Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Partição da extração da água do solo po	or plantas entre camadas com teores de
água d	istintos

Leandro Neves Faria

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do Ambiente Agrícola

Piracicaba 2009

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Leandro Neves Faria Engenheiro Agrônomo

Partição da	extração	da água	i do solo	por	plantas	entre	camadas
	con	n teores	de água	dist	intos		

Orientador:

Prof. Dr. QUIRIJN DE JONG VAN LIER

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do Ambiente Agrícola

Piracicaba 2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Faria, Leandro Neves

Partição da extração da água do solo por plantas entre camadas com teores de água distintos / Leandro Neves Faria. - - Piracicaba, 2009.

62 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009. Bibliografia.

1. Água do solo 2. Balanço hídrico 3. Modelagem de dados 4. Sistema radicular I. Título

CDD 631.432 F224p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - O autor"

A meus Pais,

Evaldir Faria da Silva e Railda de Moura Neves Faria

Pelo carinho, dedicação, compreensão e sábias palavras de incentivo na busca do saber e pelo exemplo de força e determinação desempenhado em toda minha vida.

Meus irmãos,

Vanessa Neves Faria e Helder Henrique Neves Faria

Pelo apoio, compreensão, amizade, companheirismo e incentivo.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que ele representa na minha vida;

Ao Prof. Dr. Quirijn de Jong Van Lier pela amizade, orientação e ensinamentos prestados, paciência e companheirismo ao longo destes anos e pela grande contribuição na minha vida acadêmica e profissional;

Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi, Prof. Dr. Jarbas Honorio de Miranda, Prof. Dr. Sergio Oliveira Morais e Prof. Dr. Luiz Roberto Angelocci pelo estímulo, confiança, amizade e contribuição na minha formação acadêmica;

À grande amiga Prof^a. Dr^a. Luciana Gomes Castro pelos incentivos, conselhos, confiança, paciência e amizade ao longo de minha formação acadêmica;

Ao grande amigo Prof. Dr. Quelmo Silva de Novais pela amizade, conselhos, incentivos e contribuição em minha formação profissional;

Aos funcionários Francisco Bernardo Dias, Ângela Márcia Derigi e Luiz Fernando Novello do DCE - ESALQ, pela colaboração ao longo do desenvolvimento deste trabalho;

Aos funcionários Hélio de Toledo Gomes, Gilmar Batista Grigolon, Antônio Agostinho Gozzo e Luiz Custódio de Camargo do Departamento de Engenharia Rural pela contribuição durante a implantação e condução deste projeto;

Aos amigos Marlon Gomes da Rocha e Elenilson Moreira Franco, pela amizade, companheirismo e cooperação para o desenvolvimento deste trabalho;

Aos amigos e colegas Derblai Casaroli, Angelica Durigon, Jaedson Mota, Greice Ximena, João Batista, Alexandro Brito, Andrea Irigoyen, Deise Furlan, Alexandre Barros, Lucas Vellame, Anderson Palmieri, Fábio Scarpare, Indriati Nangoi, Jones Simon, João Lelis, Ronaldo Santos e Alexandro Almeida pela colaboração e apoio durante a realização deste curso;

Aos amigos Carlindo Rodrigues, Anthony Wellington, Antonio Camargo, Braulio Maia e Diego Soriano pela amizade e convívio;

Aos amigos do Departamento de Engenharia Rural pela amizade e cooperação;

Aos demais amigos e colegas da pós-graduação da ESALQ/USP pelo apoio e amizade;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxilio financeiro para o desenvolvimento deste projeto;

À Escola Superior de agricultura "Luiz de Queiroz" - USP, pela oportunidade da realização deste curso de mestrado;

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho;

Finalmente agradeço a toda minha família, companheiros de todas as horas, por tudo.

Obrigado a todos!

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Estresse hídrico, observações experimentais e importância de seu estudo	12
2.2 Previsão do estresse hídrico	14
2.3 Modelagem da partição da extração em condições estratificadas	17
2.4 Experimentação com lisímetro dividido	18
2.5 Análise da densidade radicular	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Local, solo e clima	22
3.2 Unidade experimental: o lisímetro	22
3.3 Preenchimento dos lisímetros	23
3.4 Instalação dos sensores	24
3.5 Calibração do TDR	25
3.6 Transplante e divisão do sistema radicular	26
3.7 Adubação das unidades experimentais	27
3.8 Controle de pragas	28
3.9 Monitoramento do teor de água	28
3.10 Manejo de irrigação: aplicação de estresse	29
3.11 Aspectos teóricos	32
3.12 Condução experimental: caracterização física do solo	33
3.12.1 Retenção, condução e potencial de fluxo matricial	33

3.12.2 Avaliação do desempenho experimental	36
3.13 Parâmetros radiculares	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Curva de retenção	38
4.2 Condutividade hidráulica	39
4.3 Caracterização do sistema radicular	41
4.4 Resultados do experimento com o lisímetro	42
5 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	55

RESUMO

Partição da extração da água do solo por plantas entre camadas com teores de água distintos

A escassez de água é um dos fatores mais limitantes à produção agrícola. O entendimento dos fatores que regem a extração da água do solo por plantas e a sua distribuição ao longo do sistema radicular em condições hidráulicas contrastantes é importante para o ajuste fino de modelos hidrológicos que servem de referência para modelos de produção vegetal e meteorológicos, entre outros. Com a finalidade de contribuir com o conhecimento sobre a dinâmica da água na rizosfera, nesta dissertação um modelo de partição de extração de água do solo pelas raízes foi descrito e testado experimentalmente. Para poder medir a partição da extração de água do solo por raízes impondo condições contrastantes de teor de água foi criado um ambiente artificial, um lisímetro com dois compartimentos A e B separados fisicamente ("split-pot"). Foram confeccionados quatro desses lisímetros, preenchidos com material de um solo de textura média e plantados com duas plantas de sorgo (Sorghum bicolor (L.) Moench), dividindo o sistema radicular ao meio entre os compartimentos. Sensores de TDR e tensiômetros foram instalados nos lisímetros para monitoramento do teor de água no solo e referencia para irrigação, respectivamente. O manejo da irrigação adotado foi constituído de quatro fases: I - irrigação apenas do compartimento B e secagem do compartimento A (07/05 - 25/05); II - secagem dos dois compartimentos (26/05 – 05/06); III - irrigação do compartimento A e secagem do compartimento B (06/06 - 14/06); IV - secagem dos dois compartimentos (15/06 - 22/06). O material de solo utilizado foi analisado quanto a suas propriedades hidráulicas. Após o fim do período de monitoramento os lisímetros foram desmontados e os parâmetros radiculares determinados. Para avaliar o desempenho do modelo de extração radicular compararam-se os dados observados de teor de água (θ_{obs}) com os previstos pelo modelo (θ_{mod}), utilizando-se a raiz do erro médio quadrático (RMSE) como indicador quantitativo. Incluiu-se um fator de correção para atividade e distribuição do sistema radicular. Para as quatro unidades experimentais, os valores do teor de água variaram devido às lâminas de irrigação aplicadas e a extração de água pela planta. Observaram-se, ainda, muito mais valores positivo de $\Delta\theta$ modelados do que observados, o que indica que a resistência hidráulica interna das raízes e mecanismos que impedem o refluxo de água ao solo, não considerados pelo modelo, podem, na verdade, ter um papel importante nas relações hídricas na rizosfera. Concluiu-se que o experimento permitiu fazer observações da extração radicular em condições hidráulicas contrastantes de seu sistema radicular. As plantas demonstraram preferência por extrair água dos compartimentos mais úmidos, interrompendo a exploração dos mais secos. Em diversas ocasiões a liberação da água ao solo foi observada nos compartimentos mais secos. Utilizando-se um fator de eficiência radicular de 0,015, o modelo testado descreveu razoavelmente bem as observações.

Palavras-chave: Estresse hídrico; Modelagem; Sistema radicular

ABSTRACT

Partition of root water extraction between soil layers with distinct water contents

Water shortage is one of the most limiting factors for agricultural production. The understanding of factors that rule the extraction of soil water by plants and its distribution along the root system under contrasting hydraulic conditions is important for fine-tuning hydrological models which are a reference for crop growth models, meteorological models, among others. Aiming to contribute with the understanding of water dynamics in the rhizosphere, a model for the description of root water extraction partition was described and experimentally tested in this dissertation. To measure the root water extraction partition under contrasting hydraulic conditions an artificial environment was created: a split-pot lysimeter with two physically divided compartments A and B. Four of these lysimeters were constructed, filled with a medium textured soil and populated by two sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) plants whose root systems were divided among the compartments. TDR and tensiometer equipment was installed in the lysimeters to measure soil water content and as a reference for irrigation, respectively. Irrigation management consisted of four phases: I - irrigation only in compartment B, drying out compartment A (07/May – 25/May); II – no irrigation, drying out of both compartments (26/May - 05/June); III - irrigation only in compartment A, drying out compartment B (06/June -14/June); IV - no irrigation, drying out of both compartments (15/June – 22/June). Soil hydraulic properties were determined in laboratory. At the end of the experimental period, lysimeters were disassembled and root system parameters were determined. To evaluate the performance of the root water extraction model, observed water contents were compared with model predictions, using the root means square error (RMSE) as quantitative index. A correction factor for root activity and distribution was included. Water contents were observed to vary in the four lysimeters due to irrigation and root water extraction. Model predictions showed much more positive values of $\Delta\theta$ than observed, suggesting that internal root resistance and mechanisms impeding reflux from root to soil, not considered by the model may play an important role in rhizosphere water relations. It is concluded that the experiment permitted to observe root water extraction under contrasting hydraulic conditions in the root system. Plants showed preference for water extraction from the wetter compartments, interrupting the exploitation of the dryer ones. On several occasions, a hydraulic lift (water transfer from roots to soil) was observed in the dry compartments. Using a root system efficiency factor of 0.015, the tested model described the observations reasonably well.

Keywords: Water stress; Modeling; Root system

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água é um dos fatores mais limitantes à produção agrícola, sendo de grande importância a busca por sistemas de manejo agrícola que otimizam a utilização de recursos hídricos através do manejo adequado do sistema radicular e da estrutura do solo, apoiado ou não por sistemas de irrigação. O desenvolvimento do sistema radicular tanto em profundidade quanto lateralmente possibilita aos vegetais uma maior área de contato com o solo favorecendo a absorção de nutrientes e água do solo. Informações a respeito da absorção de água no solo e sua redistribuição na planta são necessárias para o manejo de irrigação racional e eficiente.

O principal mecanismo disponível para a regulagem da transpiração pela planta é a abertura ou fechamento de estômatos, aumentando ou diminuindo a resistência hidráulica folha-atmosfera. O fechamento dos estômatos, além de reduzir a transpiração, diminui a absorção de CO₂ do ar e, portanto, limita a fotossíntese e o rendimento vegetal. A estimativa das taxas de transpiração reduzidas que ocorrem quando o potencial da água na superfície radicular se torna inferior a um valor limitante é importante para a modelagem do crescimento e rendimento vegetal. Tal estimativa pode ser feita pelo estudo do processo de extração de água do solo por plantas que ocorre a taxas determinadas pelos gradientes de potencial no sistema solo-planta-atmosfera. Numa determinada condição de diferença de potencial entre a água no solo e a água (vapor) na atmosfera, a taxa de transpiração da planta é determinada pelas resistências hidráulicas no solo, na planta, e na interface solo-raiz e folha-atmosfera. Assim, o processo transpiratório reflete claramente a disponibilidade de água para a planta.

Condições climáticas adversas como altas temperaturas, velocidade do vento e baixa umidade do ar favorecem o aumento da taxa de transpiração dos vegetais. Para que as plantas mantenham suas funções fisiológicas e reprodutivas, há necessidade de que a demanda feita sobre ela pela atmosfera seja balanceada com a disponibilidade do conteúdo de água no solo. O entendimento do processo de extração de água pelas raízes das plantas é primordial para a estimativa da transpiração e consequentemente, a otimização da produção agrícola e aplicação do manejo racional do uso da água. Partindo deste exposto, fica evidente a necessidade de desenvolver modelos de extração radicular.

Em solos com condições hidráulicas diferentes entre camadas (teor e retenção de água e condutividade hidráulica) e/ou densidades radiculares diferenciadas entre camadas, a estimativa de partição da extração da água entre as diferentes camadas é um assunto não resolvido em

modelos hidrológicos e de crescimento vegetal. O entendimento dos fatores que regem a extração da água do solo por plantas e a sua distribuição ao longo do sistema radicular em condições hidráulicas contrastantes, permite o ajuste fino de modelos hidrológicos que servem de referência no cálculo da estimativa de água no solo necessário ao desenvolvimento e produção da planta.

Com a finalidade de contribuir com o conhecimento sobre a dinâmica da água na rizosfera, nesta dissertação um modelo de partição da extração da água do solo pelas raízes será descrito e testado experimentalmente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estresse hídrico, observações experimentais e importância de seu estudo

No Brasil, como no resto do mundo, uma atenção considerável é dada ao estudo do estresse hídrico vegetal, demonstrada no Brasil, por exemplo, pelos trabalhos de Carlesso (1995); Costa, Morison e Dennett (1997); Fiorin, Reinert e Albuquerque (1997) e Souza et al. (2004).

A condutância estomática é um importante indicador do estresse hídrico em plantas, diminuindo proporcionalmente à medida que este estresse aumenta. Quanto mais acentuado o estresse, maior a variabilidade temporal e consequentemente, durante o ciclo (OLIVEIRA; FERNANDES; RODRIGUES, 2005). Trabalhos realizados com plantas submetidas à deficiência hídrica mostraram uma relação direta entre a condutância estomática e a taxa aparente de transporte de elétrons. Desta forma, o fechamento dos estômatos durante a seca levou à diminuição da assimilação e concentração intracelular de CO₂, consequentemente um menor fluxo de elétrons não cíclicos (QUEIROZ; GARCIA; LEMOS FILHO, 2002). Análises feitas em plantas de milho, em campo e em casa de vegetação, demonstraram o mesmo comportamento em relação à condutância foliar e o potencial da água na folha, tendo aumentado a condutância estomática à medida que aumentou o potencial da água na folha (PEREIRA et al., 2003).

A tolerância à falta de água é um fator importante para os vegetais cultivados em regiões onde os índices pluviométricos são deficitários. Exemplo disso é o que ocorre com a planta do sorgo, que apresenta dois mecanismos relacionados ao déficit hídrico: escape e tolerância, conforme relatado no Sistema de Produção (EMBRAPA, 2008). Destes dois mecanismos, o primeiro está relacionado com a disposição e tamanho do sistema radicular, no qual o sorgo possui raízes ramificadas e profundas, facilitando a retirada de água do solo. O segundo mecanismo, diz respeito às condições bioquímicas nas quais a planta diminui o metabolismo, ocorrendo murcha; ao suprir suas necessidades hídricas apresenta uma rápida recuperação.

A resistência a seca ocorre por mecanismos diferenciados entre espécies vegetais. Alguns aspectos morfofisiológicos influenciam na habilidade das plantas em adaptar-se a diferentes condições de déficit hídrico durante seu crescimento e desenvolvimento. A sensibilidade do desenvolvimento das folhas ao déficit hídrico pode mudar no transcorrer do dia ou nas diferentes estações do ano. A limitação de expansão na área foliar pode ser considerada como uma primeira reação das plantas a esse déficit (SANTOS; CARLESSO, 1998).

A deficiência hídrica afeta diretamente o metabolismo dos vegetais, prejudicando seu desenvolvimento. Martins et al. (2008) estudando o efeito do estresse hídrico concluíram que os parâmetros de crescimento e desenvolvimento decresceram imediatamente após o início do déficit hídrico no solo, antes mesmo de ser a transpiração afetada pela redução da água no solo. A diminuição da condutância estomática e a queda maior da taxa de transpiração do que da fotossíntese indicam a existência de mecanismos de aclimatação, no sentido de diminuir as perdas de água, quando sob condição de estresse hídrico moderado (OLIVEIRA et al., 2002).

Em geral as plantas apresentam sensibilidade maior à falta de água no solo em alguns períodos. No caso de plantas de feijão, um dos subperíodos em que estão mais sensíveis à deficiência hídrica é o reprodutivo, especialmente a fase de pré-florescimento ou início do subperíodo reprodutivo, estádio R5 (FANCELLI; DOURADO NETO, 1997). Quando submetida à seca, a planta diminui a expansão e multiplicação das células ocasionando redução no desenvolvimento do dossel vegetativo. Com isso, o aumento na frequência e diminuição na lâmina de irrigação após o inicio da fase de florescimento promove um maior crescimento do vegetal em altura e um maior desenvolvimento do índice de área foliar, não tendo influencia na quantidade de nós e no comprimento dos entrenós na haste do feijoeiro (CARLESSO et al., 2007). Baseado na hipótese de que a deficiência hídrica afeta simultaneamente a produtividade e a taxa de evapotranspiração de plantas, Calvache, Reichardt e Bacchi (1998) pesquisaram o déficit hídrico para o caso do feijoeiro. Dos dados analisados pôde-se concluir que a falta de água no período de enchimento dos grãos afeta diretamente a produtividade enquanto que a deficiência hídrica na fase vegetativa não interfere no índice de produtividade, podendo-se obter economia no fornecimento de água por irrigação.

Magalhães Filho et al. (2008), ao trabalharem com deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento radicular, concluíram que mesmo sob déficit hídrico e grande queda da produção fotossintética, as raízes permaneceram crescendo, possivelmente às expensas de substrato mobilizado de outros órgãos. Correia e Nogueira (2004) determinaram reduções na altura, número de folhas e área foliar das plantas e na matéria seca das folhas e dos caules. Enquanto que a suspensão total de rega promoveu redução na alocação de biomassa para as folhas e caules e aumento na alocação de biomassa para o sistema radicular.

2.2 Previsão do estresse hídrico

Duas formas de agrupar os modelos que descrevem o processo de extração de água no solo são: (1) modelos macroscópicos versus microscópicos e (2) modelos empíricos versus mecanísticos. Modelos macroscópicos consideram o sistema radicular como um todo, não modelando o fluxo de água às raízes individuais, enquanto os modelos microscópicos descrevem o fluxo de água às raízes individuais. Na subdivisão em empíricos e mecanísticos, empírico se refere a modelos baseados em experimentação apenas, sem a inclusão de um mecanismo de causa e efeito, enquanto mecanístico significa incluir um mecanismo físico de funcionamento.

Camargo, Hubbard e Flores-Mendoza (1994) trabalhando com sorgo, testaram e ajustaram um modelo macroscópico empírico de balanço hídrico baseado em informações de fenologia, edáficas e de estação meteorológica automática. O resultado do modelo mostrou pequena subestimativa do teor de água nas camadas superiores, pequena superestimativa nas camadas inferiores e boas estimativas nas intermediárias.

Garcia et al. (2000) compararam três modelos empíricos para determinação do estresse hídrico, utilizando alguns modelos: Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI), CWSI modificado e Método da Variabilidade da Temperatura do Dossel (CTV). Os autores concluíram que todos tiveram um comportamento sazonal semelhante, no que se refere ao estresse hídrico da cultura, entretanto, o modelo CWSI modificado indicou o início do estresse um dia antes dos demais modelos, constituindo-se o mais adequado para a determinação do início do estresse hídrico e monitoramento da irrigação, nas condições estudadas.

Do ponto de vista dos modelos mecanísticos, a condutividade hidráulica do solo e o potencial energético da água, ambos função do teor de água, determinam a facilidade com que uma raiz pode extraí-la e têm, portanto, um papel decisivo na previsão do estresse hídrico. Em função da transpiração e do contínuo de água dentro da planta, o potencial da água na superfície radicular se auto-regula para um valor menor que o da água no solo, criando um gradiente de potencial entre a água no solo e na raiz, provocando um fluxo de água em direção à raiz. Em condições de solo úmido, a condutividade hidráulica está alta e o gradiente de potencial requerido para a manutenção de um fluxo que atenda à demanda atmosférica é pequeno. Assim, a extração da água do solo procede sem a ocorrência de valores de potencial limitantes na superfície radicular. Os estômatos mantêm-se abertos e a transpiração ocorre à taxa máxima, não prejudicando a fotossíntese. Ao mesmo tempo, o teor de água no solo diminui. Essa fase da

depleção é chamada de *fase de taxa constante* ("constant rate phase") pelo fato de a transpiração relativa independer do teor de água ou do tempo. Enquanto o solo seca, o potencial na superfície radicular torna-se cada vez menor para assegurar o fluxo requerido de água. Num certo momento, correspondendo a determinadas condições hídricas (teor de água, potencial da água e condutividade hidráulica) o potencial na raiz atinge valores tão baixos que mecanismos fisiológicos na planta determinam o início do fechamento dos estômatos. A partir desse ponto, não havendo adição de água por chuva ou irrigação, condições limitantes vigorarão na superfície radicular e a transpiração irá diminuir com o tempo e com a redução do teor de água do solo. Portanto, essa fase de depleção, em condições de estresse hídrico e reduzida fotossíntese, é chamada de *fase de taxa decrescente* ("falling rate phase"), (FEDDES; RAATS, 2004).

Definindo condições de contorno específicas, soluções analíticas clássicas para o problema em escala de raiz singular (ou: microscópica) foram apresentadas por Gardner (1960) e Cowan (1965). Condições de contorno menos restritivas podem ser utilizadas em modelos numéricos implícitos, nos quais um problema de fluxo é descrito por um sistema de equações a ser resolvido interativamente. Esses modelos podem se adaptar a várias situações e requerem um tempo de computação relativamente pequeno. Um modelo desse tipo foi desenvolvido por Jong Van Lier, Metselaar e Van Dam (2006) para simular a extração da água por uma raiz singular.

Baseado na importância do conhecimento do fluxo de água no solo em direção a raiz, Jong Van Lier (1994), desenvolveu e validou um modelo microscópico mecanístico baseado na demanda transpiratória e na contabilização do fluxo de água na zona circundante à raiz. O autor concluiu que a curva de retenção de água e a relação condutividade hidráulica - teor de água são propriedades hidráulicas do solo importantes para a extração de água pelo sistema radicular. Este modelo apresentou limitações devido às simplificações no seu desenvolvimento. Estas se deram ao desconsiderar a variabilidade espacial e as variações na taxa de transpiração durante o dia, a suposição de que as raízes têm o mesmo raio e que a água em suas superfícies possui o mesmo potencial total e a hipótese de não haver interação entre as raízes ao extrair água do solo.

Jong Van Lier (1997) propôs um modelo, que avalia a forma de interferência de parâmetros ao determinar o nível crítico do teor de água do solo. Através do modelo pôde-se comprovar a existência de zonas de esgotamento de água próximo as raízes, o que interfere no potencial necessário na superfície das raízes para manter uma determinada taxa de transpiração.

O autor ressalta ainda que as propriedades hídricas, taxa de transpiração e a densidade radicular devem ser levadas em conta, ao se avaliar o nível crítico de umidade do solo.

O formato da curva que descreve a transpiração relativa em função do teor de água do solo durante a fase de taxa decrescente, a chamada *função de redução*, foi objeto de diversos estudos. A medição experimental da transpiração é complicada e a variabilidade temporal é uma fonte adicional de ruído, fazendo com que os resultados geralmente apresentam uma alta dispersão (p.e. MILLER; GARDNER, 1972; TOMAR; GHILDYAL, 1973; MEYER; GREEN, 1980; MORISON; GIFFORD, 1984; ROSENTHAL et al., 1987). Funções empíricas lineares com a média espacial do potencial matricial h (p.e. FEDDES et al., 1988) ou do teor de água θ (p.e. DOORENBOS; KASSAM, 1986) foram propostas, bem como relações empíricas nãolineares (MINHAS; PARIKH; SRINIVASAN, 1974; DOURADO NETO; JONG VAN LIER, 1993) e soluções analíticas (METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007).

Os modelos macroscópicos da extração de água consideram o sistema radicular como uma unidade estratificada extratora de água. Dardanelli et al. (2004), desenvolveram um modelo que incrementa a taxa máxima diária de absorção de água pelas raízes, limitando-a pelo teor de água no solo, que declina exponencialmente com o restante da água disponível no solo.

Gardner e Ehlig (1962) descreveram uma equação macroscópica para a extração de água pelas plantas. Estes autores demonstraram que a condutividade hidráulica limita o fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. Verificaram também que uma quantidade considerável de água se move para cima no próprio solo antes de ser absorvida pelas raízes. Molz e Remson (1970) desenvolveram outro modelo macroscópico empírico e mecanístico que descreve a extração de água pelas raízes e o movimento de água induzido através do solo numericamente. Outros trabalhos também foram realizados usando modelos dessa natureza como: Raats (1976); Belmans, Wesseling e Feddes (1983) e Feddes et al. (1976).

A interação entre a modelagem microscópica e macroscópica é pequena, devido à dificuldade de se juntar a descrição da depleção microscópica com informações sobre a geometria do sistema radicular. Atualmente um dos assuntos de especial interesse é a transformação do conhecimento na escala da raiz singular à escala do sistema radicular, o chamado "upscaling" (DARRAH et al., 2006). Assim, baseando-se num modelo microscópico desenvolvido, Jong Van Lier et al. (2008), propuseram um protocolo de cálculo para modelar a extração radicular em função da profundidade, levando em consideração as características hidráulicas das camadas, sua

densidade radicular e seu teor de água. O método de cálculo foi incorporado no modelo hidrológico SWAP (KROES; VAN DAM, 2003) e mostrou-se promissor quando comparado com dados de experimentos de longa duração do Canadá e da Alemanha. No entanto, faltaram dados experimentais obtidos em condições contrastantes específicas para poder fazer um teste mais rigoroso do desempenho do modelo.

Homaee, Feddes e Dirksen (2002) utilizaram seis diferentes funções de redução combinada para a água e estresse salino na extração da água macroscópica da raiz. Estes autores constataram que uma razão para a divergência entre o conteúdo de água simulado e o observado pode ser a influência das raízes e a concentração da solução do solo sobre a condutividade.

Os problemas experimentais para se verificar os modelos de extração radicular são, geralmente, grandes. Assim, a relação da taxa de extração de água do solo e o potencial da água no solo previsto pelo modelo desenvolvido por Herkelrath, Miller e Gardner (1977) foi comparada com os resultados de experimentos com raízes divididas. As taxas de extração prevista pela teoria foram oito vezes maiores do que os valores medidos. Um ajuste razoável entre a teoria e a experiência só pôde ser obtido, assumindo nos cálculos teóricos que a densidade do enraizamento foi 100 vezes menor do que o medido nas experiências.

2.3 Modelagem da partição da extração em condições estratificadas

O entendimento dos fatores que regem a extração da água do solo por plantas e a sua distribuição ao longo do sistema radicular em condições hidráulicas contrastantes é importante para aperfeiçoar o manejo da irrigação e para a utilização em modelos hidrológicos. Várias descrições, simulações e cálculo de absorção de água através das raízes em resposta ao estado da planta, do solo e da atmosfera têm sido desenvolvidos. Van Den Berg e Driessen (2002) examinaram métodos simples que podem ser aplicados em modelos de simulação de crescimento das culturas. Este estudo concluiu que as diferenças em relação à captação de água devem-se às diferentes interpretações dos dados e aplicação de idéias ultrapassadas. Além disso, os modelos que realizam cálculos sobre o solo enraizado como um todo parecem ser inadequados para modelagem da captação de água em solos com regime hídrico variado, ou seja, que têm uma variação expressiva no teor de água no tempo ou no espaço.

Gardner (1964) desenvolveu um modelo macroscópico que descreve a extração de água pelas raízes e afirma que a distribuição relativa de raízes em profundidade e a água retendo e

transmitindo propriedades do solo determinam as principais características da captação de água. Novak (1987) desenvolveu um método simples para calcular a distribuição da extração de água do solo pelas raízes que é determinada principalmente pela distribuição da área de superfície das raízes. Este autor demonstrou experimentalmente que, sob condições não limitantes existe uma boa correlação entre a extração da água do solo e a massa das raízes.

Pela lógica, a planta deve procurar água em camadas mais úmidas preferencialmente, reduzindo a extração das mais secas. Várias tentativas têm sido feitas para incorporar empiricamente essa compensação em modelos de extração de água pela raiz. Exemplos incluem as sub-rotinas que descrevem a extração da água do solo dos modelos CERES (RITCHIE, 1985) e EPIC (WILLIAMS, 1995), como discutido por Li, De Jong e Boisvert (2001a); os modelos de Lai e Katul (2000) e Li, De Jong e Boisvert (2001b), que propuseram mecanismos empíricos compensatórios que foram posteriormente testados por Braud, Varado e Olioso (2005), tendo sido verificados capazes de reproduzir com precisão dados experimentais; o modelo de Li, De Jong e Ramankutty (2006), que especifica extração de água baseada na transpiração potencial e na média geométrica dos valores de potencial e teor de água e requer menos constantes empíricas, bem como o modelo de extração com compensação proposto por Jarvis (1989) e modificado por Simunek, Van Genuchten e Sejna (2005) para o modelo Hydrus-1D.

Uma abordagem mecanística do problema de compensação é descrita em Jong Van Lier et al. (2008). Esses autores ressaltam que na abordagem da modelagem macroscópica é importante considerar que a exploração do solo e o volume de raízes das plantas são afetados pela heterogeneidade. O sistema radicular apresenta variabilidade em seu comprimento, densidade, diâmetro, idade e atividade que variam com a profundidade, enquanto que o teor de água, status de energia e funções hidráulicas também se alteram com a profundidade. A heterogeneidade do solo e os fatores da raiz levam a taxas de absorção que variam com a profundidade e o tempo.

2.4 Experimentação com lisímetro dividido

Uma forma experimental de testar modelos de extração da água pelo sistema radicular, especificamente a descrição da preferência da planta por extrair água de camadas mais úmidas, reduzindo a extração das mais secas (a chamada "compensação"), é pela imposição de condições contrastantes específicas em experimentos com lisímetro dividido (em inglês "split-pot"): uma planta cresce num recipiente especial onde seu sistema radicular é dividido em duas ou mais

partes, separadas fisicamente e monitoradas. Estudos com esse tipo de ambiente artificial foram realizados, por exemplo, por Lascano e Van Bavel (1984), Kosola e Eissenstat (1994), Hussain et al. (1999) e Espeleta, Eissenstat e Graham (2004).

O estudo com sistemas de "split-root" fornece informações quantitativas sobre a forma como diferentes condições na zona radicular de uma única planta afetam o crescimento da raiz, a extração da água e o início do crescimento, (LONKERD; RITCHIE, 1979).

A distribuição da água na planta após sua absorção é algo fundamental para o bom desempenho das atividades fisiológicas e consequentemente produtivas da planta. Kirkham (1983), trabalhando com um modelo físico em um sistema "split-root" baseado na lei de Darcy e Ohm, pôde mostrar que a água pode passar do lado úmido de um sistema radicular para o lado seco.

Gallardo, Turner e Ludwig (1994) utilizaram a técnica de experimentação com "splitroot" ao comparar plantas com restrição de água em parte dos seus sistemas radiculares. Estes autores constataram que em plantas com até 50% de suas raízes em ambiente com restrição hídrica, não ocorreu redução da condutância estomática, fotossíntese líquida, ou do crescimento da planta. Outros estudos também com o uso do "split-root" foram realizados como, por exemplo, Erickson e Kirkham (1979); Zhang e Kirkham (1995); Raymond e Gingrich (1966); Papadopoulos e Rendig (1983); Steven e Todd (1997).

A medição dos potenciais hídricos na interface solo-raiz e xilema da raiz de uma planta transpirando permanece um problema desafiador. A técnica de divisão de raiz ("split-root") descrita por Adeoye e Rawlins (1981) permite medir o potencial da água na raiz no ponto em que essa se junta à raiz principal do sistema.

2.5 Análise da densidade radicular

O estudo de raízes é muito importante para a compreensão dos diversos fenômenos de crescimento e desenvolvimento da parte aérea, mas exige procedimentos criteriosos, pois, seus resultados são influenciados pela variabilidade físico-química do solo (VASCONCELOS et al., 2003). Grande parte dos estudos das raízes em condições de campo é de natureza destrutiva, tanto para as plantas, como para o ambiente edáfico imediato. A utilização de métodos de extração de volumes fixos de solo e raiz e as técnicas de análise digital apresentam-se como uma ferramenta

precisa e confiável, porém os dados disponíveis estão limitados a avaliações pontuais (BRASIL; ZONTA; OLIVEIRA, 2007).

A descrição quantitativa de sistemas radiculares pode ser feita de várias maneiras. Uma delas é a análise da variação da densidade de enraizamento, expressa, por exemplo, em comprimento de raízes por volume de solo, como fizeram Page e Gerwitz (1974). Fante Jr. et al. (1994) compararam três métodos de avaliação do sistema radicular. A conclusão do estudo mostrou o método do trado ser o mais adequado para avaliação simples, rápida e barata, contudo, insuficiente para caracterização completa do sistema radicular. O método do cilindro volumétrico permite um estudo quase que pontual da distribuição radicular através de um número mais significativo de grandezas. O processamento de imagens se apresentou como uma ferramenta muito poderosa para o estudo detalhado do sistema radicular.

A técnica de análise de imagens para a caracterização radicular tem sido cada vez mais usada. Imagens são analisadas por softwares específicos que quantificam o comprimento, área e densidade do sistema radicular. O SIARCS, (Sistema Integrado para Análises de Raízes e Cobertura do Solo), desenvolvido pela EMBRAPA é um programa usado com estes fins. Exemplos de estudos desenvolvidos com utilização deste software estão descritos nos trabalhos de Bassoi et al. (1994); Neves et al. (2000); Sousa et al. (2002) e Cintra, Resende e Leal (2008). Conforme relatado em Comunicado Técnico, 58 (RODRIGUES; ALVES; REIS, 2003) um problema encontrado ao trabalhar com imagens digitais no software SIARCS ocorre nos casos de raízes finas, claras e delicadas que inviabilizam sua leitura pelo scanner, prejudicando o processamento nos programas de análise radicular.

Santos (1997) trabalhando com distribuição e absorção de água pelo sistema radicular utilizou imagens de vídeo e o software SIARCS na determinação dos parâmetros radiculares. As imagens foram digitalizadas e tratadas com objetivo de variar o contraste, brilho e corrigir distorções transformando-as em tons de cinza. Esta técnica também foi empregada por Fante Jr. et al. (1999) para melhorar a qualidade de resolução das imagens. Vasconcelos et al. (2003) usaram tinta spray branca no perfil do solo para aumentar o contraste das raízes com o solo nas imagens de vídeo antes de serem digitalizadas e processadas no programa SIARCS.

Outro programa usado em análises de imagens digitalizadas de raízes é o software "Rootedge". Coelho et al. (2001) utilizando este método determinaram as características geométricas: área, comprimento e diâmetro de raízes digitalizadas em scanner. Os dados de

comprimento permitiram a determinação da densidade de comprimento de raízes. Com estas informações pôde-se indicar onde ocorre maior atividade do sistema radicular.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, solo e clima

O estudo experimental foi desenvolvido na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP), campus de Piracicaba, Estado de São Paulo, a uma altitude de 546 m acima do nível do mar, com coordenadas geográficas de 22° 42′ 30″ de latitude sul, 47° 38′ 00″ de longitude oeste. O período experimental compreendeu os meses de março a junho de 2008. Plantas de sorgo foram cultivadas em lisímetros de drenagem livre acondicionados em casa de vegetação.

De acordo a classificação de Köppen, o clima da região em que foi desenvolvido o estudo é do tipo Cwa: subtropical quente, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio inferior a 18°C

3.2 Unidade experimental: o lisímetro

Para poder medir a extração de água do solo por raízes, impondo condições contrastantes de teor de água foi criado um ambiente artificial em que a ocorrência de fluxo de água entre as camadas que ocorre normalmente no campo foi evitado: lisímetros de ferro com livre drenagem, divididos longitudinalmente em dois compartimentos, A e B, (tipo "split-pot" - Figuras 1) com dimensões internas de 0,5 x 0,46 x 0,3 m. A divisória central de cada recipiente teve suas pontas dobradas e furadas, onde foram fixadas borrachas que em seguida foram parafusadas nas laterais, de modo que não houvesse passagem de água de um compartimento para outro. Na base de cada unidade experimental foi feita uma abertura para drenagem da água. Em seguida foram colocadas uma camada de 4 cm de brita e uma grade de metal. Para segurar a terra dentro dos recipientes foram colocadas telas de náilon, de maneira que não houvesse perda do material de solo pelo fundo dos recipientes.

Quatro dessas unidades experimentais foram construídas e colocadas sobre barras de cimento e nivelados com auxilio de um nível de bolha, evitando o fluxo direcional da água para um dos compartimentos dos lisímetros no momento da irrigação.

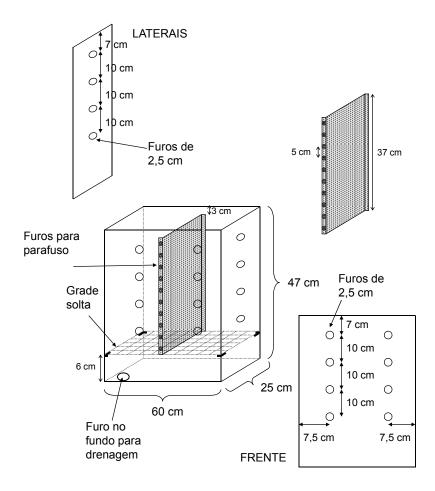


Figura 1 - Desenho esquemático do lisímetro tipo "split-pot", mostrando dimensões e divisão interna

3.3 Preenchimento dos lisímetros

O material utilizado no preenchimento dos lisímetros foi retirado do horizonte A de um solo de textura média, (um Latossolo vermelho-amarelo do campus "Luiz de Queiroz"). Após a coleta, o material foi seco e peneirado.

O preenchimento das unidades experimentais foi realizado de maneira mais homogênea possível, atingindo uma densidade de aproximadamente 1400 kg m⁻³. A mesma densidade foi utilizada posteriormente na determinação das propriedades hidráulicas do solo. A massa do material de solo utilizada em cada compartimento do lisímetro foi de 38 kg, calculada com base no teor de água da terra seca ao ar. Este teor de água foi determinado à base de peso, utilizando três amostras indeformadas coletadas em diferentes pontos do material de solo.

3.4 Instalação dos sensores

Instrumentos de medição (sondas de TDR para medição do teor de água e tensiômetros convencionais utilizados para decidir sobre o momento de irrigação) foram inseridos em ambos os compartimentos dos lisímetros. Foram usados quatro guias de onda do TDR em cada compartimento dos lisímetros nas camadas de 4, 14, 24 e 34 cm abaixo da superfície. Estes sensores foram inseridos à medida que o solo ia sendo posto nos lisímetros, instalados na diagonal, de maneira a não sofrer interferência das bordas dos compartimentos durante as leituras (Figura 2). As saídas dos cabos nos lisímetros foram vedadas com borrachas para não ocorrer perda de água pelos orifícios. Junto às unidades experimentais foi instalado um computador que era conectado ao TDR para realização das leituras destes sensores.

Após o preenchimento dos lisímetros aplicou-se um volume de 5 litros (aproximadamente 70 mm) de água em cada compartimento, deixando-os em repouso por uma semana para assentamento do material. A seguir, três tensiômetros foram instalados em cada compartimento do lisímetro, com suas cápsulas porosas nas profundidades de 9, 19, e 29 cm abaixo da superfície do solo, entre os guias de onda de maneira a não interferir nos resultados apresentados pelo TDR. A cápsula porosa estava colada numa extremidade de um tubo de PVC de igual diâmetro. Na outra extremidade desse tubo, que passava para o lado de fora do lisímetro através de um orifício, encontrava-se uma tampa com rosca e uma saída para o manômetro de mercúrio. Nos orifícios aplicou-se cola silicone para vedá-los e evitar a perda de água. A Figura 3 mostra a disposição dos TDR e tensiômetros instalados nas unidades experimentais.

Na mesma Figura 3 verificam-se os suportes de madeira onde foram instaladas posteriormente as cubetas com mercúrio (líquido manométrico). Os espaguetes foram conectados em cada cubeta e fluxaram-se os tensiômetros com o auxílio de uma piceta, dando inicio ao funcionamento.



Figura 2 - Localização do guia de onda do TDR em um dos compartimentos do lisímetro, durante o preenchimento com terra



Figura 3 - Disposição dos sensores (tensiômetros e TDR) no lisímetro montado

3.5 Calibração do TDR

A calibração do TDR, ou seja, a obtenção da relação entre o valor da constante dielétrica lido pelo TDR e o teor de água do solo foi realizada por observações em uma caixa de isopor com solo acondicionado na mesma densidade encontrada nos lisímetros. Inicialmente foram instalados

dois guias de onda e aplicada uma lâmina de água até que o solo apresentou-se com um teor de água de aproximadamente $0,05~\text{m}^3~\text{m}^3$. Diariamente a massa da caixa com solo era determinada por pesagem e a constante dielétrica do solo úmido (K_a) em cada sensor era lida. A seguir, acrescentou-se água suficiente para elevar o teor de água em aproximadamente $0,02~\text{m}^3~\text{m}^{-3}$. Assim, entre as leituras e aplicação da água havia sempre um período de 24 horas, permitindo a uniformização da distribuição da água no solo da caixa. Através do ajuste dos dados da constante dielétrica do solo e do teor de água a base de volume (θ), este obtido com o conhecimento da massa do material de solo e massa da água, foi possível estabelecer que, para o TDR em combinação com o solo:

$$\theta = 0.008035K_a + 0.057191$$
 [1]

onde K_a é o valor da leitura do sensor, a constante dielétrica. O ajuste foi feito com 44 observações (n = 44), na faixa de $3.9 \le K_a \le 23.8$; o coeficiente de ajuste (R^2) da equação aos dados foi 0.9776.

3.6 Transplante e divisão do sistema radicular

Cada lisímetro foi populado com duas plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), cujos sistemas radiculares foram divididos entre os compartimentos do lisímetro (Figura 4). Para isso, sementes de sorgo, variedade Catissorgo, foram semeadas e cultivadas em vasos plásticos. Aos 33 dias após a germinação, duas plântulas foram transplantadas para cada lisímetro. Esta operação foi realizada no final da tarde com temperatura amena, de modo a minimizar os danos causados pelo transplante. As plantas foram retiradas cuidadosamente dos vasos separando as raízes do material de solo com o auxilio de uma mangueira e água corrente. As raízes foram divididas meio a meio entre os compartimentos (Figura 5).

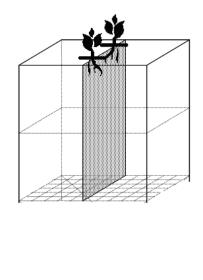


Figura 4 - Desenho esquemático do lisímetro, mostrando disposição das plantas



Figura 5 - Divisão de raízes de uma planta de sorgo no lisímetro no momento do transplante

3.7 Adubação das unidades experimentais

O solo no lisímetro recebeu adubação de cobertura baseado em análise química de amostras do material de solo (Tabela 1), analisadas no Laboratório do Departamento de Ciência

do Solo da ESALQ/USP. Baseado na análise de macronutrientes e micronutrientes calculou-se a adubação adequada para um bom desenvolvimento da planta, sendo: 47,2 g de Superfosfato Simples/vaso, 3,11 g de Uréia/vaso, 9,83 g de Cloreto de Potássio/vaso e 5,2 g de Calcário/vaso.

Tabela 1 - Análise química do solo utilizado no experimento

Análise	Onímica	de Solo.	- Macro	onutrientes
Tillalisc	Oumnea	uc boio -	IVIACIV	Junulicinos

рН	M.O	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	Т	V	m
$CaCl_2$	g dm ⁻³	mg	dm ⁻³			m	ımol _c dr	n ⁻³			9,	6
5,0	22	5	9	0,9	16	8	0	22	24,9	46,9	53	0

Análise Química de Solo - Micronutrientes

В	Cu	Fe	Mn	Zn
		mg dm ⁻³		
0,26	0,7	30	13,5	2,2

A superfície do solo foi coberta por uma camada de areia muito grossa e um filme plástico transparente, de modo a evitar a evaporação superfícial. O teor de água foi mantido em nível adequado para o desenvolvimento das plantas, num potencial matricial ao redor de -2 m.

3.8 Controle de pragas

Em algumas épocas durante a realização do experimento ocorreu o surgimento nas plantas da lagarta do cartucho. Esta praga, quando detectada em pequenas quantidades era retirada manualmente. Não sendo suficiente a retirada manual, aplicava-se o defensivo "Lorsban" seguindo recomendação do fabricante (Dow Agrosciences Industrial).

3.9 Monitoramento do teor de água

Transplantadas e adubadas, as plantas nos lisímetros receberam irrigações diariamente durante o período de crescimento e desenvolvimento até atingirem o período de florescimento, quando iniciaram os tratamentos e os monitoramentos com os sensores instalados (Figura 6).

Ao longo do período de monitoramento no lisímetro, as leituras da constante dielétrica foram registradas pelo TDR, modelo TRASE-BE conectado a um microcomputador e aos sensores com uma extensão coaxial, com comprimento de 10 m. As observações foram feitas três vezes ao dia: logo de manhã, no horário mais quente do dia, em torno das 13 horas e no fim do dia, às 17 horas. A ascensão de mercúrio nos manômetros dos tensiômetros foi lida

simultaneamente com auxílio de uma régua, sendo as leituras do TDR e dos tensiômetros completadas num intervalo de tempo de no máximo uma hora.

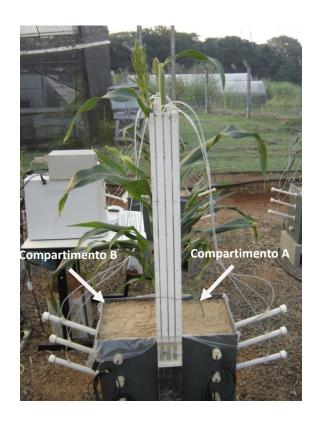


Figura 6 - Monitoramento do teor de água nos compartimentos A e B do lisímetro

3.10 Manejo de irrigação: aplicação de estresse

Um dos períodos mais sensíveis à deficiência hídrica no sorgo é o florescimento. Nesse estádio de desenvolvimento o fornecimento de água foi interrompido em um dos compartimentos dos lisímetros, enquanto os outros compartimentos continuaram recebendo água normalmente. A irrigação no lisímetro era feita após as leituras do período do dia. Com o uso de uma piceta graduada, a água era posta de maneira que não transbordasse pela divisão entre os compartimentos. O critério usado para irrigação era baseado na leitura do tensiômetro instalado na profundidade de 4 cm abaixo da superfície. A decisão de irrigar era tomada assim que a altura da coluna de mercúrio desses tensiômetros atingisse 20 cm em relação ao nível de mercúrio na cubeta

Como mostrado na Figura 7, o manejo da irrigação adotado foi constituído de quatro fases: I - irrigação apenas do compartimento B e secagem do compartimento A (07/05 – 25/05);

II - secagem dos dois compartimentos (26/05 - 05/06); III - irrigação do compartimento A e secagem do compartimento B (06/06 - 14/06); IV - secagem dos dois compartimentos (15/06 - 22/06). Na fase I, o critério para a irrigação foi a leitura do tensiômetro mais superficial do compartimento irrigado (B): quando este atingiu a altura de 20 cm de mercúrio, aplicava-se 1 litro de água (~ 13 mm) ou, a partir de 21/05, 1,5 litros (20 mm). Na fase III foi feita uma irrigação inicial fracionada em três dias. A seguir foi usado o mesmo critério da fase I, dessa vez observando o tensiômetro mais superficial do compartimento (A).

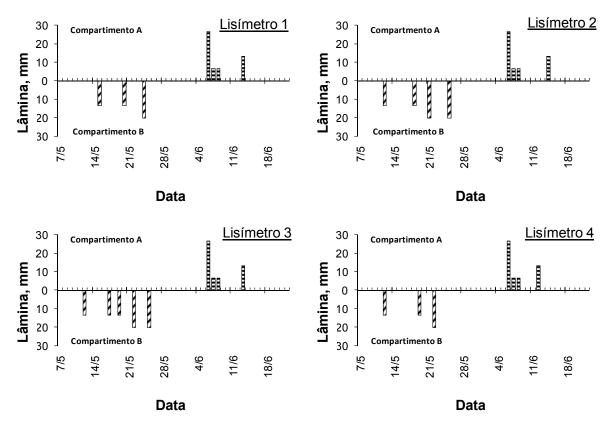


Figura 7 - Lâmina de irrigação (mm) em função da data, para os compartimentos A e B dos quatro lisímetros

A figura 8 mostra os índices de temperatura, umidade relativa e precipitação retirada da base de dados da estação automática do posto meteorológico do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ - USP, durante o período de monitoramento dos lisímetros. Nesta figura observa-se que durante alguns dias com precipitação significativa no fim de maio / início de junho, a amplitude da variação diária da temperatura e umidade relativa foi menor do que nos demais dias. Observa-se, ainda, que a umidade relativa no período atingiu 100% em quase todas as madrugadas do período.

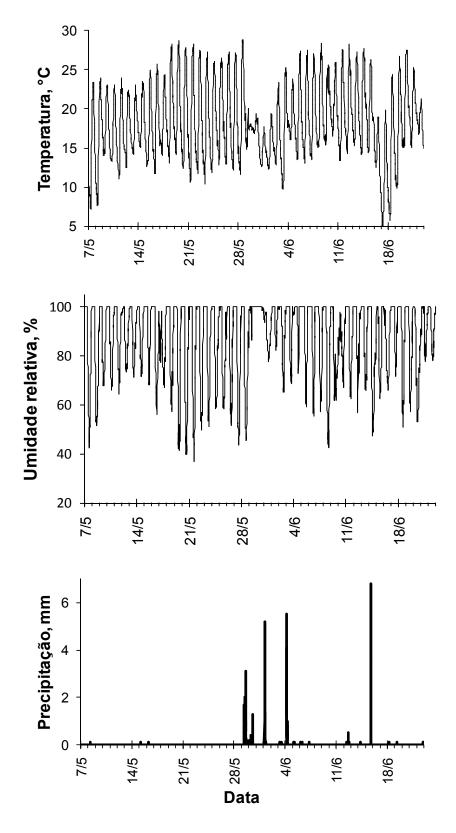


Figura 8 - Temperatura, umidade relativa e precipitação registradas no observatório meteorológico da ESALQ/USP durante a o período de coletas de dados em 2008

3.11 Aspectos teóricos

Definindo o potencial de fluxo matricial $(M, m^2 d^{-1})$ como a condutividade hidráulica $(K(h), m d^{-1})$ integrada sobre um intervalo de potencial matricial h (m) e tomando o ponto de murcha permanente em termos de potencial matricial (h_w, m) como limite inferior da integração:

$$M = \int_{h}^{h} K(h)dh$$
 [2]

Jong Van Lier et al. (2008) demonstraram que a extração radicular S_z (m³ m⁻³ d⁻¹) por unidade de profundidade na camada z é descrito por:

$$S_z = \sigma_z \left(\overline{M}_z - M_0 \right) \tag{3}$$

onde \overline{M}_z é o potencial de fluxo matricial correspondente ao teor médio de água na camada, M_0 é o potencial de fluxo matricial na superfície radicular e σ_z (m⁻²) é um fator de ponderação definido em função do raio das raízes (r_0 , m) e da distância média entre as raízes na camada z ($r_{m,z}$, m) como:

$$\sigma_z = \frac{4}{r_0^2 - a^2 r_{m,z}^2 + 2(r_{m,z}^2 + r_0^2) \ln \frac{a r_{m,z}}{r_0}}$$
[4]

Nessa equação, a, função da camada z, equivale a

$$a_z = \frac{\overline{r}_z}{r_{mz}} \tag{5}$$

onde $\bar{r}_z(m)$ é a distância da raiz onde ocorre o teor de água médio da camada. Foi demonstrado por modelagem numérica que os valores de a_z variam muito pouco entre camadas e condições, sendo iguais ou próximos a 0,53 (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006), valor a ser adotado nessa dissertação.

Supondo que o valor de M_0 seja igual nos dois compartimentos, ou seja, na superfície de todas as raízes vigora o mesmo valor de M, uma equação análoga à eq. (3) foi utilizada na modelagem da extração radicular dos compartimentos dos lisímetros:

$$S_c = \sigma_c f(\overline{M}_c - M_0)$$
 [6]

onde S_c (m³ m³ d¹¹) é a extração radicular do compartimento, σ_c (m²²) é definido em analogia à eq. (4), \overline{M}_c é o potencial de fluxo matricial correspondente ao teor médio de água no compartimento, e f é um fator empírico de eficiência radicular para compensar pela atividade e distribuição radicular.

Uma expressão para o calculo de M_0 foi deduzida a partir da eq. (6):

$$M_0 = \frac{\sigma_A M_A + \sigma_B M_B}{\sigma_A + \sigma_B} - \frac{S_A + S_B}{2}$$
 [7]

onde os subscritos A e B se referem aos compartimentos A e B, respectivamente.

3.12 Condução experimental: caracterização física do solo

3.12.1 Retenção, condução e potencial de fluxo matricial

O material de solo utilizado para o preenchimento dos lisímetros foi analisado conforme metodologia padrão quanto à sua propriedade de retenção de água no Laboratório de Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP.

Amostras indeformadas do material de solo foram coletadas no recipiente usado para a calibração do TDR, com a mesma densidade utilizada nos lisímetros. Três anéis de aço inox, com 0,05 m de diâmetro e 0,03 m de altura foram usados para retirar as amostras. Nas extremidades inferiores de cada anel foi fixado um pedaço de tecido circular preso por uma fita adesiva resistente a água. Em seguida, as amostras foram saturadas e levadas para a mesa de tensão, aplicando-se tensões de 0,1,0,2,0,4 e 1 m. Terminado esta fase as amostras foram levadas para a câmara de pressão de Richards onde foram submetidas a pressões de 3,5,10,50 e 150 m. Após atingir o equilíbrio em cada tensão as amostras foram pesadas para posterior cálculo do teor de água θ (m³ m-³) referente a cada sucção.

Aos dados de retenção assim obtidos foi ajustada a equação de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m} \quad \text{ou} \quad \Theta = \left[1 + |\alpha h|^n\right]^{-m}$$
 [8]

sendo $\Theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, onde θ_r (teor de água residual, m³ m⁻³), θ_s (teor de água de saturação, m³ m⁻³), α (m⁻¹), $m \in n$ são os parâmetros empíricos da equação.

Para calcular o |h| a partir de valores observados de θ foi utilizada o inverso da eq. (8):

$$|h| = \frac{\left[\Theta^{-\frac{1}{m}} - 1\right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha}$$
 [9]

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado foi utilizado o método experimental descrito por Wind (1968), realizado no laboratório de física do solo de ESG/WUR - Holanda. Os cilindros utilizados para conter o solo tinham, aproximadamente, 0,103 m de diâmetro, 0,080 m de altura e 4 furos de 0,004 m de diâmetro ao longo de sua altura. Antes da análise no laboratório, os cilindros com terra foram colocados em água para saturar por capilaridade, durante 24 horas. O dispositivo de medida do potencial de água destinado ao funcionamento do método foi constituído de um conjunto de quatro microtensiômetros. Cada um dos microtensiômetros foi formado por uma cerâmica porosa (0,02 m de comprimento e 0,0022 m de diâmetro), ligada a um sensor de pressão por meio de um tubo em náilon. O cilindro de solo foi colocado sobre uma placa de PVC e vedado com fita de vedação. Então, foi disposto sobre a caixa de sensores e o conjunto foi colocado sobre uma balança de precisão. Introduziu-se, em seguida, a cerâmica porosa e o capilar em 4 alturas diferentes do cilindro. Os sensores de pressão foram conectados a um multiplexador, associado a uma central de aquisição de dados. O software foi programado para registrar os sinais dos sensores e da balança a cada 60 minutos. Uma foto desse conjunto experimental pode ser observada na Figura 9.

Por modelagem inversa obtêm-se assim pares de dados K - h. Ajustou-se a seguinte expressão a esses dados experimentais:

$$K = K_s \left(\frac{|h_b|}{|h|}\right)^b; |h| \ge |h_b|$$

$$K = K_s; |h| < |h_b|$$
[10]

onde b e h_b são parâmetros empíricos da condutividade hidráulica do material de solo utilizado no experimento.

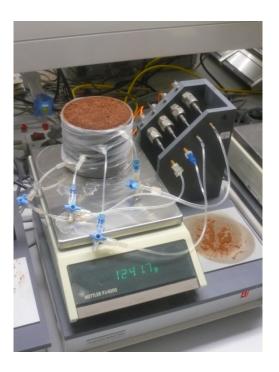


Figura 9 – Dispositivo experimental utilizado na análise da condutividade hidráulica do material de solo (Método de Wind (1968))

Combinando-se as eq. (2) e (10), o potencial de fluxo matricial M pôde ser estimado com base no valor da condutividade hidráulica do solo não saturado (K);

$$M = \frac{K_{s} |h_{b}|^{b}}{b-1} \left[|h|^{1-b} - |h_{w}^{1-b}| |h| \ge |h_{b}| \right]$$

$$M = \frac{K_{s} |h_{b}|^{b}}{b-1} \left[|h_{b}|^{1-b} - |h_{w}|^{1-b} \right] + \left[|h_{b}| - |h| \right] K_{s}; |h| < |h_{b}|$$
[11]

3.12.2 Avaliação do desempenho experimental

Para avaliar o desempenho do modelo de extração radicular eq. (6) compararam-se os n dados observados de teor de água (θ_{obs}) com os previstos pelo modelo (θ_{mod}), utilizando-se o *Root Mean Square Error* – *RMSE*, que é a raiz do erro médio quadrático, dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{K=1}^{n} (\theta_{\text{mod},K} - \theta_{obs,K})^2}$$
 [12]

onde valores elevados de *RMSE* indicam alto nível de discrepância entre simulações e observações. O *RMSE* tem as mesmas dimensões das simulações e observações, podendo ser considerado a magnitude típica dos erros das simulações.

3.13 Parâmetros radiculares

Após término do experimento, os lisímetros foram desmontados (Figura 10 e 11) e em ambos os compartimentos, nas profundidades de medição, amostras foram coletadas e analisadas quanto à densidade radicular. Cada compartimento da unidade experimental foi dividido em três camadas de 10 cm e uma camada (inferior) de 8 cm. O material de solo de cada uma foi peneirado de modo que pudessem ser retiradas as raízes. As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos com uma solução de álcool a 30% em baixa temperatura. As raízes foram levadas para estufa por 48 horas e pesadas em seguida determinando as massas de cada compartimento da unidade experimental.



Figura 10 e 11 - Desmontagem da unidade experimental e detalhes do sistema radicular

Conhecendo-se a massa M_r (kg), densidade do tecido radicular ρ_r (kg m⁻³) e o raio r_0 (m) das raízes pôde-se calcular o comprimento de raízes (L_r) em cada compartimento do lisímetro, através da eq. (13):

$$L_r = \frac{M_r}{\pi r_0^2 \rho_r} \tag{13}$$

O valor de ρ_r usado foi de 500 kg m⁻³, em conformidade por valores reportados por Craine e Lee (2003) e Valenzuela-Estrada (2008). Tomando como valores de entrada o comprimento e a massa das raízes, foi possível determinar a densidade radicular R (m³ m⁻³) de cada compartimento do lisímetro, através da eq. (14):

$$R = \frac{L_r}{V_s} \tag{14}$$

onde V_s (m³) é o volume do solo do respectivo compartimento da unidade experimental.

A meia-distância média entre as raízes r_m (m) pode ser calculada com base na densidade radicular R:

$$r_{m} = \sqrt{\frac{1}{\pi R}}$$
 [15]

O conjunto dos parâmetros a, r_0 e r_m permitiu estimar o valor da variável σ_c (eq. (4)), para os respectivos compartimentos dos lisímetros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva de retenção

Os teores de água obtidos para o material de solo em estudo, para os 10 potenciais aplicados, estão descritos na Tabela 2, assim como a média destes teores e seus respectivos desvios padrão. A curva de retenção de água, definida como a relação entre o potencial matricial e o teor de água presente no solo, é considerada um elemento chave na interpretação do comportamento e propriedades dos solos não saturados. A curva ajustada aos pares de dados θ - h está representada na Figura 12. Pode-se observar uma perda de água insignificante entre a saturação (h=0) e o potencial matricial de aproximadamente -0,1 m, que equivale à pressão de entrada de ar; um decréscimo máximo ao redor do potencial matricial de -1 m, e teores de água inferiores a 0,01 m³ m³ para o potencial de -150 m, valores esses típicos para o material em questão, de textura média.

Tabela 2 - Teor de água a base de volume obtido do material de solo usado no experimento para os potenciais matriciais aplicados

Potencial matricial <i>h</i> , m		Teor de água θ , m ³ m ⁻³						
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão		
	0	0,454	0,457	0,445	0,452	0,0061		
Mesa	-0,1	0,439	0,442	0,425	0,435	0,0086		
de	-0,2	0,417	0,420	0,404	0,413	0,0087		
Tensão	-0,4	0,373	0,385	0,361	0,373	0,0120		
	-1	0,262	0,268	0,245	0,258	0,0121		
Câmara	-3	0,210	0,226	0,190	0,209	0,0179		
de	-5	0,180	0,179	0,155	0,172	0,0141		
Pressão	-10	0,118	0,122	0,109	0,116	0,0067		
de	-50	0,092	0,093	0,090	0,092	0,0015		
Richards	-150	0,084	0,086	0,083	0,084	0,0019		

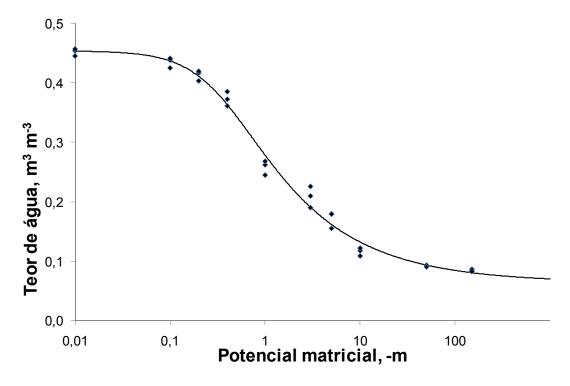


Figura 12 - Curva de Retenção do material de solo usado no experimento. A linha é resultado do ajuste da eq. (8) de Van Genuchten (1980) aos teores de água observados (pontos)

O ajuste da eq. (8) de Van Genuchten (1980) aos dados experimentais resultou nos parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros da curva de retenção (modelo de Van Genuchten (1980) - eq. (8)) para o solo utilizado no experimento

Parâmetro	Valor		
θ_r , m ³ m ⁻³	0,0646		
θ_s , m ³ m ⁻³	0,4542		
α , m ⁻¹	2,7457		
n	1,5268		

4.2 Condutividade hidráulica

Os resultados experimentais obtidos para a condutividade hidráulica K em função do potencial matricial h são representados na Figura 13, juntos com a eq. (10) com os parâmetros apresentados na Tabela 4. A ordem de grandeza do valor de K_S encontrado está de acordo com

relatos em literatura variando da ordem de 0,01 a 1 m d^{-1} . A pressão de entrada do ar (h_b) foi estimada em 0,4211 m, da mesma ordem que o valor demonstrado pela curva de retenção.

Conforme mencionado, a relação entre condutividade hidráulica e o teor de água no solo é uma propriedade hidráulica importante para a extração de água do solo pelo sistema radicular. Devido ao consumo de água pela planta durante a secagem do solo, o potencial que mantém o fluxo de água em direção ao sistema radicular diminui. Esta redução ocorre com maior velocidade em solos com condutividade hidráulica baixa, fato também descrito por Jong Van Lier (1994).

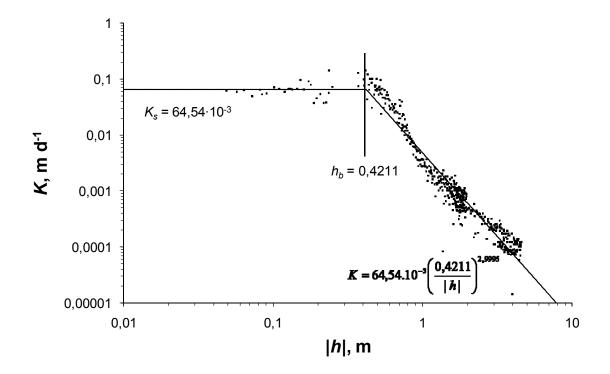


Figura 13 - Condutividade hidráulica (*K*, m d⁻¹) do material de solo usado no experimento em função do módulo do potencial matricial (|*h*|, m). Dados experimentais (pontos), obtidos através do método de Wind (1968). Linhas sólidas representam a eq. (10) ajustada

Os parâmetros da Tabela 4 foram empregados diretamente no cálculo do potencial de fluxo matricial eq. (11) essencial na determinação da extração radicular de água pelo modelo. A curva M - h, para o solo em questão está representada na Figura 14.

Tabela 4 - Parâmetros da eq. (10) para a estimativa da condutividade hidráulica não-saturado do material de solo utilizado no experimento

Parâmetro	Valor
b	2,9995
K_s , m d ⁻¹	0,0645
$ h_b $, m	0,4211

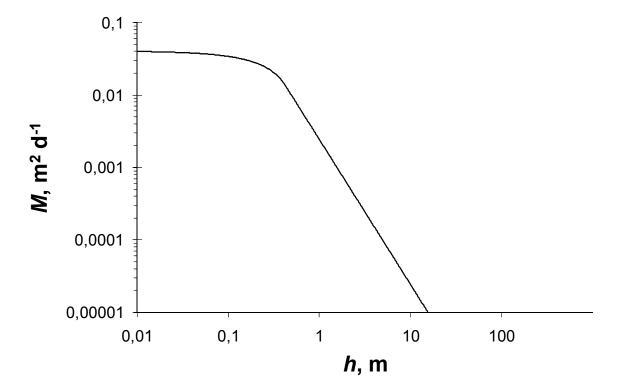


Figura 14 - Potencial de fluxo matricial $(M, m^2 d^{-1})$ em função do potencial matricial (h, -m) para o material de solo utilizado no experimento

4.3 Caracterização do sistema radicular

A massa M, densidade R e comprimento L do sistema radicular encontrados estão relatados na Tabela 5. Valores maiores ocorreram nos lisímetros 2 e 3 quando comparados aos lisímetros 1 e 4. Isso pode estar ligado ao maior desenvolvimento das plantas nas unidades 2 e 3. A distância média entre raízes r_m , também descrito nesta tabela foi maior nos lisímetros 1 e 4, pois é inversamente proporcional a densidade do sistema radicular (eq. (15)). Os valores do

parâmetro σ foram calculados pela eq. (4) com base em dados radiculares e utilizados no cálculo da extração final pelo modelo.

Tabela 5 - Massa radicular (M, g), densidade radicular $(R, m m^{-3})$, meia-distância média entre raízes (r_m, mm) , comprimento radicular (L, m) e parâmetro σ (m^{-2}) de cada compartimento da unidade experimental

	Compartimento A					Compartimento B				
	<i>M</i> , g	<i>R</i> , m m ⁻³	r_m , mm	L, m	σ , m ⁻²	<i>M</i> , g	R, m m ⁻³	r_m , mm	L, m	σ , m ⁻²
Lisímetro 1	7,6	1878	13,0	53,5	13698	8,9	2221	12,0	63,3	16193
Lisímetro 2	12,6	3136	10,1	89,4	22841	8,4	2096	12,3	59,7	15287
Lisímetro 3	11,1	2744	10,8	78,2	19996	11,2	2781	10,7	79,3	20267
Lisímetro 4	8,5	2119	12,3	60,4	15450	8,4	2078	12,4	59,2	15155

4.4 Resultados do experimento com o lisímetro

As Figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam os valores do teor de água θ , potencial matricial h e potencial de fluxo matricial M nos compartimentos A e B para os lisímetros 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Para as quatro unidades experimentais, os valores do teor de água variaram devido às lâminas de irrigação aplicadas e a extração de água pela planta. Assim, observam-se claramente as irrigações aplicadas ao compartimento B dos 4 lisímetros no período inicial, reconhecendo-se 3, 4, 5 e 3 aplicações nos lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente, de acordo com o que mostra a Figura 7. No início da fase I, antes da primeira irrigação, a extração de água dos dois compartimentos reconhecida como a inclinação da linha θ - tempo foi semelhante. A partir da primeira irrigação do compartimento B (em 15/05 no lisímetro 1 e em 12/05 nos demais lisímetros) observa-se que a extração da água ocorre com maior intensidade daquele compartimento. No início da fase II, logo após a última irrigação do compartimento B, a extração ocorria com maior intensidade do compartimento B. Quando os teores de água se igualaram nos dois compartimentos, no fim da fase II, a extração se tornou semelhante nos dois compartimentos (como por exemplo, entre os dias 04/06 e 06/06 no lisímetro 1). Também durante a fase II, em torno do dia 29/05, ocorreu uma diminuição na extração de água pela planta, relacionada com uma menor demanda atmosférica devido à maior umidade relativa do ar da atmosfera e menor temperatura, o que pode ser verificado na Figura 8.

Observa-se, em todos os quatro lisímetros um aumento do teor de água no compartimento A, aproximadamente a partir da última irrigação do compartimento B até a secagem do

compartimento B (fase II). Isso pode ser explicado devido à transferência da água do compartimento B (úmido) ao compartimento A (seco) através do sistema radicular da planta, fenômeno conhecido como "hydraulic lift", ou seja, a liberação de água absorvida pelas raízes no compartimento mais úmido, no compartimento seco. Na fase III, como esperado, a extração foi maior no compartimento A, em relação ao B, sendo também observada a ocorrência do mesmo fenômeno ("hydraulic lift") descrito na fase anterior. Na fase IV, em semelhança à fase II, ocorreu maior intensidade de extração do compartimento A.

Os potenciais matriciais refletem as variações no teor de água, variando conforme as irrigações aplicadas e a secagem do solo em cada compartimento. Os valores de |h| nos compartimentos que estavam em períodos secos, subiram até a ordem de grandeza de |h| = 30 m. Lembrando que a irrigação é normalmente aplicada quando o potencial matricial da água no solo está da ordem de -10 m, o valor atingido de -30 m pode ser considerado um valor elevado quando se trata de disponibilidade hídrica.

Os potenciais de fluxo matricial na superfície das raízes (M_0) representados nas figuras 15c, 16c, 17c e 18c foram calculados pela eq. (7) e, portanto, iguais para os dois compartimentos do lisímetro. Ao analisar estes gráficos podem-se fazer algumas considerações: 1- quando o $M_0 < M_A$ e $M_0 < M_B$ ocorreu extração dos dois compartimentos do lisímetro. 2- quando o M_0 é menor do que o M em apenas um dos dois compartimentos ocorre extração apenas daquele compartimento, havendo liberação de água no outro compartimento (em que $M_0 > M$). Esse fenômeno de redistribuição de água pelo sistema radicular já foi observado e descrito em literatura como, por exemplo, em trabalhos de Richards e Caldwell (1987); Leffler et al. (2005). No lisímetro 4, representado pela Figura 18, na fase II também podem ser observados alguns instantes em que o M_0 foi ligeiramente maior do que ambos M_A e M_B , o que significaria que a planta estaria liberando água para o solo ao invés de extraí-la. É muito improvável que isso realmente tenha acontecido, e o fato deve ser atribuído a um erro de observação / leitura.

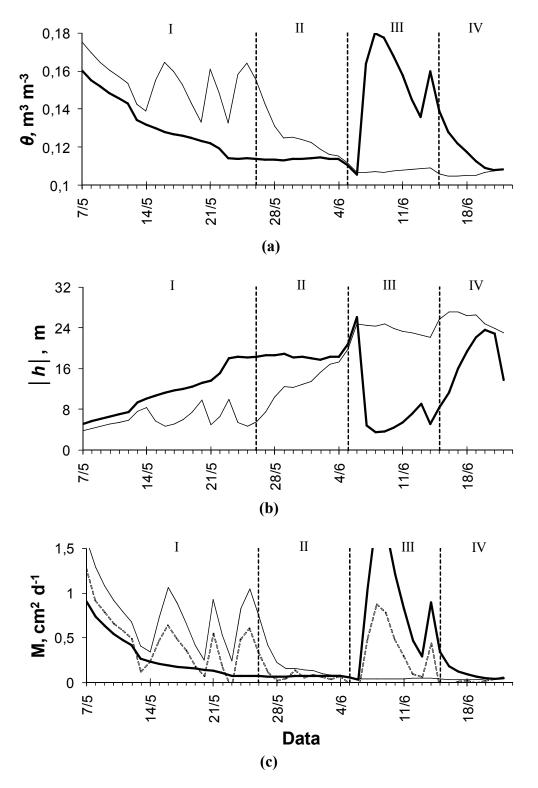


Figura 15 - Parâmetros hidráulicos observados na unidade experimental 1: (a) teor de água; (b) potencial matricial e (c) potencial de fluxo matricial. Linhas contínuas espessa e fina representam os compartimentos A e B, respectivamente; a linha tracejada na figura c representa o potencial de fluxo matricial na superfície das raízes (M_0) . Números romanos indicam as quatro fases de manejo da irrigação

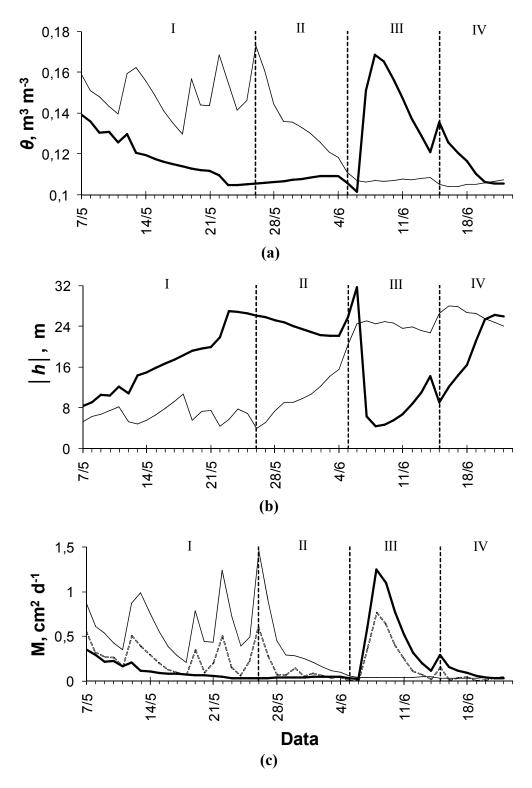


Figura 16 - Parâmetros hidráulicos observados na unidade experimental 2: (a) teor de água; (b) potencial matricial e (c) potencial de fluxo matricial. Linhas contínuas espessa e fina representam os compartimentos A e
 B, respectivamente; a linha tracejada na figura c representa o potencial de fluxo matricial na superfície das raízes (M₀). Números romanos indicam as quatro fases de manejo da irrigação

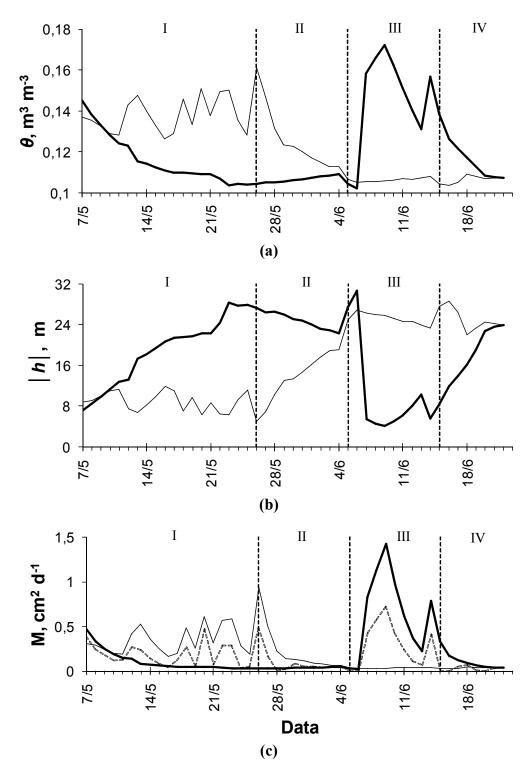


Figura 17- Parâmetros hidráulicos observados na unidade experimental 3: (a) teor de água; (b) potencial matricial e (c) potencial de fluxo matricial. Linhas contínuas espessa e fina representam os compartimentos A e B, respectivamente; a linha tracejada na figura c representa o potencial de fluxo matricial na superfície das raízes (M₀). Números romanos indicam as quatro fases de manejo da irrigação

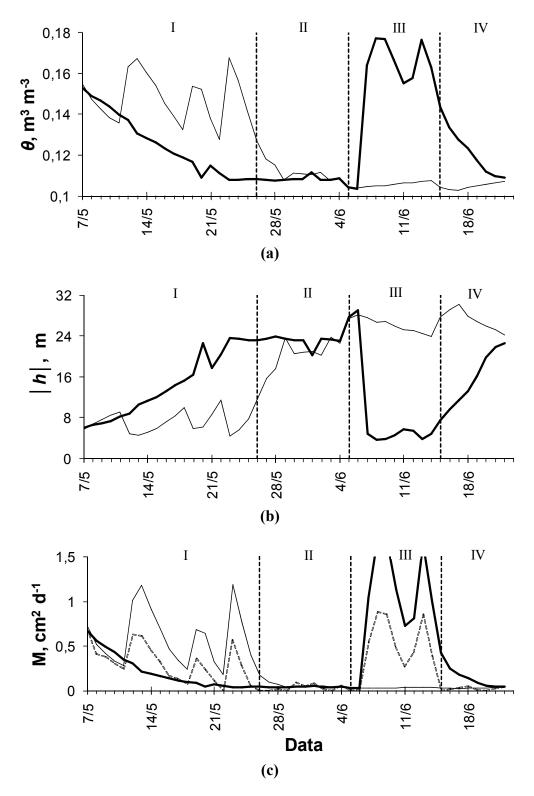


Figura 18 - Parâmetros hidráulicos observados na unidade experimental 4: (a) teor de água; (b) potencial matricial e (c) potencial de fluxo matricial. Linhas contínuas espessa e fina representam os compartimentos A e B, respectivamente; a linha tracejada na figura c representa o potencial de fluxo matricial na superfície das raízes (M₀). Números romanos indicam as quatro fases de manejo da irrigação

A Figura 19 apresenta a dispersão dos pontos da extração de água pelas raízes observada experimentalmente em função da extração estimada pelo modelo, (eq. (6)), sem correção para atividade e distribuição das raízes (f=1). Como se observa, a correlação entre os dados observados e modelados está praticamente ausente, sugerindo que alguma correção pelo fator f seja necessária.

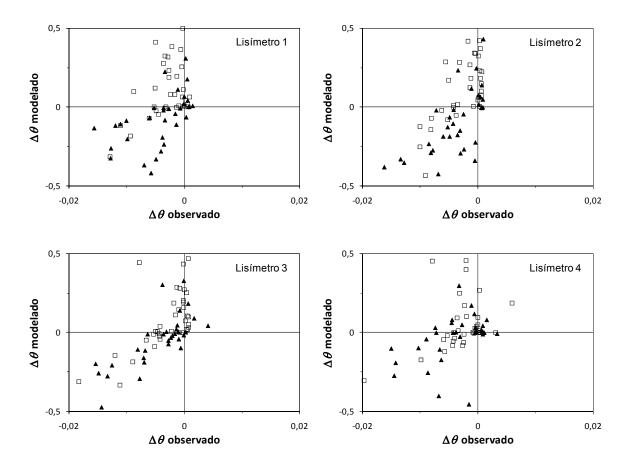


Figura 19 - Extração de água do solo pelo sistema radicular observada experimentalmente no compartimento A (quadrados) e do compartimento B (triângulos) dos lisímetros 1, 2, 3 e 4, em função da extração estimada pelo modelo, sem correção para atividade e heterogeneidade do sistema radicular (f = 1)

A necessidade da inclusão do fator de correção f pode ser explicada por alguns motivos. Em primeiro lugar, a distribuição radicular ocorre de forma heterogênea: as raízes podem crescer em poros já existentes no solo ou formarem novos poros. Além disso, a preferência por seguir os poros grandes e pré-existentes prejudica o contato íntimo das raízes com o material do solo, fato esse descrito em literatura como, por exemplo, em Passioura (1988). O contato solo-raíz pode também ser prejudicado quando o solo se torna muito seco: a raiz se contrai, criando uma barreira

para a passagem de água na interface entre o solo e a raiz. Esse fato foi demonstrado, por exemplo, nos trabalhos de Huck, Klepper e Taylor (1970); Herkelrath, Miller e Gardner (1977) e Faiz e Weatherley (1982). Outro ponto relevante está na eficiência da absorção de água em função da idade das raízes. A retirada da água do solo ocorre principalmente pelas raízes mais novas, o que ocasiona uma diminuição da fração ativa das raízes à medida que a planta vai se desenvolvendo. Ainda, os parâmetros radiculares foram determinados no fim do experimento, enquanto se pode supor que o sistema radicular cresceu ao longo do experimento. Por último, o método de separação de raízes do solo por peneira pode ter levado a perdas de material através da malha da peneira. Este problema já foi relatado na literatura como, por exemplo, no trabalho de Amato e Pardo (1994).

Para a estimativa do fator f utilizou-se o seguinte procedimento: para diferentes ordens de grandeza de r_0 (cuja determinação experimental é difícil), determinou-se o valor de f que resultava no menor valor para o RMSE no conjunto dos 8 compartimentos dos lisímetros (Tabela 6). Entre esses valores verificou-se: (1) que o valor de f para $r_0 = 3$ mm ficou maior do que 1, contrário à expectativa; (2) que, para valores de $r_0 \le 0,1$ mm, os valores de f se tornaram muito pequenos; (3) que, para $r_0 = 1$ mm e $r_0 = 0,3$ mm, os valores f encontravam-se na faixa esperada, considerando o valor de aproximadamente 0,1 encontrado em pesquisa anterior para corrigir a heterogeneidade apenas. Entre esses dois valores de r_0 , optou-se por $r_0 = 0,3$ mm, pelo fato de um raio das raízes de 1 mm (diâmetro de 2 mm) parecer um valor muito grande. A ordem de grandeza do f assim obtido é igual à encontrada por Herkelrath; Miller e Gardner (1977).

Tabela 6 - Fator f (eq. (6)) que resultou no menor valor de RMSE para cinco valores de r_0 . O caso em negrito é o utilizado nessa dissertação

r_0 , mm	RMSE	f
3	0,0032	1,55595
1	0,0032	0,11745
0,3	0,0031	0,01506
0,1	0,0032	0,00186
0,03	0,0033	0,00009

As Figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam os valores de extração observados versus modelados nos quatro lisímetros, utilizando o fator (f = 0.01506) no calculo da extração, (eq. (6)).

-

¹ Casaroli, D., comunicação pessoal, 2009.

O RMSE (eq. (12)) da predição do modelo é da ordem de 0,007 m³ m⁻³. Fontes de erro são, por exemplo, a suposição de que todas as raízes possuem o mesmo raio, a hipótese de que ao extrair água do solo, não ocorre interação entre as raízes, e a desconsideração da distribuição espacial, tanto no sentido horizontal como no vertical do sistema radicular. Além disso, há os erros experimentais usuais, como os de observação nos lisímetros, e os da calibração do TDR. Os parâmetros físicos de ajuste da curva de retenção do solo podem também ter afetado, de maneira indireta, mudanças na previsão do modelo.

Observam-se, ainda, muito mais valores positivos de $\Delta\theta$ modelado do que observado, ou seja, o modelo simula frequentemente um refluxo de água onde esse na verdade não ocorre. Deve-se lembrar que o modelo não considera mecanismos que impedem o fluxo de água através das raízes. A resistência interna do sistema radicular não contabilizada pode, na verdade, ter um papel importante nas relações hídricas na rizosfera.

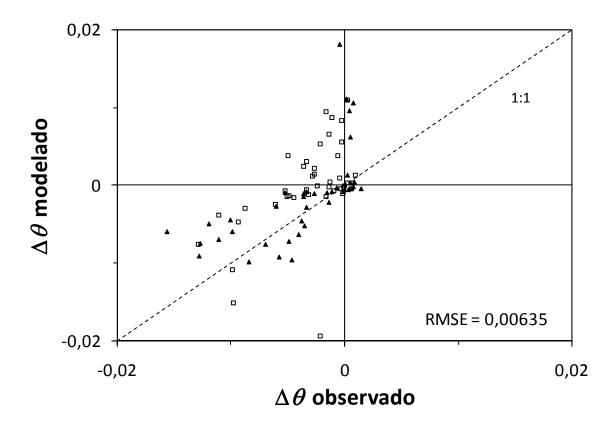


Figura 20 - Lisímetro 1: Extração de água do solo pelo sistema radicular estimada pelo modelo no compartimento A (quadrados) e no compartimento B (triângulos) em função da extração observada experimentalmente

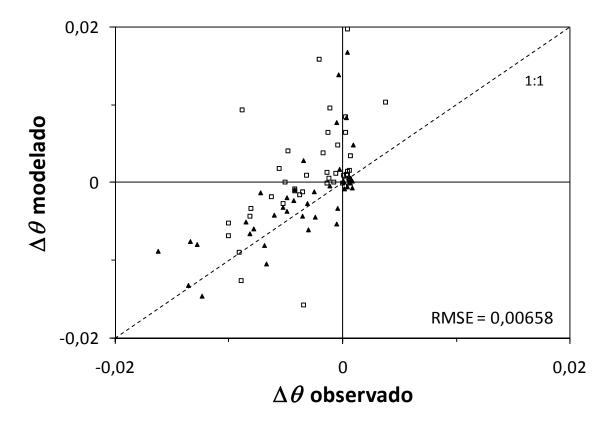


Figura 21 - Lisímetro 2: Extração de água do solo pelo sistema radicular estimada pelo modelo no compartimento A (quadrados) e no compartimento B (triângulos) em função da extração observada experimentalmente

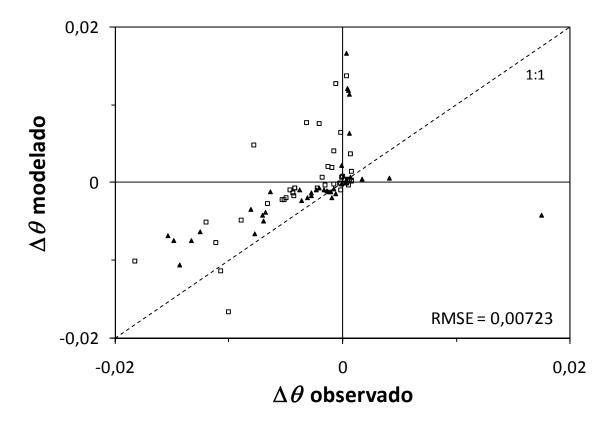


Figura 22 - Lisímetro 3: Extração de água do solo pelo sistema radicular estimada pelo modelo no compartimento A (quadrados) e no compartimento B (triângulos) em função da extração observada experimentalmente

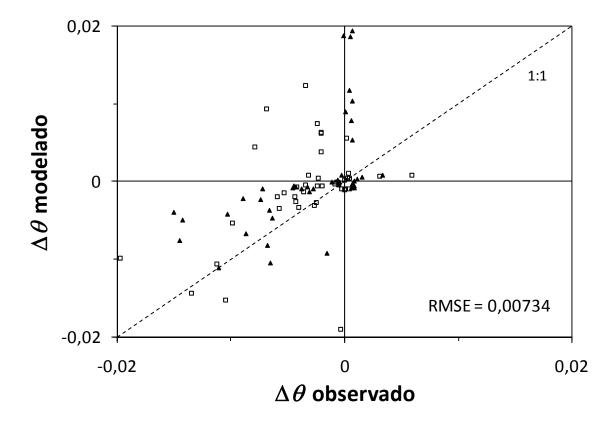


Figura 23 - Lisímetro 4: Extração de água do solo pelo sistema radicular estimada pelo modelo no compartimento A (quadrados) e no compartimento B (triângulos) em função da extração observada experimentalmente

5 CONCLUSÕES

- O experimento com lisímetro dividido ("split-pot") com plantas de sorgo permitiu fazer observações da extração da água do solo por um sistema radicular dividido entre compartimentos com teores de água contrastantes.
- 2. As plantas demonstraram preferência por extrair água dos compartimentos com teor de água maior, em alguns casos interrompendo a exploração dos mais secos.
- 3. Em diversas ocasiões a liberação da água ao solo foi observada nos compartimentos mais secos.
- 4. O modelo utilizado simula a liberação de água ao solo mais frequente e mais intensamente do que ela ocorreu no experimento. Esse fato pode indicar que a resistência interna do sistema radicular, não contabilizada pelo modelo, pode ter um papel importante nas relações hídricas na rizosfera.
- 5. O modelo de utilizado descreveu razoavelmente bem as observações, desde que utilizado um fator de eficiência radicular de 0,015.

REFERÊNCIAS

- ADEOYE, K.B.; RAWLINS, S.L. A split-root technique for measuring root water potential. **Plant Physiology**, New York, v. 68, n. 1, p. 44-47, 1981.
- AMATO, M.; PARDO, A. Root length and biomass losses during sample preparation with different screen mesh sizes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 161, n. 2, p. 299-303, 1994.
- BASSOI, L.H.; FANTE JR., L.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica: II. Comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 541-548, 1994.
- BELMANS, C.; WESSELING, J.G.; FEDDES, R.A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 63, n. 3/4, p. 271-286, 1983.
- BRASIL, F.C.; ZONTA, E.; OLIVEIRA, M.R.G. Métodos de amostragem e quantificação para estudos do sistema radicular em condições de campo uma revisão critica. **Revista Universidade Rural**: Série Ciências da Vida, Seropédica, v. 27 n. 2, p. 14-33, 2007.
- BRAUD, I.; VARADO, N.; OLIOSO, A. Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 301, p. 267-286, 2005.
- CALVACHE, A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Efeito de épocas de deficiência hídrica na evapotranspiração atual da cultura do feijão cv. *Imbabello*. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 61-72, 1998.
- CAMARGO, M.B.P.; HUBBARD, K.G.; FLORES-MENDOZA, F. Test of a soil water assessment model for a sorghum crop under different irrigation treatments. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 1, p. 95-105, 1994.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.
- CARLESSO, R.; JADOSKI, S.O.; MAGGI, M.F.; PETRY, M.; WOLSHICK, D. Efeito da lâmina de irrigação na senescência foliar do feijoeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 545-556, out./dez. 2007.
- CINTRA, F.L.D.; RESENDE, R.S.; LEAL, M.L.S. Distribuição de raízes de coqueiro anão sob volumes de água em solo coeso dos tabuleiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 614-619, 2008.

- COELHO, E.F.; OLIVEIRA, F.C.; ARAUJO, E.C.E.; VASCONCELOS, L.F.L.; LIMA, D.M. Distribuição do Sistema Radicular da Mangueira sob Irrigação Localizada em Solo Arenoso de Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 250-256, 2001.
- CORREIA, K.G.; NOGUEIRA, R.J.M.C. Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido a déficit hídrico. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 15-22, 2004.
- COSTA, L.C.; MORISON, J.; DENNETT, M. Effects of water stress on photosynthesis, respiration and growth of Faba Bean (*Vicia faba* L.) growing under field conditions. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 5, n. 1, p. 9-16, 1997.
- COWAN, I.R. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 2, n. 1, p. 221-239, May 1965.
- CRAINE, J.M.; LEE, W.G. Covariation in leaf and root traits for native and non-native grasses along an altitudinal gradient in New Zealand. **Oecologia**, Berlin, v. 134, n. 4, p. 471-478, 2003.
- DARDANELLI, J.L.; RITCHIE, J.T; CALMON, M.; ADRIANI, J.M.; COLLINO, D.J. An empirical model for root water uptake. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 59-71, Apr. 2004.
- DARRAH, P.R.; JONES, D.L.; KIRK, G.J.D.; ROOSE, T. Modelling the rhizosphere: a review of methods for 'upscaling' to the whole-plant scale, **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, n. 1, p.13-25, Feb. 2006.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1986. 193p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de. Estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 9-15, 1993.
- EMBRAPA MILHO E SORGO. **Sistemas de produção**. Disponível em: http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo/index.htm. Acesso em :17 set. 2008.
- ERICKSON, P.I.; KIRKHAM, M.B. Growth and water relations of wheat plants with roots split between soil and nutrient solution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 2, p. 361-364, 1979.
- ESPELETA, J.F.; EISSENSTAT, D.M; GRAHAM, J.H. Citrus root responses to localized drying soil: a new approach to studying mycorrhizal effects on the roots of mature trees. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 206, n. 1, p. 1-10, Sept. 2004.
- FAIZ, S.M.A.; WEATHERLEY, P.E. Root contraction in transpiring plants. **New Phytologist**, Cambridge, v. 92, p. 333-343, 1982.

- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia do feijoeiro. In: _____. (Coord.). **Tecnologia da produção do feijão irrigado.** Piracicaba: ESALQ, Departamento de Agricultura, 1997. p. 100-120. 33p. (IAC. Boletim Técnico, 114).
- FANTE JR., L.; REICHARDT, K.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica: I. Comparação de metodologias. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 513-518, 1994.
- FANTE JR., L.; REICHARDT, K.; JORGE, L.A.C.; BACCHI, O.O.S. Distribuição do sistema radicular de uma cultura de aveia forrageira. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1091-1100, 1999.
- FEDDES, R.A.; RAATS, P.AC. Parameterizing the soil-water-plant root system. In FEDDES, R.A.; ROOIJ, G.H; VAN DAM, J.C. (Ed.). **Unsaturated-zone modeling:** progress, challenges and applications. Dordrecht: UR Frontis Ser. Kluwer Acad. Publ., 2004. p. 95-141.
- FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.; NEUMAN, S.P.; BRESLER, E. Finite difference and finite element simulation of field water uptake by plants. **Hydrological Sciences Bulletin,** Oxford, v. 21, n. 1, p 81-98, Mar. 1976.
- FEDDES, R.A.; KABAT, P.; VAN BAKEL, P.J.T.; BRONSWIJK, J.J.B.; HALBERTSMA, J. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone state of the art. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 100, n. 1/3, p. 69-111, July 1988.
- FIORIN, J.E.; REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A. Armazenamento de água no solo e crescimento e produção do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 249-255, 1997.
- GALLARDO, M.; TURNER, N.C.R.; LUDWIG, C. Water relations, gas exchange and abscisic acid content of *Lupinus cosentinii* leaves in response to drying different proportions of the root system. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 45, n. 7, p. 909-918, 1994.
- GARCIA, A.; ANDRE, R.G.B.; FERREIRA, M.I.; PAÇO, T. Comparação de modelos para avaliação do estresse hídrico em cultura de nectarinas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 43-48, 2000.
- GARDNER, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 89, n. 2, p. 63-67, 1960.
- _____. Relation of root distribution to water uptake and availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 56, p. 41-45, 1964.
- GARDNER, W.R; EHLIG, C.F. Some observations on the movement of water to plant roots. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 453-456, 1962.
- HERKELRATH, W.N.; MILLER, E.E.; GARDNER, W.R. Water uptake by plants: II. The root contact model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 1039-1043, 1977.

HOMAEE, M.; FEDDES, R.A.; DIRKSEN, C. Simulation of root water uptake: III. Non-uniform transient combined salinity and water stress. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 57, n. 2, p. 127-144, Oct. 2002.

HUCK, M.G.; KLEPPER, B.; TAYLOR, H.M. Diurnal variations in root diameter. **Plant Physiology**, Rockville, v. 45, p. 529-530, 1970.

HUSSAIN, A.; BLACK, C.R.; TAYLOR, I.B.; ROBERTS, J.A. Soil compaction. A role for ethylene in regulating leaf expansion and shoot growth in tomato? **Plant Physiology**, New York, v. 121, n. 4, p. 1227-1237, 1999.

JARVIS, N.J. Simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 107, n. 1/4, p. 57-72, 1989.

JONG VAN LIER, Q. de. Extração da água do solo por plantas: desenvolvimento e validação de um modelo. 1994. 96 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) — Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

_____. The critical soil water content and its relation to soil water dynamics. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n. spe, p. 45-50, 1997.

JONG VAN LIER, Q. de; METSELAAR, K.; VAN DAM, J.C. Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, n. 4, p. 1264-1277, 2006.

JONG VAN LIER, Q. de; METSELAAR, K.; VAN DAM, J.C.; JONG, R. de; DUIJNISVELD, W.H.M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n.3, p. 1065-1078, Aug. 2008.

KIRKHAM, M.B. Physical model of water in a split-root system. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 75, n. 2, p. 153-168, 1983.

KOSOLA, K.R.; EISSENSTAT, D.M. The fate of surface roots of citrus seedlings in dry soil. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 45, n. 11, p. 1639-1645, 1994.

KROES, J.G.; VAN DAM, J.C. **Reference Manual SWAP version 3.0.3**. Wageningen: Alterra Green World Research, 2003. 211 p. (Alterra Report, 773).

LAI, C.T.; KATUL, G. The dynamic role of root-water uptake in coupling potential to actual transpiration. **Advances Water Resources**, Amsterdam, v. 23, n. 4, p. 427–439, 2000.

LASCANO, R.J.; VAN BAVEL, C.H.M. Root water uptake and soil water distribution: test of an availability concept, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 233-237, 1984.

- LEFFLER, A.J.; PEEK, M.S.; RYEL, R.J.; IVANS, C.Y.; CALDWELL, M.M. Hydraulic redistribution through the root systems of senesced plants. **Ecology**, New York, v. 86, n. 3, p. 633–642, 2005.
- LI, K.Y.; DE JONG, R.; COE, M.T.; RAMANKUTTY, N. Root-water-uptake based upon a new water stress reduction and an asymptotic root distribution function. **Earth Interactions**, Washington, v. 10, n. 14, p. 1–22, June 2006.
- LI, K.Y.; DE JONG, R; BOISVERT, J.B. Comparison of root water uptake models. In: INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANIZATION MEETING, 10., 1999, West Lafayette. **Sustaining the global farm:** selected papers... West Lafayette: Purdue University; USDA, ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 2001a. p. 1112–1117.
- _____. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 252, n. 1, p. 189–204, Oct. 2001b.
- LONKERD, W.E.; RITCHIE, J.T. Split root observation system for glass root dynamics studies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 3, p. 519-522, 1979.
- MAGALHÃES FILHO, J.R.; AMARAL, L.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MEDINA, C.L.; MACHADO, E.C, Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeira 'Valencia' sobre dois tipos de porta-enxerto. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 75-82, 2008.
- MARTINS, F.B.; STRECK, N.A.; SILVA, J.C.; MORAIS, W.W.; SUSIN, F.; NAVROSKI, M.C.; VIVIAN, M.A. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1297-1306, 2008.
- METSELAAR, K.; JONG VAN LIER, Q. de. The shape of the transpiration reduction function under plant water stress. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.6, p. 124-139, Jan. 2007.
- MEYER, W.S.; GREEN, G.C. Water use by wheat and plant indicators of available soil water. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 253-257, Mar. 1980.
- MILLER, A.A.; GARDNER, W.R. Effect of the soil and plant water potentials on the dry matter production of snap beans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, n. 5, p. 559-562, Sept./Oct. 1972.
- MINHAS, B.S.; PARIKH, K.S; SRINIVASAN, T.N. Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. **Water Resources Research**, Hanover, v. 10, n. 3, p. 383-393, 1974.
- MOLZ, F.J.; REMSON, I. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. **Water Resources Research**, Hanover, v. 6, n. 5, p. 1346-1356, 1970.
- MORISON, J.I.L.; GIFFORD, R.M. Plant growth and water use with limited water supply in high CO2 concentrations. I. Leaf area, water use and transpiration. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 11, n. 5, p. 361-374, 1984.

- NEVES, C.S.V.J.; DECHEN, A.R.; MEDINA, C.C.; GUIMARAES, M.F. Comparison of citrus rooting evaluation methods using root images in soil profiles and root weight. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2537-2541, 2000.
- NOVAK, V. Estimation of soil-water extraction patterns by roots. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 12, n. 4, p. 271-278, July 1987.
- OLIVEIRA, A.D.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 86-95, jan./abr. 2005.
- OLIVEIRA, M.A.J.; BOVI, M.L.A.; MACHADO, E.C.; GOMES, M.M.A.; HABERMANN, G.; RODRIGUES, J.D. Fotossíntese, condutância estomática e transpiração em pupunheira sob deficiência hídrica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 59-63, jan./mar. 2002.
- PAGE, E.R.; GERWITZ, A. Mathematical models, based on diffusion equations, to describe root systems of isolated plants, row crops, and swards. **Plant and Soil**, Haia, v. 41, n. 2, p. 243-254, Oct. 1974.
- PAPADOPOULOS, I.; RENDIG, V.V. Tomato plant response to soil salinity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, n. 4, p. 696-700, 1983.
- PEREIRA, P.G.; BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.M.G.; FRANÇAS, S. Efeitos de diferentes níveis de déficit hídrico na fotossíntese e condutância foliar em milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 53-62, 2003.
- PASSIOURA, J.B. Water transport in and to roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 39, p. 245-265, 1988.
- QUEIROZ, C.G.S.; GARCIA, Q.S.; LEMOS FILHO, J.P. Atividade fotossintética e peroxidação de lipídios de membrana de plantas de aroeira-dosertão sob estresse hídrico e após reidratarão. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 14, n. 1, p. 59-63, jan./abr. 2002.
- RAATS, P.A.C. Analytical solutions of a simplified flow equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,** New York, v. 19, n. 4, p. 683-689, July/Aug. 1976.
- RAYMOND, E.M.; GINGRICH, J.R. Osmotic stress effects on wheat using a split root solution culture system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 377-381, 1966.
- RICHARDS, J.H.; CALDWELL, M.M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. **Oecologia**, Berlin, v. 73, n. 4, p. 486-489, 1987.
- RITCHIE, J.T. A user-orientated model of the soil water balance in wheat: models in wheat agronomy. In: DAY, W.; ATKIN, R.K. (Ed.). **Wheat growth and modeling.** New York: Plenum Press, 1985. p. 293–305.

- RODRIGUES, E.P.; ALVES, G.C.; REIS, V.M.. **Utilização do corante Toluidina na determinação de parâmetros radiculares pelo software Siarcs 3.0.** Seropédica: EMBRAPA, 2003. 56p. (Comunicado Técnico, 58).
- ROSENTHAL, W.D.; ARKIN, G.F.; SHOUSE, P.J.; JORDAN, W.R. Water deficit effects on transpiration and leaf growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, n. 6, p. 1019-1026, Nov./Dec. 1987.
- SANTOS, C.A.S. **Distribuição e absorção de água pelo sistema radicular da cultura da manga (***Mangifera indica* **L.) irrigada por microaspersão**. 1997. 51 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.
- SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.Th.; SEJNA, M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, version 3.0. Riverside: University of California, Dep. of Environmental Sciences, 2005. (HYDRUS Software Series, 1).
- SOUSA, V.F.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO FILHO, M.A.; FRIZZONE, J.A. Distribuição radicular do maracujazeiro sob diferentes doses de potássio aplicadas por fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 51-56, 2002
- SOUZA, M.J.H.; RAMOS, M.M.; SIQUEIRA, D.L.; COSTA, L.C.; LHAMAS, A.J.M.; MANTOVANI, E.C.; CECON, P.R.; SALOMÃO, L.C.C. Estresse esse hídrico e época de produção da lima ácida 'Tahiti'. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 31-38, 2004.
- STEVEN, H.E.; TODD, E.D. Experiments using split-root chambers on water uptake from soil macropores by sunflowers. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 189, n. 1, p. 57–63, 1997.
- TOMAR, V.S.; GHILDYAL, B.P. Internal leaf water status and transport of water in rice plants. **Agronomy Journal**, Madison, v.65, p.861-865, 1973.
- VALENZUELA-ESTRADA, L.R.; VERA-CARABALLO, V.; RUTH, L.E.; EISSENSAT, D.M. Root anatomy, morphology, and longevity among root orders in *Vaccinium corymbosum* (Ericaceae). **American Journal of Botany,** Saint Louis, v. 95, n. 12, p. 1506-1514, 2008.
- VAN DEN BERG, M.; DRIESSEN, P.M. Water uptake in crop growth models for land use systems analysis: i. a review of approaches and their pedigrees. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 92, n. 2, p. 21–36, 2002.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-897, Sept./Oct. 1980.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A.; PERECIN, D.; JORGE, L.A.C.; LANDELL, M.G.A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 849-858, 2003.

WILLIAMS, J.R. The EPIC model. In: SINGH, V.P. (Ed.). Computer models of watershed hydrology. Littleton: Water Resources Publ., 1995. p. 909–1000.

WIND, G.P. Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: RIJTEMA, P.E.; WASSINK, H. (Ed.). **Water in the unsaturated zone.** Gentbrugge: International Association of Scientific Hydrology, 1968. v. 1, p. 181–191.

ZHANG, J.; KIRKHAM, M.B. Water relations of water-stressed, split-root G₄ (Sorghum bicolor; Poaceae) and C3 (Helianthus annuus; Asteraceae) plants. American Journal of Botany, Saint Louis, v. 82, n. 10, p. 1220-1229, 1995.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

<u>Baixar</u>	livros	de	Adm	inis	tra	ção

Baixar livros de Agronomia

Baixar livros de Arquitetura

Baixar livros de Artes

Baixar livros de Astronomia

Baixar livros de Biologia Geral

Baixar livros de Ciência da Computação

Baixar livros de Ciência da Informação

Baixar livros de Ciência Política

Baixar livros de Ciências da Saúde

Baixar livros de Comunicação

Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE

Baixar livros de Defesa civil

Baixar livros de Direito

Baixar livros de Direitos humanos

Baixar livros de Economia

Baixar livros de Economia Doméstica

Baixar livros de Educação

Baixar livros de Educação - Trânsito

Baixar livros de Educação Física

Baixar livros de Engenharia Aeroespacial

Baixar livros de Farmácia

Baixar livros de Filosofia

Baixar livros de Física

Baixar livros de Geociências

Baixar livros de Geografia

Baixar livros de História

Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura

Baixar livros de Literatura de Cordel

Baixar livros de Literatura Infantil

Baixar livros de Matemática

Baixar livros de Medicina

Baixar livros de Medicina Veterinária

Baixar livros de Meio Ambiente

Baixar livros de Meteorologia

Baixar Monografias e TCC

Baixar livros Multidisciplinar

Baixar livros de Música

Baixar livros de Psicologia

Baixar livros de Química

Baixar livros de Saúde Coletiva

Baixar livros de Serviço Social

Baixar livros de Sociologia

Baixar livros de Teologia

Baixar livros de Trabalho

Baixar livros de Turismo