o plantio. Segundo Draye et al (2003) diversos estudos apontam a interrupção da formação do sistema radicular da bananeira a partir dos 15 dias até 75-90 dias após o plantio e que após a retomada a bananeira cessa o desenvolvimento de raízes na fase de floração.

A distribuição dos valores médios de k_c ao longo do tempo apresentou uma tendência polinomial de segunda ordem com 90% das variações da relação ETc/ETo explicadas pelas variações devidas ao desenvolvimento da planta e mudanças na demanda atmosférica ao longo do tempo. As médias dos valores de k_c obtidos no conjunto de dados medidos em cada fase, foram: 0,5 ($\pm 0,03$) na fase inicial, 0,8 ($\pm 0,15$) na fase de crescimento vegetativo, 1,1 ($\pm 0,04$) na floração e 1,03 ($\pm 0,11$) na fase de crescimento dos frutos. Também em condições do Recôncavo Baiano, Coelho et al. (2006) estimaram coeficientes de cultura

numa amplitude de 0,44 a 0,89 e 0,58 a 1,18 para as cultivares Grande Naine e Prata-Anã, respectivamente. Silva et al. (2009) estimaram valor de coeficiente de 0,8 para a fase de crescimento vegetativo e 1,0 para a floração da bananeira Prata Anã cultivada no vale do Curu, CE. Allen et al. (1998) recomendam valores de k_c , dividindo-os em três fases para bananeira, quais sejam: $k_{c_{ini}}=0,5$, $k_{c_{med}}=1,1$ e $k_{c_{final}}=1,0$.

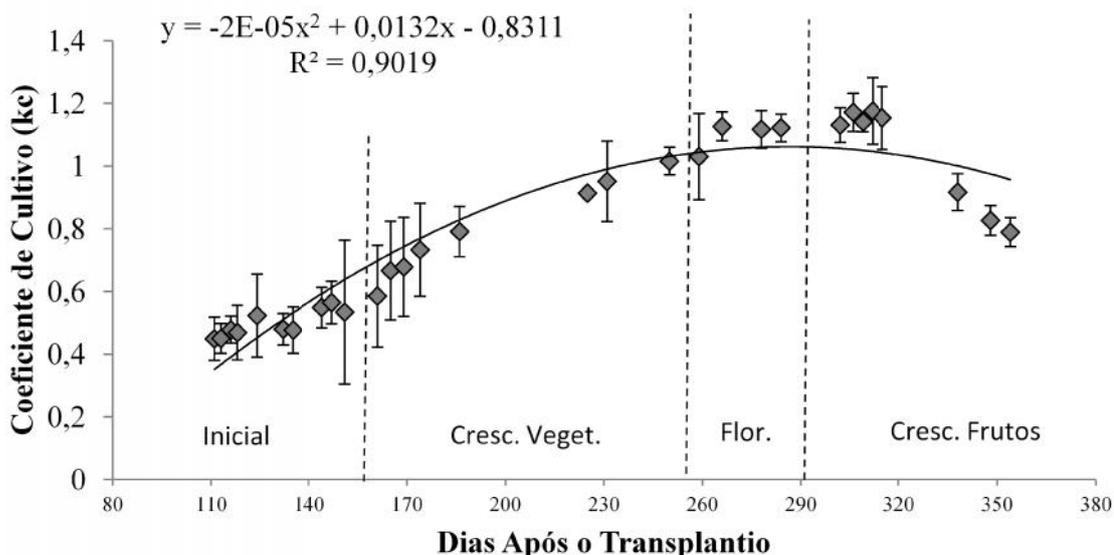


Figura 5. Valores de coeficiente de cultivo (k_c) da bananeira 'Platina' durante o primeiro ciclo de produção sob condições do recôncavo Baiano.

Os valores de ET_c foram simulados a partir dos valores médios mensais de coeficiente de cultura obtidos durante o primeiro ciclo da bananeira (Figura 5) e dos dados diários de ET_o . Os valores resultantes desta simulação encontram-se distribuídos na Figura 6. Verificou-se que o consumo médio diário da bananeira correspondente a fase inicial, crescimento vegetativo, floração e crescimento de frutos no lisímetro foi de 11,30 litros planta⁻¹ ($\pm 2,11$ litros planta⁻¹), 12,11 litros planta⁻¹ ($\pm 3,75$ litros planta⁻¹), 21,11 litros planta⁻¹ ($\pm 2,91$ litros planta⁻¹) e 21,52 litros planta⁻¹ ($\pm 3,63$ litros planta⁻¹), respectivamente. O requerimento de água da bananeira 'Platina' no primeiro ciclo foi de 1.143 mm e a necessidade média diária de água da cultura foi de 3,0 mm ($\pm 1,1$ mm).

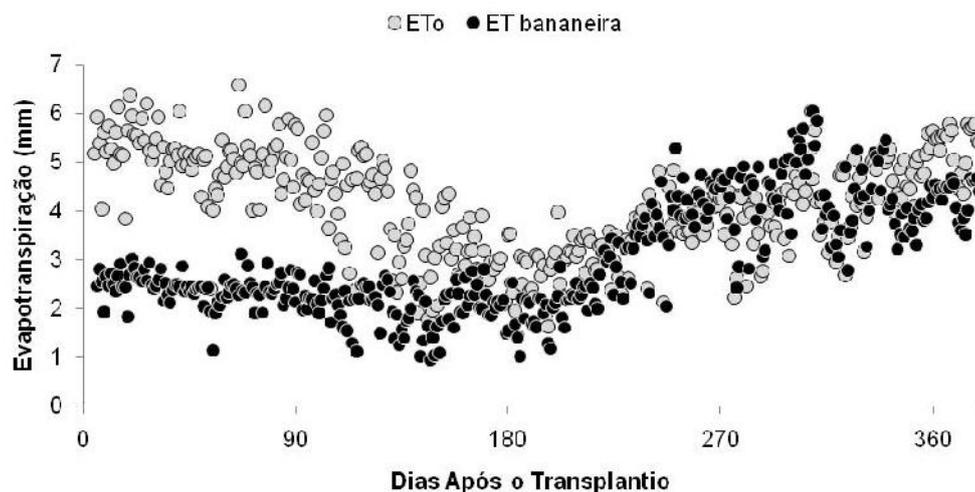


Figura 6. Valores de Evapotranspiração de Referência (ETo) e Evapotranspiração da cultura da Bananeira durante o primeiro ciclo de cultivo, Cruz das Almas-BA.

Análise da variação do cálculo de ET pelo balanço de água no solo com dados de umidade obtidos em diferentes números de baterias de sondas de TDR em um perfil

Na Tabela 6 encontra-se o resultado do teste de hipótese de nulidade conjunta, realizado para verificar se os valores de ET calculados em um perfil inteiro é semelhante aos valores de ET calculados com dados de umidade obtidos em 4 sondas (1 bateria), 8 sondas (2 baterias) , 12 sondas (3 baterias) e 16 sondas (4 baterias) de TDR dentro do perfil. Com um grau de confiança de 95%, rejeitou-se a hipótese de que existe semelhança entre os valores de ET estimados pelo balanço de água no solo com os dados de umidade de todo perfil e valores de ET calculados com dados de umidade obtidos em 1, 2 e 3 baterias de sondas de TDR. A hipótese de nulidade foi aceita ao se comparar os valores de ET calculados com dados de umidade obtidos em 4 baterias de umidade e no perfil inteiro, ou seja, para representar o que de fato ocorre na região explorada pelas raízes da bananeira, as depleções de água no solo devem ser monitorada com um número mínimo de 16 sondas de TDR com distâncias e profundidades mínimas de monitoramento de 0,9 m e 0,7 m.

As diferenças obtidas nos valores de ET devem-se à variabilidade no espaço e no tempo do padrão da distribuição de extração de água do solo na região explorada pelas raízes da bananeira, pois conforme pode-se observar na visão tri-

dimensional da distribuição da extração de água da região radicular da bananeira na Figura 7 a saída de água do perfil não é uniforme e é mais intensa próxima ao pseudocaule da planta.

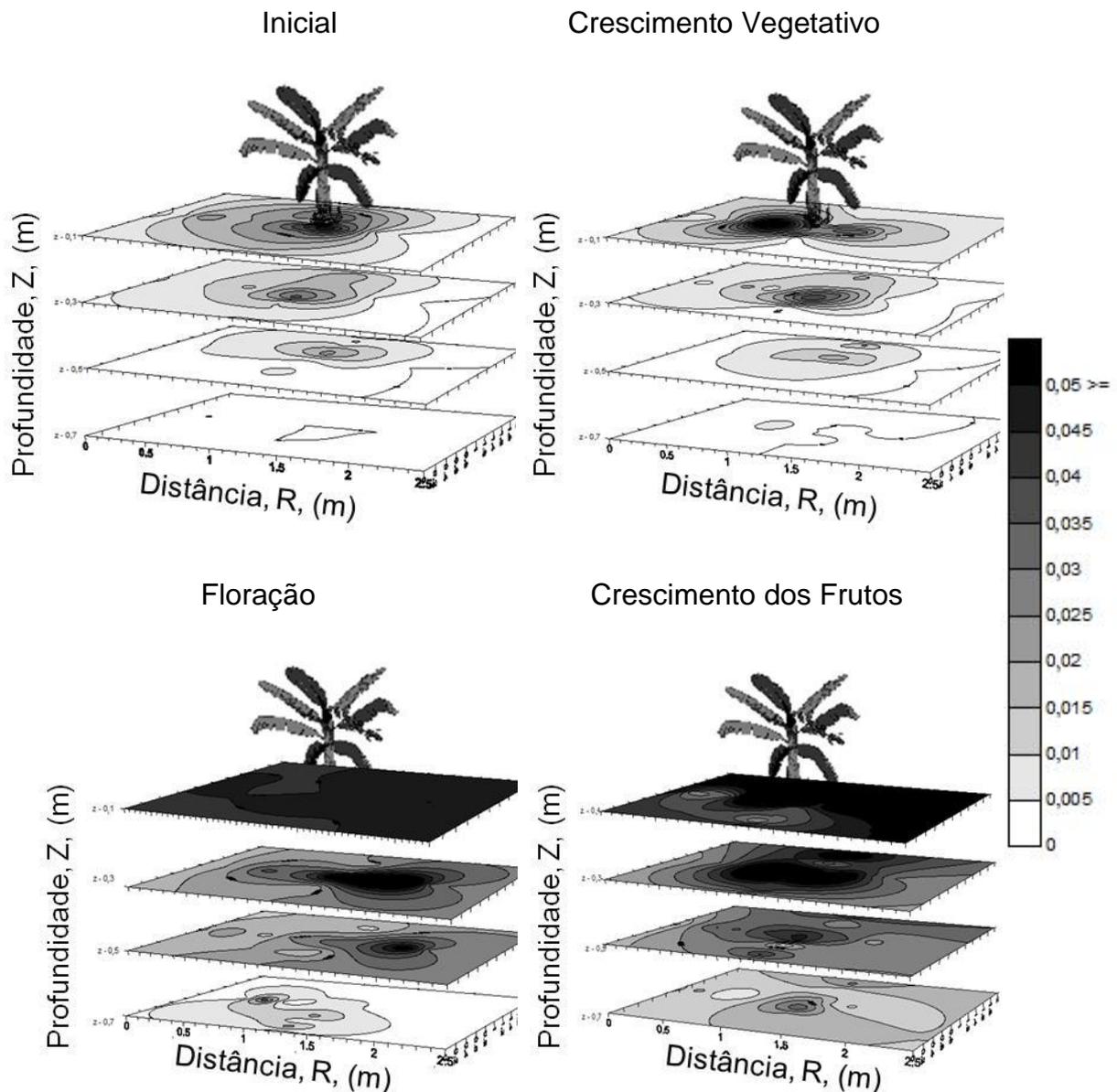


Figura 7. Distribuição tri-dimensional da extração de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na região radicular da bananeira em diferentes fases de desenvolvimento.

As estimativas de ET realizadas com o cálculo da variação de armazenamento de água no solo considerando dados de umidade obtidos em 1, 2 e 3 baterias de sondas de TDR superestimaram os valores obtidos em todo perfil

(Figura 8). Os valores de ET estimados com uma bateria de sondas de TDR foram superestimados em 297% comparando-se aos valores estimados com dados de umidade obtidos em todo perfil (Tabela 8). Os valores estimados com 2 e 3 baterias superestimam os valores obtidos no perfil inteiro em 288% e 224%, respectivamente (Tabela 8). Isto ocorre, como já dito, devido a ocorrência de maior intensidade de extração na região onde encontrava-se instaladas as baterias 1B, 2B e 3B (regiões mais próximas do pseudocaule e de maior intensidade de extração de água), tornando a ET quantificada não representativa do que ocorreu em toda rizosfera da planta. Por exemplo, na distância $r=0,3m$ o percentual da extração de água obtida em relação ao total do perfil foi de 33% na fase inicial, 30,69% na fase de crescimento vegetativo, 25,06% na Floração e 29% na fase de crescimento dos frutos. Vários estudos apontam a não uniformidade de distribuição de extração de água da bananeira no perfil, mostrando que se houver água disponível no perfil a intensidade de extração de água é maior próximo ao pseudocaule da planta (Silva et al., 2009; Coelho et al., 2010, Silva et al., 2012). Não obstante, encontra-se na literatura pesquisas que fazem uso de sensores para monitorar umidade utilizando uma ou duas baterias no solo por planta (Silva et al., 2009; Souza et al., 2013; Montenegro et al., 2008). Assumir que as variações de umidade na região radicular de uma cultura pode ser representada por poucos pontos de coleta de umidade é um risco, pois verificou-se que em regiões onde existe maior intensidade de extração tem-se maior variação de armazenamento de água mostrando, conforme já apontado por Domec et al. (2012) que é mais seguro monitorar a umidade do solo em vários pontos na região explorada pelas raízes das plantas.

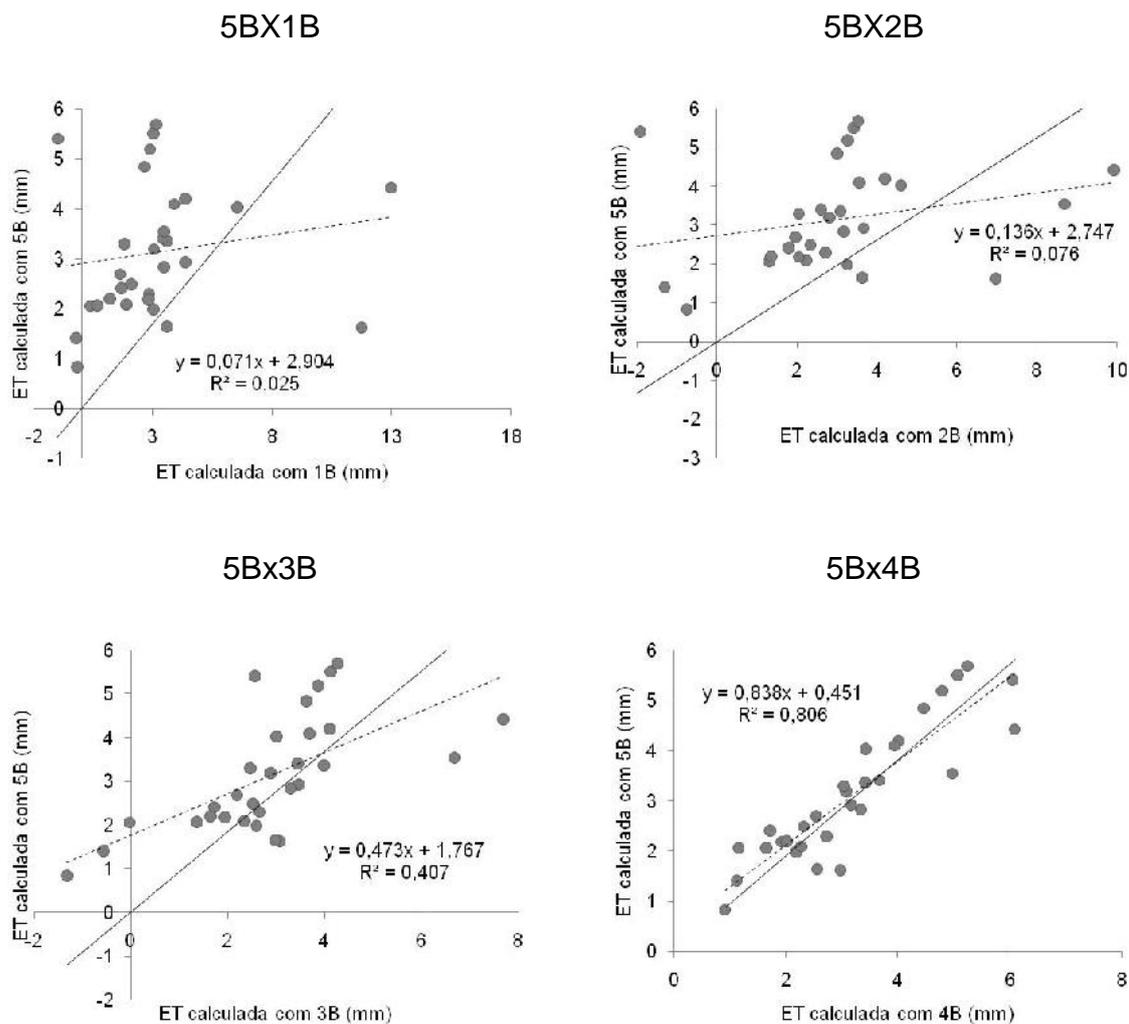


Figura 8. Relação entre os valores de Evapotranspiração da bananeira estimado pelo balanço hídrico no solo variando o número de baterias com quatro sondas TDR em um perfil. 1B – uma bateria, 2B – duas baterias, 3B – três baterias, 4B – quatro baterias, 5B – cinco baterias.

Tabela 8. Estatística para regressão entre os valores de evapotranspiração da bananeira estimados por balanço hídrico no solo utilizando 1, 2, 3, 4 e 5 baterias (1B, 2B, 3B, 4B e 5B) de monitoramento de umidade.

Ítem ($y=a + bx$)	5Bx1B	5Bx2B	5Bx3B	5BX4B
Intercepto (a)	2,90	2,74	1,76	0,45
Inclinação (b)	0,07	0,13	0,47	0,83
Valor P ($H_0: a = 0$ e $b = 1$)	<0,05	<0,05	<0,05	0,11

Conclusões

Não ocorrem diferenças na estimativa dos valores de evapotranspiração da bananeira através do balanço hídrico ao se variar o número de perfis de monitoramento de umidade no solo;

Foi necessário no mínimo 4 baterias de sondas de TDR com 0,7m de profundidade, distanciadas 0,2m uma da outra para monitorar as depleções de água em um perfil no solo para estimativa da evapotranspiração da bananeira através do balanço hídrico;

O consumo médio e total de água da bananeira para o primeiro ciclo de cultivo no recôncavo baiano é 3mm dia^{-1} e $1.143\text{mm ciclo}^{-1}$. Os valores de kc representativos de cada fase de desenvolvimento da bananeira foram: 0,5 na fase inicial, 0,8 na fase de crescimento vegetativo, 1,1 na floração e 1,03 na fase de crescimento dos frutos.

Referências Bibliográficas

AKINRO, A.O.; OLUFAYO, A.A.; OGUNTUNDE, P.G. Crop Water Productivity of Plantain (*Musa Sp*) in a Humid Tropical Environment. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. vol. 5, n.1, p.19-25, 2012.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement. *Agricultural Water Management*. vol. 98, p. 899–920, 2011

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: United Nations FAO, *Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome, Italy, 1998.

ANDREU, L.; HOPMANS, J.W.; SCHWANKL, L.J.; Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree. *Agricultural Water Management*. vol.35, p.123-146, 1997.

BASSOI, Luís Henrique et al . Guidelines for irrigation scheduling of banana crop in São Francisco Valley, Brazil. II - Water consumption, crop coefficient, and physiological behavior. *Revista Brasileira de Fruticultura*. v. 26, n. 3, 2004.

BELALCÁZAR, S. ROSALES, F.E.; POCASANGRE, L.E. Development and formation of plantain roots (Musa AAB Simmonds). In: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003

CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by Sprinkling. Berkley: University of California, 1942. 124 p.

COELHO, E.F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. Soil Science Society America Journal. vol.60, p.1039-1049, 1996.

COELHO, E.F.; SILVA LEDO, C. A. S da.; SILVA, S. O. produtividade da bananeira 'prata-anã' e 'grande naine' no terceiro ciclo sob irrigação por microaspersão em tabuleiros costeiros da Bahia. Revista Brasileira de Fruticultura. v. 28, n.3, p. 435-438, 2006.

COELHO, E. F.; SANTOS, D. B. dos and AZEVEDO, C. A. V. de. Sensor placement for soil water monitoring in lemon irrigated by micro sprinkler. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. vol.11, n.1, p. 46-52, 2007.

COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; MIRANDA, J.H. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. Eng. Agríc. vol.30 n.4. 2010

DING, Z.; WEN, Z.; WU, R.; LI, Z.; ZHU, J.; LI, W.; JIAN, M. Surface energy balance measurements over a banana plantation in South China. Theor Appl Climatol. DOI 10.1007/s00704-013-0849-5

DOMEC, J.C.; SUN, G.; NOORMETS, A.; GAVAZZI, M.J.; TREASURE, E.C.; SWENSON, J.J.; MECNULTY, S.G.; KING, J.S. A Comparison of Three Methods to Estimate Evapotranspiration in Two Contrasting Loblolly Pine Plantations: Age-Related Changes in Water Use and Drought Sensitivity of Evapotranspiration Components. Forest Science. vol. 58, n.5, p.497-512, 2012.

DRAYE, X.; LECOMPTE, F.; PAGÈS, L. Distribution of banana roots in time and space: new tools for an old science. In: Banana Root System: towards a better

understanding for its productive management. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003

EVETT, S. R.; SCHWARTZ, R. C.; HOWELL, T. A.; BAUMHARDT, R. L.; COPELAND, K. S. Can weighing lysimeter ET represent surrounding field ET well enough to test flux station measurements of daily and sub-daily ET?. *Advances in Water Resources*, vol. 50, p.79-90, 2012.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R.T.; PRETE, C. E. C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. *Agricultural Water Management*. vol. 98, p. 791-800, 2011.

GREEN, S.R.; CLOTHIER, B.E. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil*. vol. 206, p.61–77, 1999.

GREEN, S.R.; CLOTHIER, B.E.; Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and Soil*. vol. 173, p.317-328, 1995.

HILLEL, D. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier, academic Press. 294p, 2003.

MARSAL, J.; GIRONA, J.; CASADESUS, J.; LOPEZ, G.; STOCKLE, C.O. Crop coefficient (K_c) for apple: comparison between measurements by a weighing lysimeter and prediction by CropSyst. *Irrigation Science*. DOI 10.1007/s00271-012-0323-7. 2012.

MONTENEGRO, A. A. T.; GOMES, A. R. M.; MIRANDA, F. R.; CRISÓSTOMO, L. A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira para a região litorânea do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*. v. 39, n. 2, 2008.

PALOMO, M.J; MORENO, F.; FERNANDEZ, J.E.; DIAZ-ESPEJO, A.; GIRON, I.F. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agricultural Water Management*. vol. 55, p.15-35, 2002.

RATKE, F. R.; SANTOS, S. C.; PEREIRA, H. S.; SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C. Desenvolvimento e produção de bananeiras Thap Maeo e Prata-Anã com diferentes níveis de adubação nitrogenada e potássica. *Revista Brasileira de Fruticultura*. vol.34, n.1, pp. 277-288, 2012.

SANTANA, J.L.; SUAREZ, C.L.; FERERES, E. Evapotranspiration and crop coefficients in banana. *Acta Horticulturae*, n.335, p.341-348, 1993.

SANTOS, A.C. S.; SILVA, B. B.; RAO, T. V. R.; NEALE, C. M. U. Energy balance measurements over a banana orchard in the Semiarid region in the Northeast of Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.44, n.11, p.1365-1373. 2009.

SHONGWE, V.D.; TUMBER, R.; MASARIRAMBI, M.T.; MUTUKUMIRA, A.N. Soil water requirements of tissue-cultured Dwarf Cavendish banana (*Musa spp. L*). *Physics and Chemistry of the Earth*. vol. 33, p.768–774, 2008.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. de and WORKMAN, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. vol.44, n.7. p. 730-737, 2009.

SILVA, A.J.P ; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. Sensor placement for irrigation scheduling in banana using micro-sprinkler system. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 1, p. 15-23, 2012.

SILVA, E. N.; BEZERRA, F. M. L. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da bananeira no Vale do Curu, CE. *Revista Ciência Agronômica*, v. 40, n. 2, p. 203-210, 2009.

SOUZA, C.; ANDRADE, A. P.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C.D.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço hídrico da cultura da mamona sob condições de sequeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.17, n.1, p. 3-10, 2013.

STEVENS, R. M.; EWENZ, C.M.; GRIGSON, G.; CONNER, S.M.; Water use by an irrigated almond orchard. *Irrigation Science*. vol.30, p.189–200, 2012

TURNER, D. W.; Fortescue, J. A.; Thomas, D. S. Environmental physiology of the bananas (*Musa spp.*). *Brazilian Journal Plant Physiology*. vol. 19, n.4, p.463-484, 2007.

WU, J.; ZHANG, R.; GUI, S. Modeling soil water movement with water uptake by roots. *Plant and Soil*. vol. 215, p. 7–17, 1999.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento contínuo, automático e em curtos intervalos de tempo do conteúdo de água no solo possibilita a estimativa de variáveis do sistema água-solo-planta-atmosfera, tais como percolação, variação de armazenamento de água no solo, extração de água pelo sistema radicular das culturas e evapotranspiração. Verificamos que com TDR, estas variáveis podem ser estimadas com precisão e acurácias próximas ao registrado em lisímetros de drenagem.

Em solos em que não ocorre ascensão capilar até o sistema radicular da cultura, pode-se estimar a percolação com base apenas nas variações da umidade abaixo da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, desde que os dados sejam obtidos em curtos intervalos de tempo, sem necessidade de proceder à determinação da curva de retenção e condutividade hidráulica não saturada.

Devido a variabilidade da extração de água existente na região explorada pelas raízes da bananeira no solo, instalar sensores na região de maior intensidade de extração de água superestima os valores de evapotranspiração da cultura, sendo necessário, para uma dada condição, estabelecer o número mínimo de sensores necessários a se instalar no perfil.

A quantidade de sensores a ser utilizada em um perfil de monitoramento de umidade depende das características do solo e provavelmente da planta, sendo que para bananeira em solo de textura argilo-arenoso, verificamos que são necessários a instalação de no mínimo 16 sensores no perfil.

Tendo visto o aumento do uso do método do balanço de água no solo com ferramentas modernas de determinação do conteúdo de água no solo, como a TDR, são necessários mais estudos para indicarem critérios, procedimentos e

limitações do método, tanto a nível de sistema radicular de outras culturas, quanto em maior escala como de uma bacia hidrográfica.