

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento**

**João Batista Tolentino Júnior**

Tese apresentada para obtenção do título Doutor em Ciências.  
Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba  
2011**

**João Batista Tolentino Júnior**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento**

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Tese apresentada para obtenção do título Doutor em Ciências.  
Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba**  
**2011**

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

Tolentino Júnior, João Batista

Modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento / João Batista  
Tolentino Júnior. - - Piracicaba, 2011.  
101 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Água no solo - Modelagem 2. Bulbos 3. Equação de Richards 4. Irrigação por gotejamento 5. Modelos matemáticos 6. Reflectometria no domínio do tempo I. Título

CDD 631.7  
T649m

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



*A mamy Iraci e sister Graciele*

Com muito carinho

**Ofereço**

*A minha querida Adriana Terumi Itako*

Com muito amor

**Dedico**



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e saúde que Ele me concedeu.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

A CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Ensino Superior, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia de irrigação (INCTEI).

Ao orientador Prof. Dr. José Antônio Frizzone por sua preciosa orientação, pela amizade e pela confiança.

Aos professores do curso de pós-graduação Marcos V. Folegatti, Tarlei A. Botrel, Rubens D. Coelho, Sérgio N. Duarte, Paulo L. Libardi, Décio E. Cruciani, Iran J. Silva, Jarbas H. Miranda pelo conhecimento adquirido ao longo dos anos.

Ao Prof<sup>o</sup> Claudinei F. Souza pela orientação quanto ao uso da TDR e pela cessão dos equipamentos.

Ao prof. Dr. Roberto Rezende pelo apoio, informações úteis compartilhadas e pelo incentivo.

A minha mãe Iraci e minha irmã Graciele pelo apoio, carinho e compreensão.

A Adriana pelo convívio, companheirismo e apoio durante todas as fases deste trabalho.

A minha família japonesa Mitsuo, Ayumi, Emiko e Shideki pela boa recepção.

À minha amiga Lígia Borges Marinho pela imensa ajuda na execução deste trabalho e pela sua preciosa amizade.

Aos amigos da pós-graduação Cornélio, Janaina, Danilton, Pedro Giongo pelos bons momentos compartilhados. A todos que convivi nas salas de aula e também no churrasco de fim de semana: Aderbal, Carlos José, Cícero, Francisco ‘Xicó’, Rafael, Everaldo, Marinaldo, Isaac, Vanessa, Adriano ‘Kubano’, Alex, Antônio Pires, Allan, César, Conan, Danieli, Dinara, Eusímio, Fábio ‘Basalto’, Fernando, Juliano, Jussálvia, Lucas Amaral, Lucas Vellame, Ricardo, Robson Mauri, Robson Armindo, Sérgio Medeiros, Wanderley, Jorge, Kelly, Pedro Róbinson, Rochane, Renato, Ronaldo, Marcelo.

Aos funcionários do Departamento, Sr. Antonio, Gilmar, Paula, Osvaldo, Beatriz, Davilmar, Sandra, Hélio e Luiz pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

A todos que direta e indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	11
LISTA DE FIGURAS .....	13
LISTA DE TABELAS .....	17
LISTA DE SÍMBOLOS .....	19
1 INTRODUÇÃO .....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1 A água no solo .....	25
2.1.1 Conteúdo de água no solo.....	25
2.1.2 Reflectometria no domínio do tempo - TDR.....	26
2.1.3 Potencial da água no solo .....	28
2.2 Movimento da água no solo.....	30
2.2.1 Equação de Darcy-Buckingham .....	30
2.2.2 Condutividade hidráulica em solo não saturado.....	31
2.2.3 Equação de Richards .....	31
2.3 Simulação do movimento da água no solo .....	32
2.3.1 Modelos analíticos.....	33
2.3.2 Modelos numéricos .....	33
2.3.3 O modelo HYDRUS.....	35
2.3.4 Modelos empíricos .....	36
2.3.5 Aplicação de modelos de movimento da água no solo.....	37
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	39
3.1 Construção das sondas de TDR .....	39

3.2	Determinação do bulbo molhado com a TDR.....	40
3.3	Simulação do bulbo molhado .....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
4.1	Determinação do bulbo molhado com a TDR.....	49
4.2	Simulação do bulbo molhado .....	65
5	CONCLUSÕES.....	83
	REFERÊNCIAS.....	85
	ANEXOS .....	92

## RESUMO

### **Modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento**

O bulbo molhado formado na irrigação por gotejamento pode ser modelado a partir informações das propriedades físico-hídricas do solo. Mas apesar do grande progresso na modelagem, a aplicação de modelos na irrigação e drenagem ainda não foi implementada em nenhum nível de maneira substancial. Assim, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver um modelo numérico utilizando a técnica dos volumes finitos para estimar a forma e as dimensões do volume de solo molhado sob irrigação por gotejamento, e verificar a validade do modelo através da comparação com dados recolhidos em condições experimentais. O ensaio foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz-ESALQ/USP. As sondas de TDR foram confeccionadas segundo procedimentos descritos por Souza et al. (2006). O perfil do bulbo molhado formado no solo abaixo de um emissor do tipo gotejador foi determinado para 3 tipos de material: areia, solo arenoso e solo argiloso e para 3 vazões nominais do emissor: 2, 4 e 6 L/h. Cada uma das combinações entre tipo de solo e vazão foi repetida três vezes em caixas (1000 L) diferentes, totalizando 27 medições. Um modelo numérico foi desenvolvido para simular a distribuição da água no perfil do solo abaixo de uma fonte pontual. A solução da equação diferencial para o movimento da água em solo não saturado foi realizada pela discretização do espaço-tempo utilizando a técnica dos volumes finitos. Um algoritmo em linguagem Visual Basic foi escrito para implementar o conjunto de equações e simular a evolução do bulbo molhado no tempo. Foi simulada a formação do bulbo molhado nas mesmas condições do experimento, e gráficos de isolinhas de umidade foram traçados no software Surfer. O modelo numérico proposto foi capaz de simular a formação do bulbo molhado em diferentes condições de tipo de solo e vazão do emissor.

Palavras-chave: TDR; Equação de Richards; Modelo numérico; Método dos volumes finitos



## ABSTRACT

### **Modeling of the soil wetted volume under drip irrigation**

The soil water patterns in drip irrigation can be modeled from physical and hydraulic properties of soil. But despite the great progress in modeling, the models have not been implemented at any level in irrigation and drainage. The objective of this study was to develop a numerical model using finite volume technique to estimate the shape and dimensions of the wetted soil volume under drip irrigation and verify the validity of the model by comparing data collected under experimental conditions. The trial was conducted at the experimental site of the Department of Biosystems Engineering, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz-ESALQ/USP. The TDR probes were manufactured according Souza et al. (2006). The soil water patterns under a drip emitter type was determined for three types of material: sand, sandy soil and clay soil and three nominal flows of the emitters: 2, 4 and 6 L/h. Each of the combinations of soil type and flow rate was repeated three times in boxes (1000 L), totaling 27 measurements. A numerical model was developed to simulate the distribution of water in the soil profile below a point source. The solution of the differential equation for the movement of water in unsaturated soil was carried out by the discretization of space-time using the technique of finite volume. An algorithm in Visual Basic language was written to implement the set of equations and simulate the evolution of wetted soil volume in time. Contour plots of soil water content were drawn in Surfer software. The proposed numerical model was able to simulate wetted soil volume under different conditions of soil type and flow of the emitter.

Keywords TDR; Richard’s Equation; Numerical model; Finite volume method



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma sonda de TDR com três hastes.....	39
Figura 2 - Sondas acomodadas no molde de silicone na estrutura de madeira para aplicação da resina. 40	40
Figura 3 - Representação do grid de sondas de TDR. A seta amarela indica o local em que foi instalado o emissor. ....	42
Figura 4 - Discretização do espaço pelo método dos volumes finitos. ....	45
Figura 5 - Volume de água aplicado pelo gotejador vs volume de água medido com o TDR para os três tipos de materiais: areia (A), solo arenoso (B) e solo argiloso (C). ....	50
Figura 6 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de $2 \text{ L h}^{-1}$ para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. ....	52
Figura 7 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de $4 \text{ L h}^{-1}$ para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. ....	54
Figura 8 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de $6 \text{ L h}^{-1}$ para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. ....	55
Figura 9 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de $2 \text{ L h}^{-1}$ para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. ....	57
Figura 10 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de $4 \text{ L h}^{-1}$ para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. ....	59
Figura 11 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de $6 \text{ L h}^{-1}$ para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. ....	60
Figura 12 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de $2 \text{ L h}^{-1}$ para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. ....	62

- Figura 13 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos..... 64
- Figura 14 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos..... 65
- Figura 15 - Tela do programa para simular a formação do bulbo molhado em irrigação por gotejamento. .... 66
- Figura 16 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 67
- Figura 17 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 69
- Figura 18 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 70
- Figura 19 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 71
- Figura 20 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 73
- Figura 21 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 74
- Figura 22 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos..... 75

- Figura 23 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 77
- Figura 24 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos. .... 78
- Figura 25 - Distância horizontal (r) e distância vertical (z) do bulbo molhado nas vazões de 2, 4 e  $6 \text{ L h}^{-1}$  em areia. Comparação entre os dados simulados e medidos em experimento com a TDR..... 79
- Figura 26 - Distância horizontal (r) e distância vertical (z) do bulbo molhado nas vazões de 2, 4 e  $6 \text{ L h}^{-1}$  em solo arenoso. Comparação entre os dados simulados e medidos em experimento com a TDR..... 80
- Figura 27 - Distância horizontal (r) e distância vertical (z) do bulbo molhado nas vazões de 2, 4 e  $6 \text{ L h}^{-1}$  em solo argiloso. Comparação entre os dados simulados e medidos em experimento com a TDR..... 81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação, textura, densidade e parâmetros da curva de retenção dos três tipos de materiais (areia, solo arenoso e solo argiloso) utilizados neste trabalho .....	41
Tabela 2 - Vazão nominal e vazão medida dos emissores utilizados neste trabalho .....	41
Tabela 3 - Coeficiente de correlação e raiz do erro quadrático médio (REQM) e entre os dados medidos pelo TDR e a quantidade de água aplicada pelo gotejador. ....	49
Tabela 4 - Raiz do erro quadrático médio entre os valores de conteúdo de água no solo simulados e medidos com a TDR. ....	82



## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	velocidade do sinal eletromagnético no vácuo
$K(\theta)$	condutividade hidráulica não saturada em função do conteúdo de água no solo.
$K_a$	constante dielétrica
$K_r(\theta)$	condutividade hidráulica relativa em função do conteúdo de água no solo
$K_s$	condutividade hidráulica saturada
$L$	comprimento da sonda de TDR
$L_a$	comprimento aparente da sonda de TDR
$q$	densidade de fluxo
$R$	largura do anel
$r$	posição horizontal do anel
$REQM$	raiz do erro quadrático médio;
$r_{max}$	valor máximo do raio
$S_e$	grau de saturação
$V_{hd(z,r)}$	volume de água que deixa o anel (z,r) pela face direita
$V_{he(z,r)}$	volume de água que adentra no anel (z,r) pela face esquerda
$V_{ini}$	volume de água no solo no instante inicial (t=0)
$V_t$	volume de água acrescentado no solo em um intervalo de tempo t
$V_{va(z,r)}$	volume de água que adentra no anel (z,r) pela face superior
$V_{vb(z,r)}$	volume de água que deixa o anel (z,r) pela face inferior
$Z$	altura do anel
$z$	posição vertical do anel
$z^{max}$	valor máximo da profundidade
$\alpha, m$ e $n$	parâmetros de ajuste dependentes do formato da curva de retenção
$\Delta t$	intervalo de tempo
$\theta$	conteúdo de água volumétrico
$\theta_r$	conteúdo de água residual
$\theta_s$	conteúdo de água na saturação
$\psi(\theta)$	potencial mátrico em função do conteúdo de água no solo
$\psi_b - \psi_c$	gradiente de potencial



## 1 INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento é uma das tecnologias que mais rapidamente se expandem na moderna agricultura irrigada com um grande potencial para utilizar a água com eficiência. Os sistemas de gotejamento permitem o uso criterioso da água e fertilizantes para uma grande variedade de culturas. A disposição dos emissores diretamente na superfície do solo permite que o processo de infiltração ocorra dentro de um pequeno volume de solo, conhecido como bulbo molhado. No caso da irrigação por gotejamento a água é aplicada em pequenas intensidades e com uma alta frequência de modo que a umidade do solo é mantida dentro de um pequeno intervalo de variação, sempre próximo da capacidade de campo. Segundo Allen e Brockway (1984), conceitos modernos devem ser utilizados no dimensionamento de novos sistemas de irrigação, de modo a melhorar o uso e a eficiência da irrigação e permitir a maximização do lucro.

A questão crítica colocada é se as soluções atuais são boas o suficiente para resolver os desafios futuros em termos de produção sustentável de alimentos para uma população crescente com menos recursos hídricos disponíveis para o setor agrícola e com ameaça de degradação física e química do solo (BASTIAANSEN et al., 2007). O decréscimo na disponibilidade de água para a agricultura criou a necessidade de aumentar a eficiência no uso da água, que pode ser conseguido principalmente pelo aumento da produtividade por unidade de água utilizada e pela redução das perdas e poluição da água no sistema (HATFIELD; SAUER; PRIEGER; 2001; HOWELL, 2001).

O conhecimento do movimento de água no solo em resposta a uma fonte pontual (gotejador) instalada na superfície do solo é de difícil entendimento, devido a grande complexidade do sistema solo-água. A infiltração da água na irrigação por gotejamento é tridimensional quando comparada a infiltração unidimensional dos outros métodos. A extração de água pelas raízes também difere consideravelmente dos outros métodos de irrigação. Assim, de maneira a dimensionar e operar um sistema de irrigação por gotejamento, as informações obtidas em outros sistemas de irrigação não podem ser aplicadas diretamente. Parâmetros de dimensionamento, como porcentagem da zona radicular que deve ser molhada, espaçamento e localização dos emissores, vazão do emissor, frequência de aplicação e volume da irrigação, são

determinados considerando a distribuição da água no perfil do solo, que deve ser o principal fator a ser estudado.

Para um bom dimensionamento da irrigação por gotejamento são necessárias informações a respeito da distribuição da água sob uma fonte gotejadora em diferentes vazões do emissor e para diferentes volumes de água aplicada. Também é necessário conhecer como essa distribuição da água é afetada pelas propriedades físico-hídricas do solo. Dessa forma, é possível dimensionar o sistema de irrigação de modo a molhar um volume suficiente do solo que assegure que o requerimento de água pelas plantas seja atendido, e que este volume de solo esteja altamente relacionado com a distribuição do sistema radicular da cultura.

O bulbo molhado formado na irrigação por gotejamento pode ser modelado a partir informações das propriedades físico-hídricas do solo. Mas apesar do grande progresso na modelagem, a aplicação de modelos na irrigação e drenagem ainda não foi implementada em nenhum nível de maneira substancial, nem na comunidade de pesquisa em irrigação e serviços de consultoria, nem no dimensionamento, operação e avaliação de sistemas de irrigação (BASTIAANSEN et al., 2007). Ainda segundo os autores, esta subutilização pode ser devido a:

- Pouca informação dos profissionais de manejo da água na agricultura;
- Falta de consciência das capacidades técnicas das ferramentas numéricas;
- Ausência de dados de solo, clima e cultura necessários para operar estes modelos;
- Descrença na capacidade das tecnologias computacionais serem capazes de resolver problemas práticos de irrigação e drenagem;
- Ausência de oportunidade de validação;
- Falta de um protocolo de calibração de modo que seja evitada a obtenção de resultados diversos e contrastantes;
- Pouca justificativa para uso de modelos e seleção equivocada de modelos em estudos;
- Os modelos não são específicos o suficiente para resolver problemas e questões específicas do local;
- Suposições e simplificações tomadas no modelo são inadequadas para capturar suficientemente a estrutura intrínseca do sistema que está sendo modelado;
- Atribuição de mais confiabilidade em medidas de campo do que em predições do modelo.

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo numérico utilizando a técnica dos volumes finitos para estimar a forma e as dimensões do volume de solo molhado sob irrigação por gotejamento, e verificar a validade do modelo através da comparação com dados recolhidos em condições experimentais.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A água no solo**

O solo é considerado um meio poroso constituído por três componentes: uma matriz sólida, uma fase gasosa e uma fase líquida. A água no solo ocupa o espaço poroso que surge do arranjo físico das partículas sólidas, e é intercambiável com a fase gasosa (HILLEL, 1998).

O estudo da água no solo pode ser organizado em dois grupos:

- Análise das propriedades de armazenamento de água;
- Análise das propriedades físico-hídricas do solo.

Estudos relacionados às propriedades de armazenamento se referem a habilidade do solo reter um conteúdo de água sob influência do potencial da água no solo em determinada profundidade, estreitamente relacionado a textura do solo. A curva de retenção de água no solo representa a relação de dependência existente entre o conteúdo de água no solo e o potencial da água no solo (potencial mátrico). Já os estudos das propriedades físico-hídricas do solo se referem à habilidade do solo em conduzir a água, incluindo a condutividade hidráulica.

#### **2.1.1 Conteúdo de água no solo**

O conteúdo de água de um solo é um de seus atributos mais importantes quando se trata de agricultura irrigada e também é um dos mais dinâmicos. É amplamente aceito como a quantidade de água que pode ser evaporada de uma amostra de solo por aquecimento em estufa a 105°C até que a massa se torne constante. Esta definição é a base do método padrão gravimétrico, que consiste na dupla pesagem da amostra, inicialmente úmida e depois de seca (PIKUL JR., 2008). O conteúdo de água, nesse caso, é a diferença entre a massa úmida e a massa seca da amostra e é expresso em base de massa (u). O método termogravimétrico é usado também para calibrar os outros métodos de determinação do conteúdo de água no solo (OR; WRAITH, 2002). No entanto, são conhecidas algumas fontes de erros desse método: não há garantias que o solo esteja completamente seco depois de determinado tempo na estufa a 105°C; presença de materiais orgânicos voláteis a temperaturas abaixo de 105°C; imprecisão na determinação do volume da amostra (TOPP; PARKIN; FERRÉ, 2006). A grande desvantagem do método termogravimétrico

é sua natureza destrutiva, além do tempo necessário para obtenção do conteúdo de água (TOPP; FERRÉ, 2005).

Outra forma usual e preferível de expressar o conteúdo de água é em base de volume, ou conteúdo de água volumétrico ( $\theta$ ), definido como o volume de água por unidade de volume de solo. Um valor pode ser facilmente convertido no outro conhecendo a massa específica do solo ( $\rho_s$ ), através da relação  $\theta = \rho_s u$ .

Quando o espaço poroso está completamente preenchido por água, diz-se que a amostra está saturada e o conteúdo de água é representado por  $\theta_s$  por outro lado, à pequena quantidade de água que resta em um solo após secagem ao ar livre chamamos de umidade residual, representada por  $\theta_r$  uma forma adicional de caracterizar o conteúdo de água é em termos de grau de saturação ou saturação efetiva (Se), dada pela expressão  $Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ , cujos valores variam entre 0 e 1.

Além do método padrão gravimétrico, outras metodologias chamadas indiretas são utilizadas para determinar o conteúdo de água no solo (OR; WRAITH, 2002). Elas se baseiam em propriedades físicas do solo que mantêm dependência com o conteúdo de água. Entre eles destaca-se os métodos eletromagnéticos, que medem diretamente a constante dielétrica (Ka) do solo. Essa propriedade do solo mantêm forte dependência com o conteúdo de água, devido ao fato do valor de Ka da água ser 80, enquanto que o Ka do ar é igual a 1, e do material mineral do solo ser entre 3 e 5 (LEDIEU et al., 1986).

### 2.1.2 Reflectometria no domínio do tempo - TDR

A TDR é um método intrusivo, não destrutivo, que permite tomar medidas repetidas no tempo e com coletas automáticas (data-logger), sendo possível monitorar um grande número de sondas simultaneamente (COELHO; OR, 1999; TOPP; FERRÉ, 2005; SOUZA; FOLEGATTI; OR, 2009).

Segundo Jones, Wraith e Or (2002), as vantagens da TDR em relação a outros métodos são:

- Grande exatidão na determinação do conteúdo de água volumétrico
- Sem risco de exposição à radiação associada a sonda de nêutrons e atenuação de raios gama
- Necessidade de calibração mínima
- Excelente resolução temporal e espacial

- Possibilidade de monitoramento contínuo através de automação e multiplicação
- Flexibilidade no projeto e disposição das sondas de acordo com os objetivos do usuário

Para obtenção do conteúdo de água no solo, um pulso eletromagnético é emitido pelo aparelho de TDR e encaminhado para dentro do solo através de um cabo coaxial até as sondas enterradas que atuam como guia da onda. Parte da onda é refletida no início da sonda devido a uma diferença de impedância entre o cabo coaxial e o corpo da sonda. O restante da onda se propaga pela sonda e quando atinge o final desta é novamente refletida. O tempo de viagem do pulso eletromagnético ao longo da sonda é dependente da velocidade do sinal e do comprimento da sonda (NOBORIO, 2001; ROBINSON et al., 2003; TOPP; FERRÉ, 2004). A velocidade, por sua vez, depende da constante dielétrica do material que circunda a sonda. Esta relação pode ser dada por:

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

$K_a$  - constante dielétrica

$c$  - velocidade do sinal eletromagnético no vácuo

$\Delta t$  - tempo de viagem do sinal

$L$  - comprimento da sonda

O tempo de viagem do sinal através da sonda é usado, juntamente com a velocidade de propagação para determinar a distância percorrida pelo sinal, valor conhecido como comprimento aparente da sonda ( $L_a$ ):

$$L_a = \frac{\Delta t c}{2} \quad (2)$$

Em que

$L_a$  – comprimento aparente da sonda

Dessa forma, a equação (1) pode ser simplificada para expressar a constante dielétrica como a relação entre o comprimento aparente da sonda e o comprimento real da sonda:

$$\sqrt{K_a} = \frac{L_a}{L} \quad (3)$$

E conseqüentemente,

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L}\right)^2 \quad (4)$$

Segundo Robinson et al. (2003), as sondas de TDR podem ser encontradas comercialmente ou então podem ser manufaturadas, a um menor custo e com possibilidade de customização, tanto no projeto como nas dimensões, conforme o objetivo. Os materiais utilizados em uma sonda convencional são: cabo coaxial, conector do tipo BNC, hastes ou placas metálicas para formas a guia de onda e um material de moldagem para formas a base da sonda.

A estimativa do conteúdo de água no solo é feita através de ma curva de calibração que relaciona o conteúdo de água em base de volume ( $\theta$ ) com a constante dielétrica ( $K_a$ ). Topp, Davis e Annan (1980) apresentaram as primeiras equações de calibração da TDR. A sugestão inicial dos autores foi que haveria uma relação universal válida para todos os tipos de solo. Entretanto, com o avanço das pesquisas relacionadas, ficou claro que uma equação universal não seria suficiente para descrever a relação  $\theta$ - $K_a$  em todos os tipos de solo, uma vez que há muitos fatores que influenciam nesta relação, de modo que uma série de equações empíricas tem sido propostas recentemente para os mais diferentes tipos de solo e condições ambientais (TOMMASELLI; BACCHI, 2001; TRINTINALHA et al., 2004; COELHO et al., 2006; SKIERUCHA et al., 2008; STANGL et al., 2009; KAISER et al., 2010).

A TDR tem sido utilizada com sucesso em vários estudos que necessitam medidas freqüentes e repetidas do conteúdo de água no solo. Segundo Topp e Reynolds (1998), a técnica da TDR revolucionou a habilidade de caracterizar o armazenamento e o movimento da água em um perfil de solo com a possibilidade de monitorar a água no solo espacial e temporalmente (MMOLAWA; OR, 2003; SOUZA; MATSURA, 2004; BARROS et al., 2009; SILVA et al., 2009; GONÇALVES et al., 2010; SILANS; WERLANG, 2011).

### 2.1.3 Potencial da água no solo

A água no solo está sujeita a forças de diferentes origens e de intensidade variável, resultando no chamado potencial da água no solo. Quando se usa a palavra água, refere-se, a rigor, à solução do solo (LIBARDI, 2005).

O potencial total da água no solo ( $\psi_t$ ) é composto dos seguintes componentes (DURNER; LIPSIUS, 2005):

- Mático ( $\psi_m$ ): resulta dos efeitos combinados dos fenômenos da capilaridade e adsorção dentro da matriz do solo quando este se apresenta não saturado;
- Osmótico ( $\psi_s$ ): determinado pela presença de solutos na água;
- Pressão ( $\psi_p$ ): definido pela pressão hidrostática de uma coluna de água formada em um solo saturado;
- Gravitacional ( $\psi_g$ ): determinado pela posição relativa do ponto de medição.

### 2.1.3.1 A curva de retenção

A relação fundamental entre o conteúdo de água no solo e o potencial mático é chamada curva de retenção (REF). Esta relação tem dependência com o tamanho e distribuição dos espaços porosos do solo, que por sua vez, é fortemente influenciado pela textura e estrutura do solo, assim como por outros constituintes, como a matéria orgânica. Tipicamente, a curva de retenção é descrita por equações contínuas não lineares, e como o potencial mático se estende por várias ordens de magnitude, ela é freqüentemente plotada em escala logarítmica (TULLER; OR, 2004).

São muitas as funções matemáticas que descrevem a curva de retenção, sendo mais comumente utilizada a equação de Van Genuchten (1980):

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha |\psi_m|)^n} \right]^m \quad (5)$$

Em que:

Se – saturação efetiva

$\theta$  – conteúdo de água volumétrico

$\theta_s$  – conteúdo de água na saturação

$\theta_r$  – conteúdo de água residual

$|\psi_m|$  - valor absoluto do potencial mático,

$\alpha$ ,  $m$  e  $n$  - parâmetros de ajuste dependentes do formato da curva de retenção;  $\alpha > 0$ ;  $n > 1$ ;

$0 < m < 1$ .

Uma simplificação comum deste modelo é assumir  $m = 1 - 1/n$ . Geralmente,  $\theta_s$  é conhecido e facilmente medido, restando  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$  a serem estimados. Algumas vezes,  $\theta_r$  é tido

como o conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa, embora seja vantajoso usá-lo como parâmetro de ajuste.

A estimativa dos parâmetros das equações de Van Genuchten a partir de dados experimentais requer uma quantidade suficiente de pares de dados medidos e de um programa que realiza ajuste de regressão não-linear (DOURADO-NETO et al., 2000).

## 2.2 Movimento da água no solo

### 2.2.1 Equação de Darcy-Buckingham

Darcy foi quem primeiro estabeleceu a equação para movimento de água em meios porosos saturados. Ele concluiu que o volume de água que se desloca de um ponto para outro por unidade de área é proporcional a diferença de potencial entre os dois pontos e inversamente proporcional a distância entre estes (CAMERON; BUCHAN, 2008).

$$q = K_s \left( \frac{\psi_b - \psi_c}{z} \right) \quad (6)$$

Em que,

$q$  - densidade de fluxo

$K_s$  - constante de proporcionalidade, que é definida como a condutividade hidráulica saturada

$\psi_b - \psi_c$  = gradiente de potencial

$Z$  - distância entre os pontos.

No entanto, os solos agrícolas se encontram na maior parte do tempo em condição de não saturação, e uma adaptação a equação de Darcy foi proposta por Buckingham. Ele propôs que a condutividade hidráulica seria proporcional ao conteúdo de água no solo, estabelecendo uma relação entre  $K-\theta$  (NARASHIMHAMN, 2005).

$$q = K(\theta) \left( \frac{\psi_b - \psi_c}{z} \right) \quad (7)$$

em que,

$K(\theta)$  – condutividade hidráulica não saturada em função do conteúdo de água no solo.

Sendo esta forma conhecida atualmente como equação de Darcy-Buckingham.

### 2.2.2 Condutividade hidráulica em solo não saturado

A condutividade hidráulica pode ser definida como a habilidade de um meio poroso em transmitir um fluido (REICHARDT; TIMM, 2004). A condutividade hidráulica saturada é tida como constante quando o solo é rígido, homogêneo e isotrópico. Os fatores principais que afetam a sua magnitude são as características físicas do solo, especialmente a textura e a estrutura (REYNOLDS; TOPP, 2006).

Mais importante para descrever o movimento da água em solos agrícolas é a condutividade hidráulica do solo não saturado e sua relação com o conteúdo de água no solo  $K(\theta)$ . A condutividade hidráulica não saturada pode ser representada por uma fração da condutividade hidráulica saturada que mantém dependência com o conteúdo de água no solo.

$$K(\theta) = K_r(\theta) K_s \quad (8)$$

Em que,

$K(\theta)$  – condutividade hidráulica não saturada

$K_r(\theta)$  – condutividade hidráulica relativa em função do conteúdo de água no solo

$K_s$  – condutividade hidráulica saturada

Uma maneira freqüentemente utilizada para determinar a condutividade hidráulica não saturada é a partir da curva de retenção. O modelo de Mualem-Van Genuchten é atualmente o mais utilizado e pode ser descrito como (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980):

$$K_r(\theta) = S_e^{0.5} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (9)$$

Em que,

$S_e$  – grau de saturação

$m$  – parâmetro de ajuste da curva de retenção, com restrição que  $m=1-1/n$

### 2.2.3 Equação de Richards

A equação de Darcy-Buckingham só é válida para condição de equilíbrio dinâmico, ou seja, quando as características do fluxo não variam com o tempo. No entanto, a maioria das situações na natureza não de comportam dessa forma. Richards (1931) reuniu a equação de

Darcy-Bunckingham com a equação da continuidade estabelecendo a equação que governa o movimento da água em solos não saturados para qualquer condição.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \quad (10)$$

Em que x corresponde a uma direção.

Substituindo na equação acima a densidade de fluxo pela equação de Darcy-Buckingham obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -K_x(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \quad (11)$$

Portanto, de maneira prática pode-se dizer que a variação de armazenagem de água durante certo intervalo de tempo, em um determinado comprimento de solo, pode ser determinada pela diferença entre a densidade de fluxo que sai através de uma das extremidades e a densidade de fluxo que entra pela outra extremidade no intervalo de tempo considerado (RICHARDS, 1931).

### 2.3 Simulação do movimento da água no solo

O solo não saturado é um sistema altamente complexo. O processo de movimento da água nesse solo pode ser descrito através de modelos físico-matemáticos, no entanto, suas interações são altamente não lineares, o que dificulta bastante a modelagem (SIMUNEK, 2005). Muitos modelos de níveis de complexidade diferentes têm sido desenvolvidos durante as últimas décadas para quantificar o movimento da água na zona não saturada. Tais modelos variam de modelos analíticos e semi-analíticos relativamente simples até os mais complexos modelos numéricos. Podemos incluir também os modelos empíricos, válidos somente para as condições em que foram realizados os estudos. Geralmente, os modelos são baseados nas equações que governam o movimento da água no solo, em especial a equação de Richards (MMOLAWA; OR, 2000).

### **2.3.1 Modelos analíticos**

Os métodos analíticos representam uma abordagem clássica para resolver equações diferenciais. A equação de Richards, altamente não linear, só pode ser resolvida analiticamente para um número bastante limitado de casos envolvendo severas simplificações, como por exemplo, solos homogêneos e relações simples (lineares) entre as propriedades físico-hídricas do solo não saturado (FEDDES et al., 1988).

Parlange (1972) derivou expressões analíticas para a absorção de água a partir de cavidades cilíndricas e esféricas. Também para modelar o movimento da água, Tung-Chu (1993) desenvolveu uma teoria em que os poros do solo são considerados como um feixe de tubos capilares, sendo possível separar o fluxo de água em poros maiores dos poros menores. Dessa forma, o autor propôs um modelo baseado na teoria do feixe de tubos capilares para descrever o movimento da água em macroporos.

### **2.3.2 Modelos numéricos**

Apesar dos modelos analíticos e semi-analíticos serem de mais fácil utilização, o crescimento do poder computacional disponível, o desenvolvimento de técnicas numéricas mais precisas e estáveis e a disponibilidade em domínios públicos e comerciais tem aumentado consideravelmente o uso de modelos numéricos recentemente. O uso dos modelos numéricos tem sido facilitado pela implementação de interfaces gráficas sofisticadas (SIMUNEK; BRADFORD, 2008).

Métodos numéricos são superiores aos métodos analíticos em termos de serem capazes de resolver problemas práticos. Eles permitem usar geometrias complexas que refletem melhor a realidade, controlam os parâmetros no espaço e no tempo, descrevem condições iniciais e de contorno realísticas e podem fazer uso de relações não lineares. Os métodos numéricos usualmente subdividem o tempo e o espaço em pequenas partes, como as diferenças finitas, elementos finitos e os volumes finitos, e reformulam a forma contínua a partir de equações diferenciais (SIMUNEK, 2005).

Usando métodos de análise numérica Brandt et al. (1971) desenvolveram uma solução matemática para o movimento multidimensional transitório a partir de uma fonte pontual. Os autores consideraram um modelo em coordenadas cartesianas e um modelo em coordenadas cilíndricas, cujos resultados mostraram que este método pode ser utilizado com segurança.

Taghavi et al. (1984) utilizaram elementos finitos para resolver as equações diferenciais envolvidas no movimento da água no solo, aplicando transformação logarítmica para suavizar as equações. Seus resultados se aproximaram de dados obtidos experimentalmente em laboratório e em campo. A vantagem desse modelo, segundo os autores, seria a capacidade de simular em condições de solo bastante seco.

Outra técnica utilizada é a dos volumes de controle (BOTREL, 1988), em que o solo foi imaginariamente dividido em anéis concêntricos, onde a linha do gotejador é o eixo de simetria, e foram observados os perfis radiais de distribuição da água no solo.

Na mesma linha, considerando o solo isotrópico e homogêneo, Angelaskis et al. (1993) resolveram a equação de Richards pelo método dos elementos finitos assumindo fluxo bidimensional. De modo geral, a distância vertical simulada da frente de molhamento foi bastante próxima aquela observada em experimentos de campo, mas a distância horizontal foi subestimada para longos períodos de tempo.

Bhatnagar e Chauhan (2008) criaram um modelo numérico em um sistema de coordenadas esféricas achatado nos pólos com raio variável com o tempo devido as mudanças na taxa de infiltração. Os resultados do modelo propostos estão em concordância com dados experimentais, indicando que o modelo pode ser aplicado em condições especiais da irrigação localizada, como longos tempos de aplicação de água, redistribuição da água no solo após cessar ou reduzir a vazão da emissão, entre outros.

Uma solução numérica para uma forma linearizada da equação de movimento da água no solo foi proposta para vários tipos de fontes: ponto-fonte, linha-fonte e disco-fonte (WARRICK, 1974; LOMEN; WARRICK, 1974; WARRICK; LOMEN, 1976).

Yao et al. (2011) utilizaram o modelo SWMS-2D para simular as dimensões horizontal e vertical da zona molhada a partir de uma fonte pontual subsuperficial. Comparação com resultados de laboratório indicaram que não houve diferenças significativas entre os dados simulados e os dados observados. Os autores também observaram que este modelo não foi sensível a sobrepressão causada pela saturação do solo em torno do emissor.

Zhou et al. (2007) realizaram um estudo para simular a distribuição e a dinâmica da água no solo em um sistema de irrigação localizada por gotejamento com molhamento parcial alternado de raízes. Os autores propuseram uma solução numérica (APRI-model) para o

problema e obtiveram um erro médio relativo entre os dados medidos e os dados simulados da ordem de 10% para o modelo APRI, indicando bom desempenho nas simulações.

Elmaloglou e Diamantopoulos (2009) apresentaram um modelo matemático que descreve o movimento da água a partir de linhas gotejadoras subsuperficiais considerando extração de água pelas raízes, evaporação da água do solo na superfície e a histerese na curva de retenção. Eles simularam a distribuição de água para três tipos de solos com diferentes classes texturais e para duas vazões do emissor. Os resultados obtidos pelos autores se mostraram úteis na melhoria dos sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial por fornecer informações para o dimensionamento e manejo do sistema para diferentes solos e vazões da linha gotejadora.

### **2.3.3 O modelo HYDRUS**

Um modelo que vem sendo extensivamente utilizado atualmente para modelar o fluxo de água no solo em problemas aplicados a irrigação é o pacote HYDRUS. Ele utiliza de métodos numéricos para resolver a equação de Richards e simular o movimento da água em meios porosos não saturados ou saturados (SIMUNEK et al., 2008). Atualmente, há duas versões disponíveis: HYDRUS-1D (código livre) e HYDRUS 2D/3D.

Kandelous e Simunek (2010) utilizaram o HYDRUS-2D para simular o movimento da água e prever a distribuição espacial do conteúdo de água no solo e determinar as dimensões horizontal, acima e abaixo da zona molhada a partir de uma fonte pontual enterrada no solo. Os resultados simulados foram comparados com dados de campo e de laboratório obtidos em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial com diferentes profundidades de instalação dos emissores e diferentes valores de vazão. Com base nos resultados obtidos, os autores puderam concluir que a correspondência entre simulações e observações foi muito boa.

Kandelous et al. (2011) estudaram a distribuição do conteúdo de água entre dois emissores, com sobreposição, em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial. Os autores concluíram que o sistema pode ser bem descrito por um modelo bidimensional apenas antes de ocorrer sobreposição do bulbo molhado, e a partir daí seria necessário um modelo tridimensional.

Skaggs et al. (2004) compararam as simulações de um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial com fonte linear realizadas com o HYDRUS-2D com dados

observados no campo, em um sistema instalado a 6 cm de profundidade e com 3 vazões. Eles observaram uma boa concordância entre os dados simulados e os dados observados de conteúdo de água no solo.

Selle et al. (2011) utilizaram o HYDRUS para avaliar a percolação em profundidade na irrigação por superfície. No entanto, os resultados não foram satisfatórios, provavelmente devido a caminhos preferenciais de movimento da água no solo.

Ben-Gal et al. (2004) simularam uma condição de gotejamento subsuperficial em que o tubo gotejador é instalado em uma trincheira preenchida com cascalho. Esta configuração teve o intuito de evitar uma possível redução da vazão do emissor devido a uma sobrepressão gerada pelo solo saturado no entorno do emissor. Os autores usaram o HYDRUS-2D para simular essa condição, e encontraram uma boa concordância com dados observados em um sistema de gotejamento subsuperficial instalado na cultura da uva.

Provenzano (2007) avaliou o HYDRUS-2D comparando os resultados da simulação com dados observados em experimento de potencial matricial para um sistema de gotejamento subsuperficial instalado a 10 cm de profundidade, e encontrou uma concordância satisfatória entre os dados.

Lazarovitch et al. (2005) incluíram uma nova condição de contorno nas simulações realizadas pelo HYDRUS-2D. Segundo os autores, quando a vazão do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial é maior que a capacidade de infiltração do solo, ocorre uma sobrepressão na saída do emissor, que leva a uma diminuição da sua vazão. Assim, os autores implementaram uma condição de contorno ao modelo numérico que descreve a infiltração a partir de uma fonte subsuperficial e considera a curva característica (pressão-vazão) do emissor.

Siyal e Skaggs (2009) realizaram simulações com o HYDRUS (2D/3D) para um sistema de irrigação subsuperficial utilizando capsula porosa como emissor. Os dados simulados de conteúdo de água tiveram boa concordância com os dados observados.

#### **2.3.4 Modelos empíricos**

Modelos empíricos têm sido apresentados na literatura com frequência. Geralmente sua utilização é bastante simples e eles fornecem meios de calcular as distâncias vertical e horizontal da frente de molhamento.

Por exemplo, Schwartzman e Zur (1986) desenvolveram um modelo empírico para estimar as distâncias vertical e horizontal da frente de molhamento a partir de uma fonte pontual superficial. Seu modelo foi desenvolvido baseado em experimentos de campo conduzidos em dois solos (arenoso e siltoso) com vazão dos emissores de  $1,1 \times 10^{-6}$  e  $5,6 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Kandelous et al. (2008) desenvolveram um modelo empírico para estimar a distância da frente de molhamento no sentido horizontal, acima e abaixo a partir de uma fonte pontual subsuperficial. Este modelo foi desenvolvido baseado em dados coletados em laboratório de um solo médio-argiloso usando um gotejador instalado a 30 cm de profundidade e com uma vazão de  $2,78 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Singh et al. (2006) desenvolveram um modelo de simulação usando uma abordagem semi-empírica e o método da análise dimensional para determinar a geometria do bulbo molhado formado por uma fonte linear subsuperficial. Os valores preditos de largura e profundidade da zona molhada foram comparados com dados obtidos em experimentos de campo, e não foram observadas diferenças significativas entre esses dados.

Lazarovitch et al. (2009) utilizaram redes neurais artificiais para treinar um modelo que descreve a distribuição espacial e temporal da água no solo a partir de um gotejador. A partir das propriedades físico-hídricas do solo e da vazão do emissor, o modelo é usado para estimar a profundidade até o centro de massa da água aplicada ao solo, e a difusão vertical e radial em torno do centro de massa. Hinnell et al. (2010), utilizando esta rede neural artificial, desenvolveram um software denominado NeuroDrip, que possui uma interface gráfica embutida no Microsoft Excel para prever as dimensões do bulbo molhado.

### **2.3.5 Aplicação de modelos de movimento da água no solo**

Lafolie et al. (1998) apresentaram uma solução numérica para as equações diferenciais do movimento da água no solo, cujo objetivo principal foi prever as dimensões do disco saturado formado na superfície do solo na irrigação por gotejamento.

Moncef et al. (2002) utilizaram diferenças finitas para resolver a equação de Richards em um sistema com simetria axial a partir de uma fonte pontual superficial. Os autores utilizaram os resultados para derivar uma equação que permite calcular a máxima distância vertical da frente

de molhamento pela simples medição do raio molhado na superfície do solo. Os resultados obtidos mostraram uma boa concordância entre os valores simulados, calculados e medidos.

Meshkat et al. (1998) utilizaram o modelo SWMS-2D implementado de forma 3D em uma sistema com simetria axial para simular a infiltração, redistribuição da água e evaporação da superfície do solo em sistemas de irrigação por gotejamento, e seus resultados tiveram boa concordância com dados medidos experimentalmente.

Schmitz et al. (2002) combinaram um modelo numérico de fluxo subsuperficial com a técnica das redes neurais artificiais para resolver o problema de otimização do perfil de solo molhado em irrigação localizada.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Construção das sondas de TDR

Sondas de TDR com três hastes (Figura 1) foram construídas segundo procedimento descrito por Souza et al. (2006). Os materiais utilizados para construção de cada sonda foram:

- cabo coaxial RFM-KMP, RG-58, 50  $\Omega$ , comprimento 3,3 m
- conector BNC rosqueável
- haste de aço inoxidável, AISI 304, diâmetro 3 mm
  - 2x comprimento 240 mm
  - 1x comprimento 235 mm.
- resina epóxi Epoxiglass 1504, 33 g
- catalisador Epoxiglass 1601, 6 g

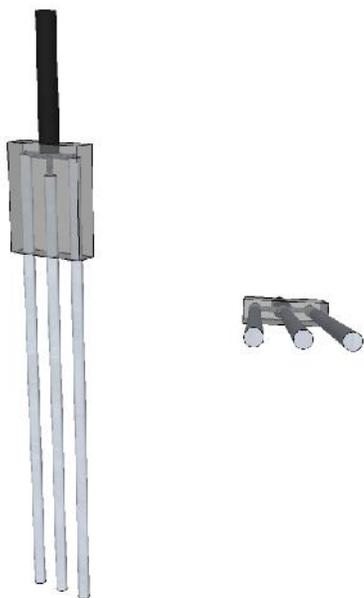


Figura 1 - Representação de uma sonda de TDR com três hastes

O cabo coaxial foi cortado no comprimento de 3,30 m. Em uma das extremidades, foi instalado o conector BNC. Na outra extremidade, foram soldadas as hastes de aço inox, utilizando uma liga de estanho (Sn/Pb 50/40), da seguinte forma: uma no condutor central do cabo coaxial (haste de 235 mm) e duas na malha metálica do cabo coaxial (haste de 240 mm).

Para fixar adequadamente a solda foi necessário lixar as extremidades das hastes de aço inox e aplicar uma solução de ácido fosfórico 1% para que houvesse maior adesão da solda.

Em uma estrutura de madeira com um molde de silicone foram acomodados as hastes e os cabos da sonda previamente soldados (Figura 2). Este molde, com capacidade para acomodar 10 sondas de cada vez, serviu para que as hastes da sonda permanecessem espaçadas 1,5 cm entre si e com 19 cm da haste para fora do bloco de resina.



Figura 2 - Sondas acomodadas no molde de silicone na estrutura de madeira para aplicação da resina

Em seguida, foi adicionada a resina epóxi, na proporção de 20 g de catalisador para cada 100 g de resina. Após secagem completa da resina, em torno de 6 horas após a mistura, esta formou um bloco resistente que promoveu a sustentação do esqueleto da sonda, assim como serviu de marcação para o início da sonda no TDR100. Para este trabalho foram confeccionadas um total de 450 sondas.

Com as sondas já prontas, procedeu-se um teste individual em cada uma com objetivo de detectar alguma possível falha na confecção. Este teste consistiu em testar com um multímetro se não havia curto-circuito entre as hastes metálicas da sonda. As sondas que apresentaram defeito foram consertadas ou, caso não fosse possível o conserto, descartadas.

### 3.2 Determinação do bulbo molhado com a TDR

Para determinar o perfil do bulbo molhado foi montado um ensaio em casa de vegetação nas dependências do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, município de Piracicaba, Estado de São Paulo.

O perfil do bulbo molhado formado no solo abaixo de um emissor do tipo gotejador foi determinado para 3 tipos de material: areia, solo arenoso e solo argiloso e para 3 vazões nominais do emissor: 2, 4 e 6 L/h. As características dos materiais utilizados no experimento estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação, textura, densidade e parâmetros da curva de retenção dos três tipos de materiais (areia, solo arenoso e solo argiloso) utilizados neste trabalho

Material	Classificação	Textura (g kg <sup>-1</sup> )			Densidade g cm <sup>-3</sup>
		Areia	Silte	Argila	
Areia	Areia média	1000	-	-	1,40
Solo Arenoso	Latossolo Vermelho-amarelo	687	119	194	1,52
Argiloso	Latossolo Vermelho-escuro	382	232	386	1,33

Material	----- Parâmetros da curva de retenção -----					Ks cm h <sup>-1</sup>
	$\alpha$	m	n	$\theta_s$	$\theta_r$	
Areia	0,069	0,7792	4,53	0,454	0,067	312,3
Solo Arenoso	0,199	0,351	1,542	0,412	0,121	18,2
Argiloso	0,197	0,278	1,386	0,471	0,215	9,0

As vazões medidas estão apresentadas na Tabela 2. Foram utilizados emissores com vazão nominal de 2 L/h e para compor as vazões de 4 L/h e 6 L/h foram usados 2 e 3 gotejadores em conjunto, respectivamente, sendo estes unidos e posicionados no centro da caixa. A vazão foi determinada imediatamente antes do ensaio, e consistiu na leitura do volume de água emitido pelo gotejador em uma proveta graduada em um determinado intervalo de tempo.

Tabela 2 - Vazão nominal e vazão medida dos emissores utilizados neste trabalho

Vazão (L h <sup>-1</sup> )	
Nominal	Medida
2	1,81*
4	3,81
6	5,16

\*A vazão medida foi obtida pela média de 9 observações

Cada uma das combinações entre tipos de materiais e vazão foram repetida três vezes em caixas diferentes, totalizando 27 medições.

Todos os três materiais foram peneirados e acondicionados em caixas de polietileno com capacidade de 1000 L e com as seguintes dimensões: altura: 0,72 m; diâmetro inferior: 1,21 m;

diâmetro superior: 1,51 m. Simultaneamente ao enchimento das caixas com os materiais, foi instalado o grid de sondas de TDR.

O grid de sondas de TDR foi composto por 50 sondas distribuídas em 5 linhas e 10 colunas, com espaçamento de 10 cm entre sondas, tanto na vertical como na horizontal (Figura 3). A linha inferior foi colocada a uma distância de 15 cm a partir do fundo da caixa e a linha superior permaneceu 5 cm abaixo da superfície do material. As colunas foram instaladas de modo que ficassem centralizadas na caixa. As sondas foram devidamente identificadas na parte do cabo que permaneceu para fora do material. O emissor foi instalado no centro da caixa, de modo que o gotejamento ocorresse entre a 5ª e a 6ª sonda.

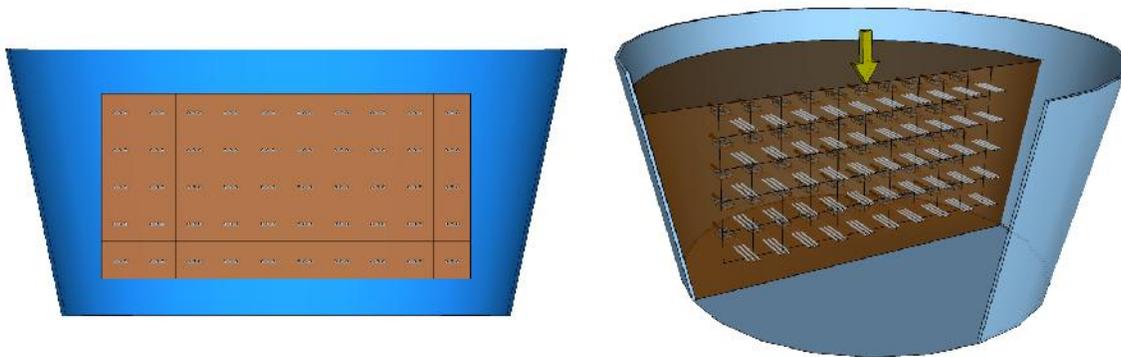


Figura 3 - Representação do grid de sondas de TDR. A seta amarela indica o local em que foi instalado o emissor

Para realizar a leitura da constante dielétricas, foi utilizado um reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific), interligado a um coletor de dados (CR1000 Datalogger, Campbell Scientific), que realiza a análise do sinal eletromagnético e 8 multiplexadores (SDMX-50, Campbell Scientific), cuja configuração permitia a leitura em simultâneo das 50 sondas que compunham o grid. O grid inteiro era lido uma vez a cada 2 minutos. O algoritmo do TDR analisa o tempo de viagem do sinal eletromagnético no material circundante para determinar o comprimento aparente da sonda ( $L_a$ ) e compara com o tamanho real da sonda. O quadrado da relação  $L_a/L$  é igual à constante dielétrica ( $K_a$ ) no ponto medido.

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L}\right)^2 \quad (12)$$

Os valores da constante dielétrica foram armazenados em um arquivo e depois foram processados com auxílio de uma planilha eletrônica. Os dados de constante dielétrica ( $K_a$ ) foram

transformados em umidade a base de volume ( $\theta$ ) utilizando curvas de calibração específicas para cada material estudado, dadas a seguir:

Areia (VALLONE; CATALDO; TARRICONE, 2007):

$$\theta = -1,42 \cdot 10^{-1} + 5,77 \cdot 10^{-2} \cdot Ka - 2,00 \cdot 10^{-3} \cdot Ka^2 + 3,00 \cdot 10^{-5} \cdot Ka^3 \quad (13)$$

Solo arenoso (TOMMASELLI; BACCHI, 2001):

$$\theta = -2,02 \cdot 10^{-2} + 2,57 \cdot 10^{-2} \cdot Ka - 7,00 \cdot 10^{-4} \cdot Ka^2 + 1,10 \cdot 10^{-5} \cdot Ka^3 \quad (14)$$

Solo argiloso (TOMMASELLI; BACCHI, 2001):

$$\theta = -3,33 \cdot 10^{-2} + 3,93 \cdot 10^{-2} \cdot Ka - 1,50 \cdot 10^{-3} \cdot Ka^2 + 2,00 \cdot 10^{-5} \cdot Ka^3 \quad (15)$$

A evolução temporal do bulbo molhado foi analisada pela diferença de umidade obtida em cada leitura em relação à umidade inicial. O conteúdo de água em cada combinação de material e vazão do emissor foi calculado pela média aritmética de 6 leituras, sendo 2 leituras opostas em uma mesma caixa multiplicado por 3 caixas. Dessa forma, o grid analisado correspondeu à metade do grid instalado na caixa, ou seja, 5 linhas x 5 colunas.

Os dados de umidade foram interpolados por *krigagem* para um grid mais denso utilizando o programa Surfer (Golden Software). O novo grid continha 100 linhas por 100 colunas, com espaçamento de 0,5 cm entre cada ponto. Ainda no programa Surfer, foram traçados gráficos de isolinhas de umidade para cada tempo. Estas tarefas foram automatizadas com um script escrito em linguagem BASIC (Anexo A).

Foi efetuado o balanço de massa da água no solo com o intuito de avaliar a precisão da TDR. O volume de água incrementado no solo medido com a TDR foi calculado pela equação:

$$V_t = V_{ini} - \sum_{r=1}^{r_{max}} \sum_{z=1}^{z_{max}} \theta_{t,r,z} \pi \{[(r+1)R]^2 - [(r-1)R]^2\} Z T \quad (16)$$

Em que,

$V_t$  – volume de água acrescentado no solo em um intervalo de tempo  $t$

$V_{ini}$  – volume de água no solo no instante inicial ( $t=0$ )

$\theta_{t,r,z}$  – conteúdo de água volumétrico no tempo  $t$  e nas posições  $r,z$

$r$  – posição horizontal do anel

$r_{\max}$  – valor máximo do raio

$z^{\max}$  – valor máximo da profundidade

$z$  – posição vertical do anel

$R$  – largura do anel

$Z$  – altura do anel

$T$  - tempo

O volume de água medido e o volume de água aplicado pelo gotejador foram comparados através da raiz do erro quadrático médio e do coeficiente de correlação.

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{(\theta_{\text{simulado}} - \theta_{\text{medido}})^2}{n}} \quad (17)$$

Em que,

REQM – raiz do erro quadrático médio;

$\theta_{\text{simulado}}$  – conteúdo de água volumétrico simulado;

$\theta_{\text{medido}}$  – conteúdo de água volumétrico medido com a TDR.

### 3.3 Simulação do bulbo molhado

Um modelo numérico foi desenvolvido para simular a distribuição da água no perfil do solo abaixo de uma fonte pontual. A solução da equação diferencial para o movimento da água em solo não saturado foi realizada pela discretização do espaço-tempo utilizando a técnica dos volumes finitos (Figura 4).

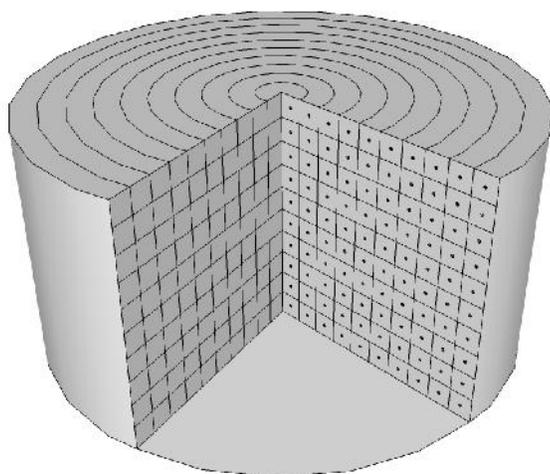


Figura 4 - Discretização do espaço pelo método dos volumes finitos

O volume de solo em que ocorre a infiltração da água emitida pelo gotejador foi dividido em anéis cada qual com largura  $R$  e profundidade  $Z$ . Considerando o índice “ $z$ ” como endereço do anel ao longo da profundidade e o índice “ $r$ ” como endereço do anel ao longo do raio, a variação de umidade em um anel em determinado intervalo de tempo pode ser descrita pela equação 18:

$$\frac{\Delta\theta_{(z,r)}}{\Delta t} = \frac{Vva_{(z,r)} - Vvb_{(z,r)} + Vhe_{(z,r)} - Vhd_{(z,r)}}{VAn\theta_{(z,r)}} \quad (18)$$

Em que,

$\frac{\Delta\theta_{(z,r)}}{\Delta t}$  - variação de umidade no anel  $(z,r)$  em um intervalo de tempo

$Vva_{(z,r)}$  - volume de água que adentra no anel  $(z,r)$  pela face superior

$Vvb_{(z,r)}$  - volume de água que deixa o anel  $(z,r)$  pela face inferior

$Vhe_{(z,r)}$  - volume de água que adentra no anel  $(z,r)$  pela face esquerda

$Vhd_{(z,r)}$  - volume de água que deixa o anel  $(z,r)$  pela face direita

Sendo,

$$Vva_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z,r)} + K(\theta)_{(z-1,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z,r)} - \psi(\theta)_{(z-1,r)} + Z}{Z} \right) \{ [rZ]^2 - [(r-1)Z]^2 \} \Delta t \quad (19)$$

$$Vvb_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z+1,r)} + K(\theta)_{(z,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z+1,r)} - \psi(\theta)_{(z,r)} + Z}{Z} \right) \{ [rZ]^2 - [(r-1)Z]^2 \} \Delta t \quad (20)$$

$$Vhe_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z,r-1)} + K(\theta)_{(z,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z,r)} - \psi(\theta)_{(z,r-1)}}{z} \right) 2\pi Z^2 r \Delta T \quad (21)$$

$$Vhd_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z,r+1)} + K(\theta)_{(z,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z,r+1)} - \psi(\theta)_{(z,r)}}{z} \right) 2\pi Z^2 (r+1) \Delta T \quad (22)$$

Em que,

$K(\theta)$  - condutividade hidráulica não saturada em função do conteúdo de água no solo

$\psi(\theta)$  - potencial mátrico em função do conteúdo de água no solo

$R$  – largura do anel

$Z$  – altura do anel

$\Delta T$  – tempo de simulação

Os valores de  $K(\theta)$  e  $\psi(\theta)$  foram calculados pelas equações de Mualem-Van Genuchten:

$$K(\theta) = Kr(\theta)Ks \quad (8)$$

$$Kr(\theta) = Se^{0.5} \left( 1 - \left( 1 - Se^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (9)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha |\psi_m|)^n} \right]^m \quad (5)$$

Com  $m=1-1/n$ .

As condições de contorno atribuídas foram que não há fluxo de água nas extremidades do volume estudado, ou seja:

$$\begin{array}{ll} \text{Quando } z=1; & Vva=0 \\ z=Z_{\text{máx}}; & Vvb=0 \\ r=1; & Vhe=0 \\ r=r_{\text{máx}}; & Vhd=0 \end{array}$$

Inicialmente considerou-se que toda água emitida pelo gotejador ficava armazenada no anel mais central ( $r=1, z=1$ ). Com o passar do tempo, quando este anel atingiu a saturação, a água emitida pelo gotejador era distribuída para os anéis vizinhos, aumentando o raio da zona saturada.

Um algoritmo em linguagem Visual Basic foi escrito para implementar o conjunto de equações acima descrito e simular a evolução do bulbo molhado no tempo (Anexo B).

Foi simulada a formação do bulbo molhado nas mesmas condições do experimento descrito no item 3.2. Os gráficos de isolinhas de umidade foram traçados no software Surfer. Os valores simulados foram então comparados com os valores medidos no ensaio com a TDR através da raiz do erro quadrático médio:

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{(\theta_{\text{simulado}} - \theta_{\text{medido}})^2}{n}} \quad (23)$$

Em que,

REQM – raiz do erro quadrático médio;

$\theta_{\text{simulado}}$  – conteúdo de água volumétrico simulado;

$\theta_{\text{medido}}$  – conteúdo de água volumétrico medido com a TDR.

n – número de observações



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Determinação do bulbo molhado com a TDR

Os resultados com a comparação do volume de água medido com a TDR e o volume de água realmente aplicado com o gotejador estão apresentados na Figura 5 e na Tabela 3. Essa comparação mostra a qualidade da TDR em determinar corretamente o conteúdo de água no solo assim como a qualidade da curva de calibração utilizada. Na Tabela 3, observa que o coeficiente de correlação entre o volume aplicado e o volume medido ficou sempre acima de 0,98, indicando que as curvas de calibração utilizadas tiveram boa exatidão na determinação do conteúdo de água volumétrico a partir da medida da constante dielétrica do solo com a TDR. Analisando a Figura 5 pode-se observar que os valores medidos foram quase sempre subestimados pelas curvas de calibração. O volume de água medido foi 0,412 L abaixo do valor aplicado para a areia, 0,605 L para o solo arenoso e 0,402 L para o solo argiloso. Considerando o tempo de aplicação de água, estes valores correspondem a 8,5, 11,9 e 9,3% do volume total de água aplicado, respectivamente.

Tabela 3 - Coeficiente de correlação e raiz do erro quadrático médio (REQM) e entre os dados medidos pelo TDR e a quantidade de água aplicada pelo gotejador

	Areia			Solo arenoso			Solo argiloso		
	2 L h <sup>-1</sup>	4 L h <sup>-1</sup>	6 L h <sup>-1</sup>	2 L h <sup>-1</sup>	4 L h <sup>-1</sup>	6 L h <sup>-1</sup>	2 L h <sup>-1</sup>	4 L h <sup>-1</sup>	6 L h <sup>-1</sup>
Correlação	0,992	0,987	0,996	0,993	0,987	0,985	0,982	0,992	0,993
REQM*	0,441	0,552	0,242	0,659	0,709	0,448	0,324	0,436	0,446
REQM (por material)	0,412			0,605			0,402		

\*REQM em litros

Resultados semelhantes foram obtidos por Souza e Matsura (2004) onde os autores utilizando sondas com segmentos de 0,20 m obtiveram bons resultados na diferença do volume de água aplicado e estimado, subestimando em média 0,20 L. Serrarens et al. (2000) mediram o armazenamento de água em um solo cultivado com feijão e sorgo utilizando a TDR. Durante o período de medição, houve 3 eventos de irrigação (70 mm) e vários eventos de precipitação (até 15 mm). Os resultados mostram que o armazenamento de água medido pela TDR foi altamente relacionado aos eventos de irrigação/precipitação.

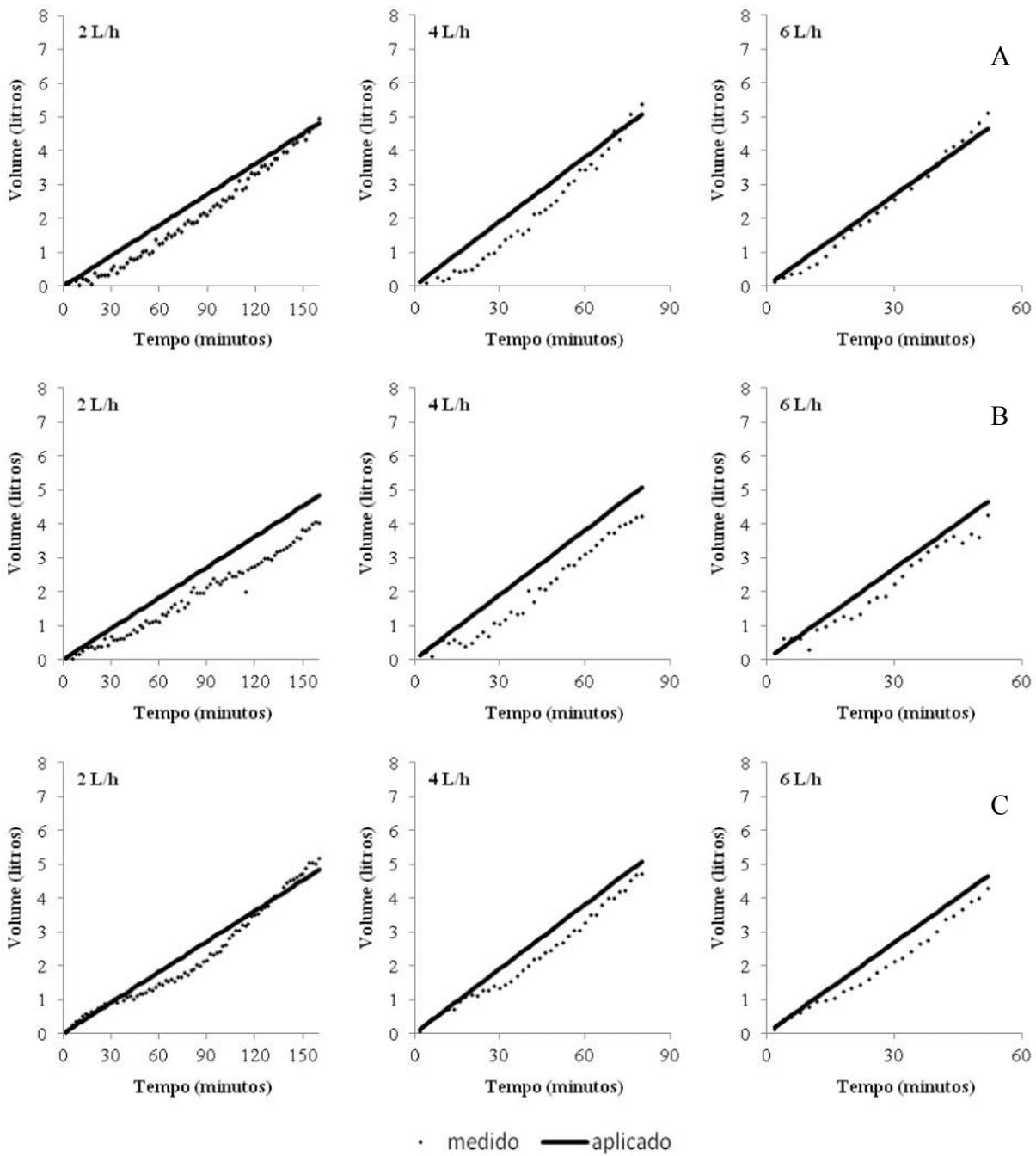


Figura 5 - Volume de água aplicado pelo gotejador vs volume de água medido com o TDR para os três tipos de materiais: areia (A), solo arenoso (B) e solo argiloso (C)

Evet, Tolck e Howell (2006) testaram diferentes sensores de água no solo e relataram que a TDR foi a mais precisa, com RMSE de  $0,024 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  no balanço de massa para conteúdos de água próximos da saturação e  $0,015 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para conteúdos de água menores. Em outro ensaio, os autores encontraram valores ainda melhores, em torno de  $0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (EVETT; TOLK; HOWELL, 2005). Souza, Or e Matsura (2004) analisaram um novo desenho de sonda de TDR para medir o conteúdo de água no solo em grande volume. Em seus resultados, a diferença entre o volume de água efetivamente aplicado e o volume medido com a TDR foi de 0,07 L para diferentes vazões (1 a  $8 \text{ L h}^{-1}$ ), sendo que a TDR foi capaz de manter o balanço de massa acima de 90% do volume de água aplicado. Estes resultados corroboram com outros trabalhos em que a TDR obteve sucesso na determinação do perfil de água no solo na irrigação por gotejamento (PELLETIER; TAN, 1993; BARROS et al., 2009).

Nas Figuras 6, 7 e 8 é possível visualizar a formação do bulbo molhado em areia para diferentes tempos de aplicação de água. Neste material, o movimento da água teve predominância no sentido vertical, formando um bulbo molhado mais profundo e com diâmetro reduzido. Para a vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , a profundidade do bulbo molhado chegou a 50 cm para uma largura de 20 cm no tempo de 160 min de aplicação de água. Na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  o tempo necessário para o bulbo molhado chegar as mesmas dimensões foi de 80 min, e na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  o tempo foi de 50 min

Estes resultados indicam que a vazão do emissor não afetou as dimensões do bulbo molhado, mas esta foi determinada pelo volume de água aplicado. Esta é uma característica dos materiais mais transmissíveis, como é o caso da areia em que a principal força atuante é a gravitacional em comparação com as forças de retenção. El-Hafedh, Dagharu e Maalej (2001) avaliaram as vazões de 2, 4 e  $8 \text{ L h}^{-1}$  e relataram que as dimensões do bulbo molhado não dependem diretamente da vazão do emissor, mas sim do volume de água aplicado, assim como indicado por Bresler (1977) e Ghali e Svehlik (1988).

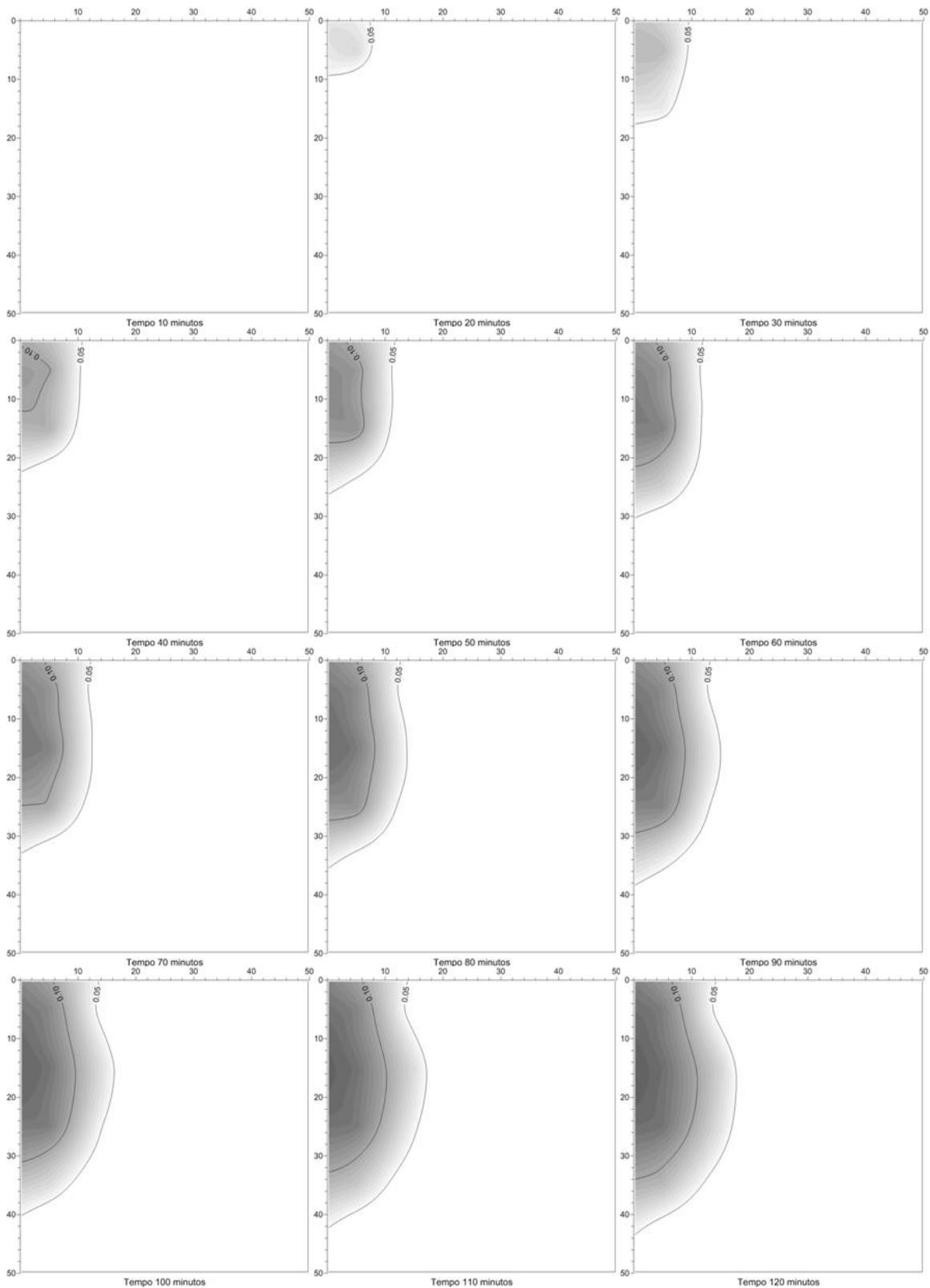


Figura 6 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

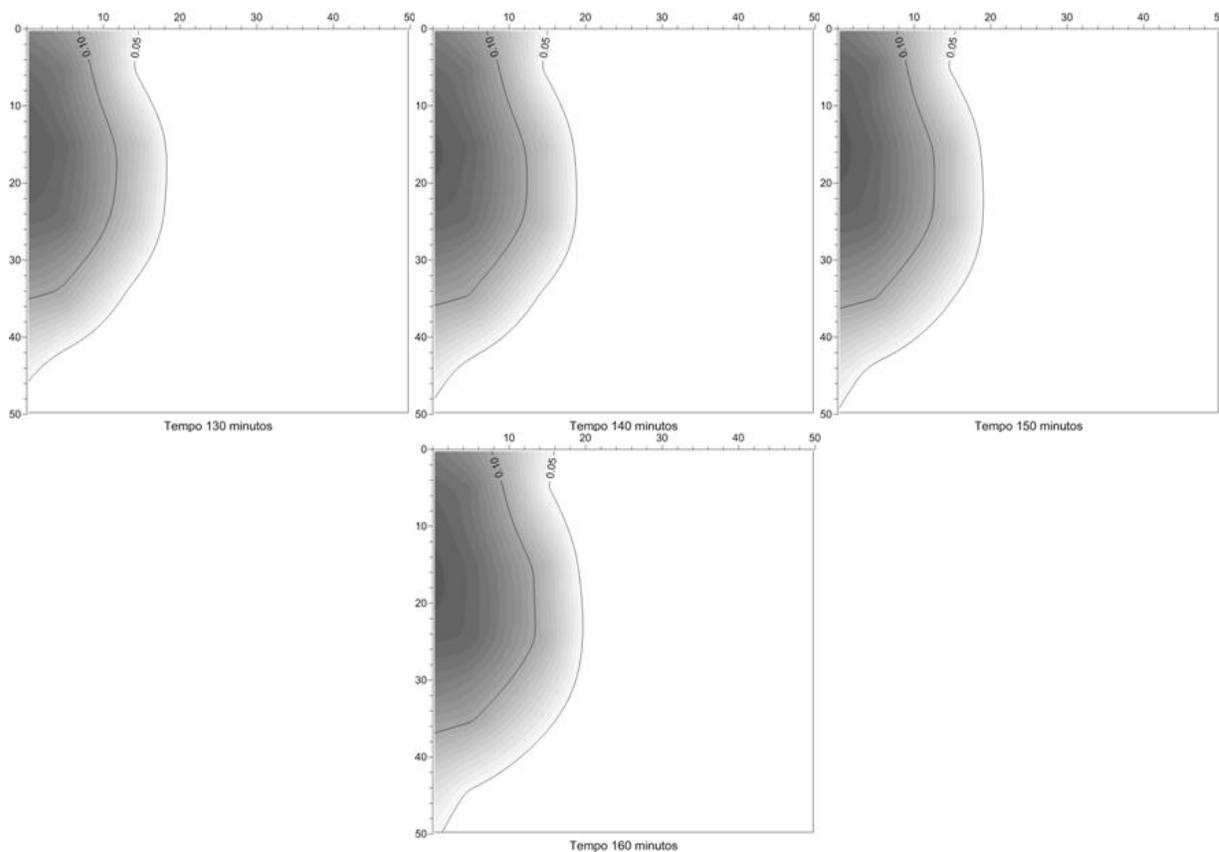


Figura 6 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

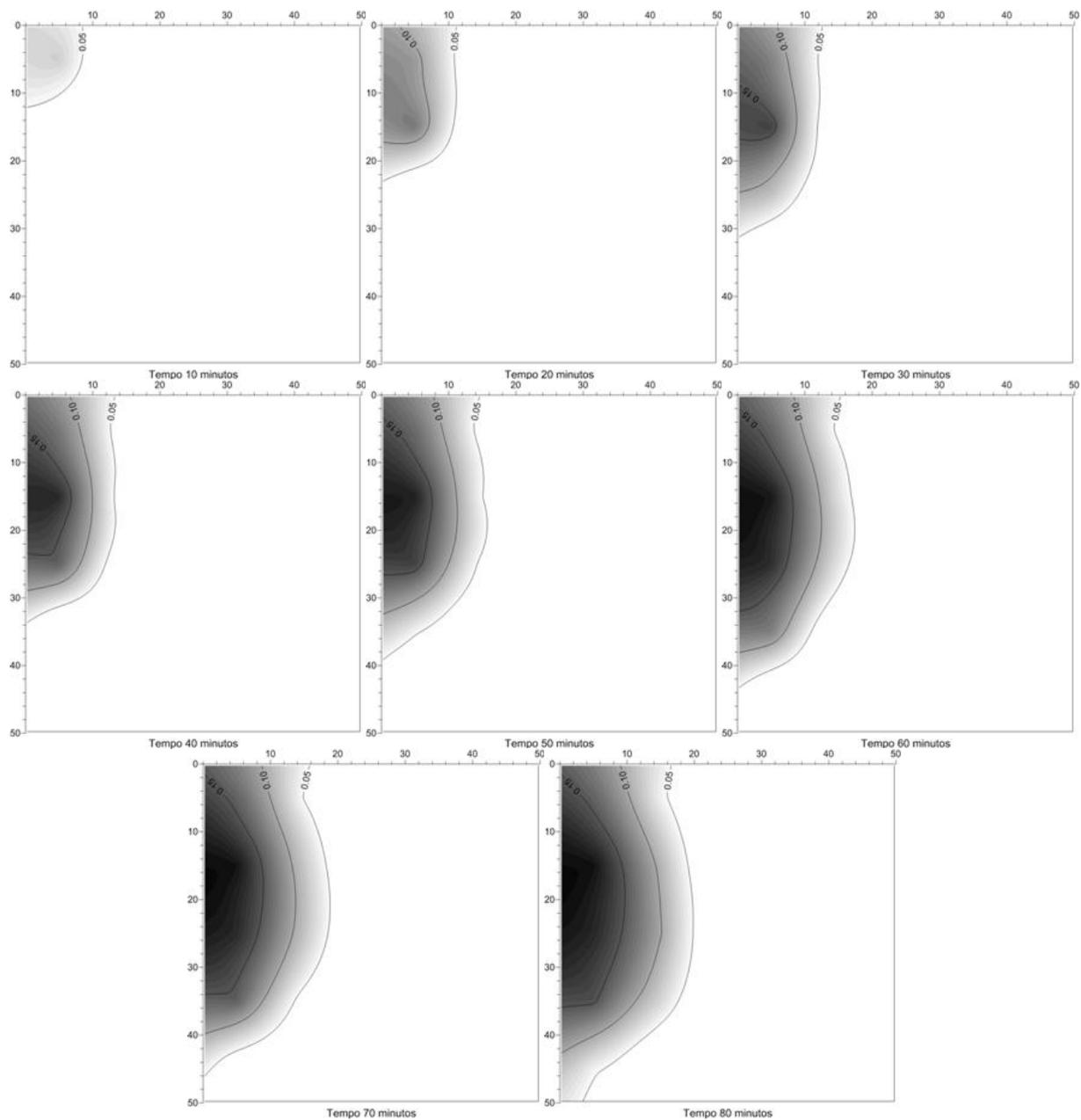


Figura 7 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

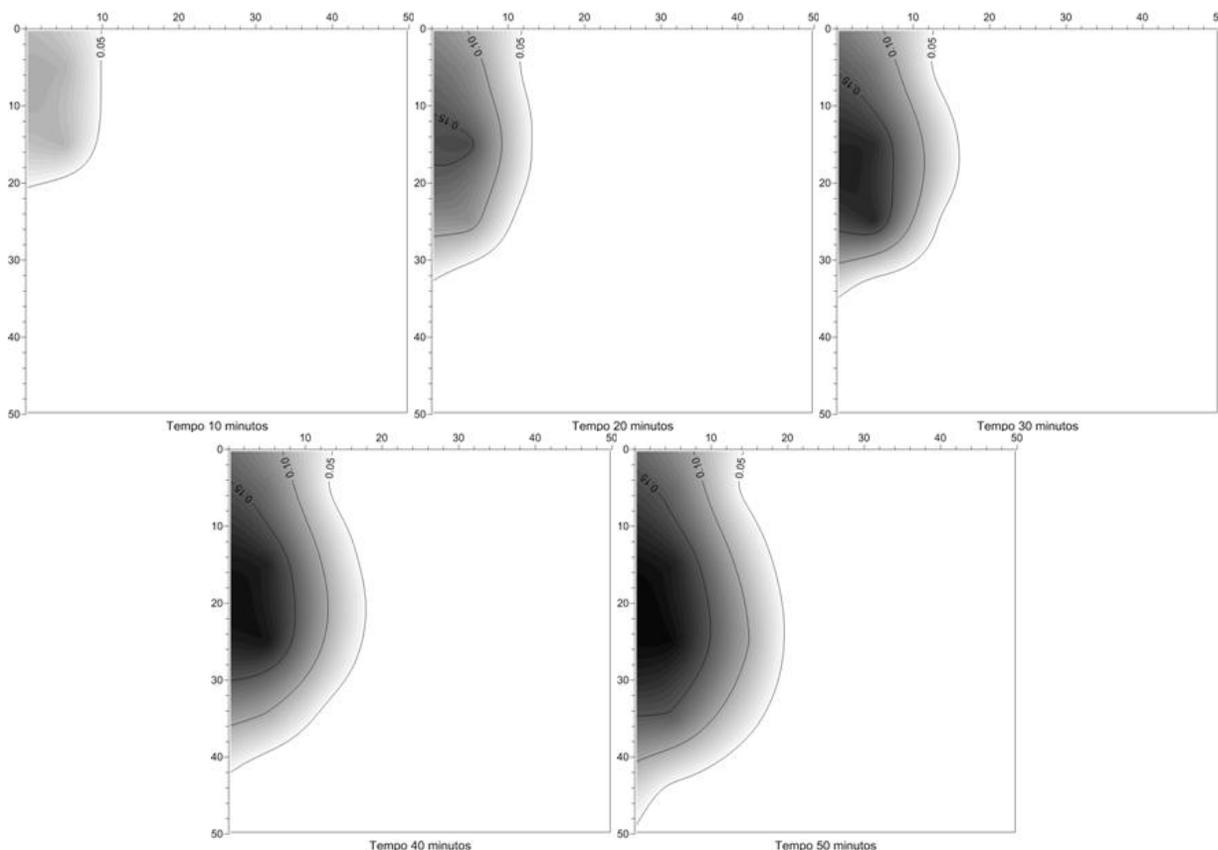


Figura 8 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

As figuras 9, 10 e 11 mostram o bulbo molhado formado para o solo arenoso. Para este material, na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a largura do bulbo molhado ficou em 20 cm e a profundidade foi de 38 cm no tempo de aplicação de 160 min. Na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  as mesmas dimensões foram alcançadas no tempo de 80 min. Já na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  o bulbo molhado foi ligeiramente menos profundo (34 cm) e mais largo (22 cm). Siyal e Skaggs (2009) estudando a infiltração de água através de tubos porosos enterrados em solos de 4 texturas diferentes observaram que a água penetrou mais profundamente em solos de textura mais arenosa em comparação com solos de textura mais fina. Os autores atribuíram este comportamento à maior condutividade hidráulica dos solos arenosos. Angelakis et al. (1993) também relataram que para um solo arenoso a profundidade do bulbo molhado excede o seu diâmetro.

Para este solo já é perceptível a influência da vazão do emissor na formação do bulbo molhado. Um aumento na vazão do emissor resulta em acréscimo no movimento horizontal em

detrimento do movimento vertical para um mesmo tipo de solo e um mesmo volume de água aplicado. Amir e Dag (1993) estudaram a aplicação de água por gotejadores em 9 diferentes vazões e relatam que o aumento da vazão proporcionou a formação de um bulbo molhado mais largo e menos profundo, inclusive com a formação de uma poça saturada na superfície do solo que poderia causar escoamento superficial. Tabhet e Zayani (2008) utilizaram as vazões de 1,5 e 4 L h<sup>-1</sup> e concluíram que a menor vazão permitiu a formação de um bulbo molhado mais profundo e menos largo para os tempos iniciais da aplicação de água. Kahn et al. (1996) avaliaram a aplicação dos volumes de 15, 20 e 25 L nas vazões de 1,5; 2,0 e 2,5 L h<sup>-1</sup>. Segundo os autores, houve uma relação significativa entre a vazão de aplicação e a forma do bulbo molhado, mas somente até a profundidade de 25 cm e raio de 30 cm, a partir dos quais a diferença não foi significativa. Resultados semelhantes também podem ser encontrados em Schwartzman e Zur (1986), Ah Koon, Gregory e Bell (1990), Keller e Bliesner (1990), Zur (1996) e Assouline (2002).

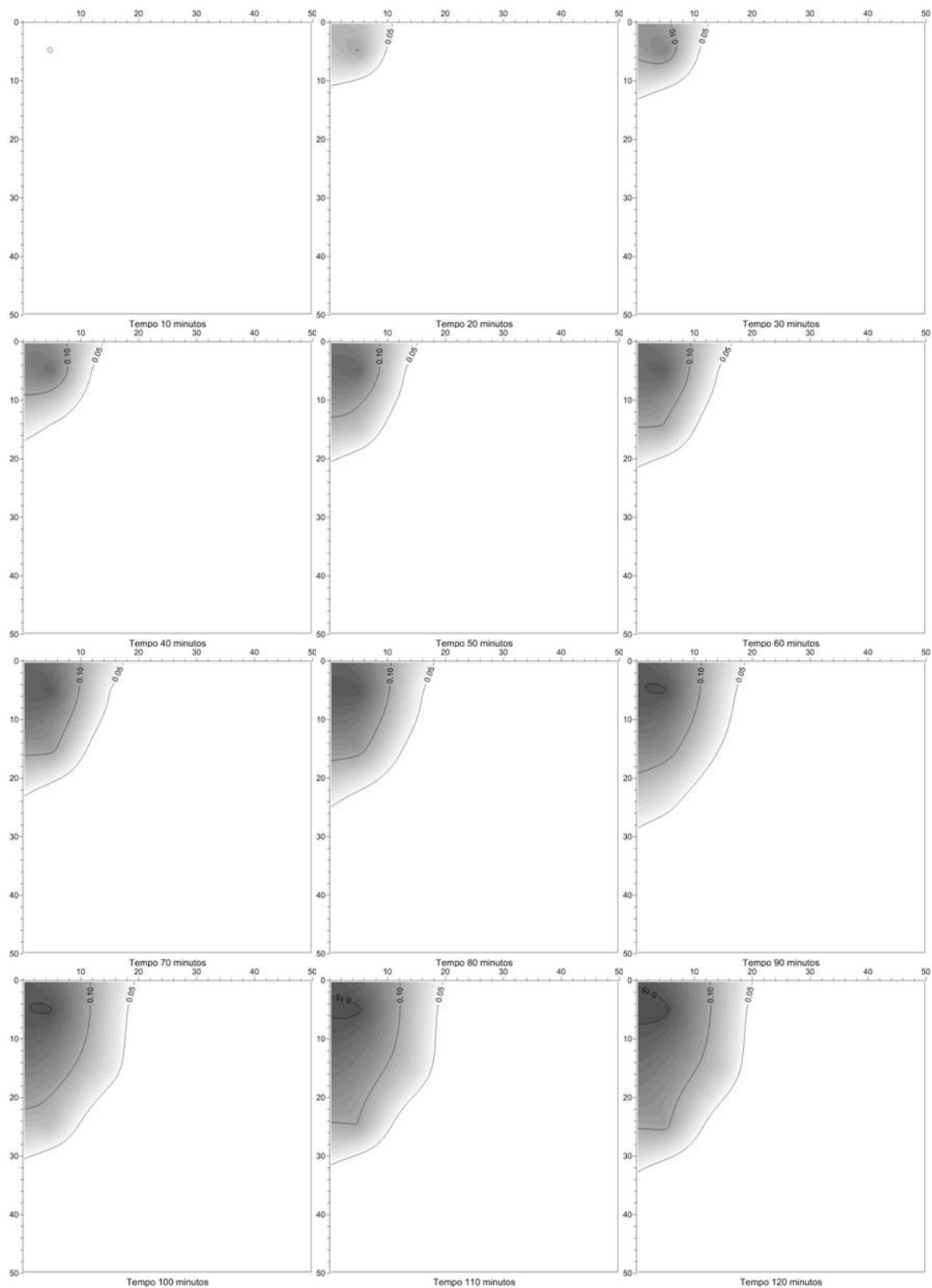


Figura 9 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrica indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

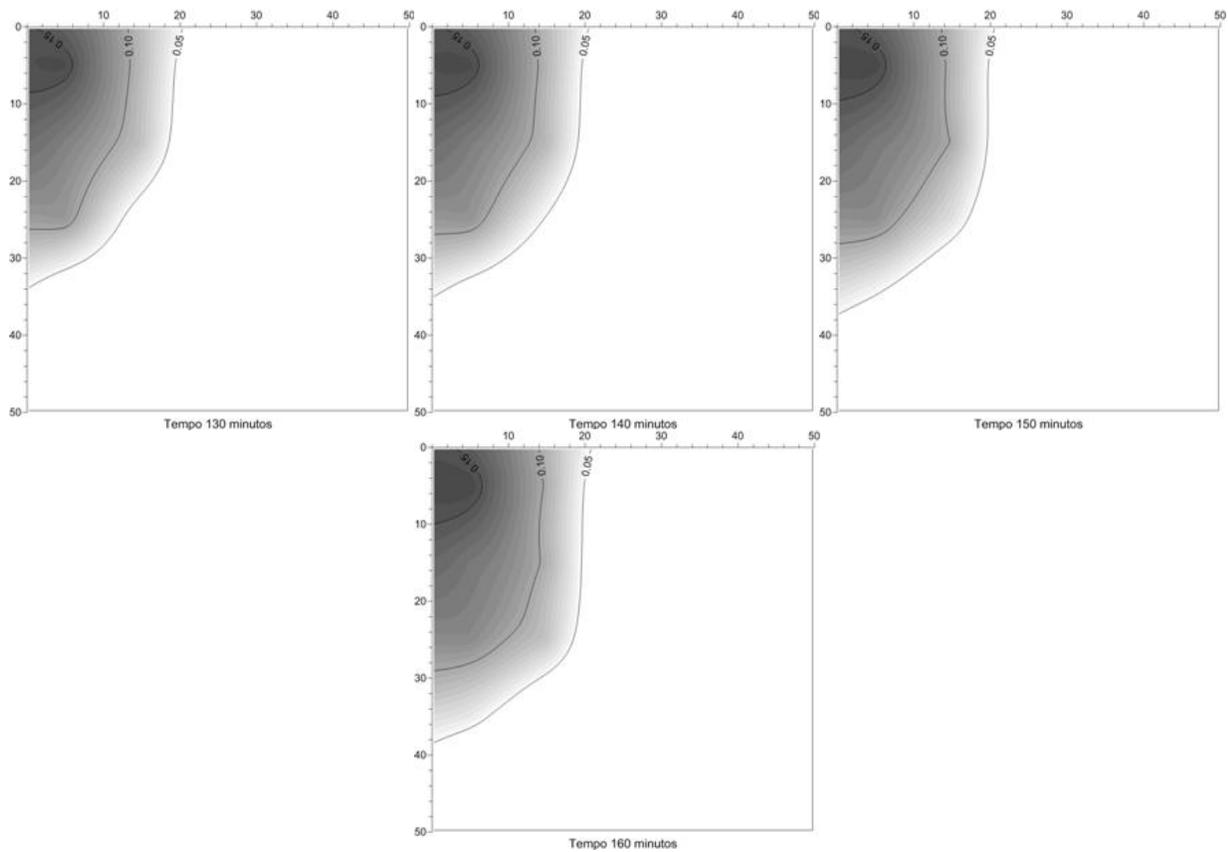


Figura 9 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

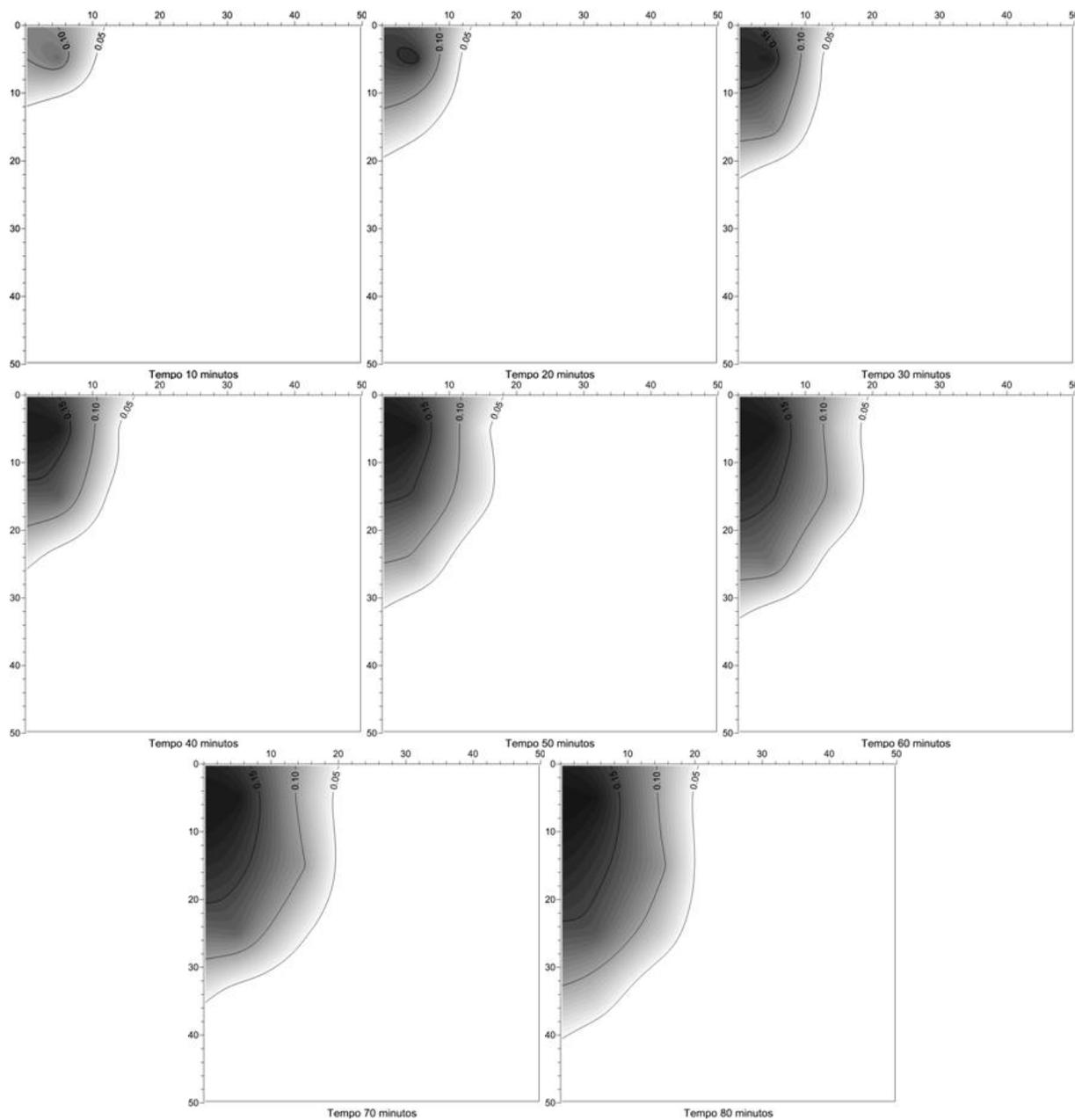


Figura 10 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

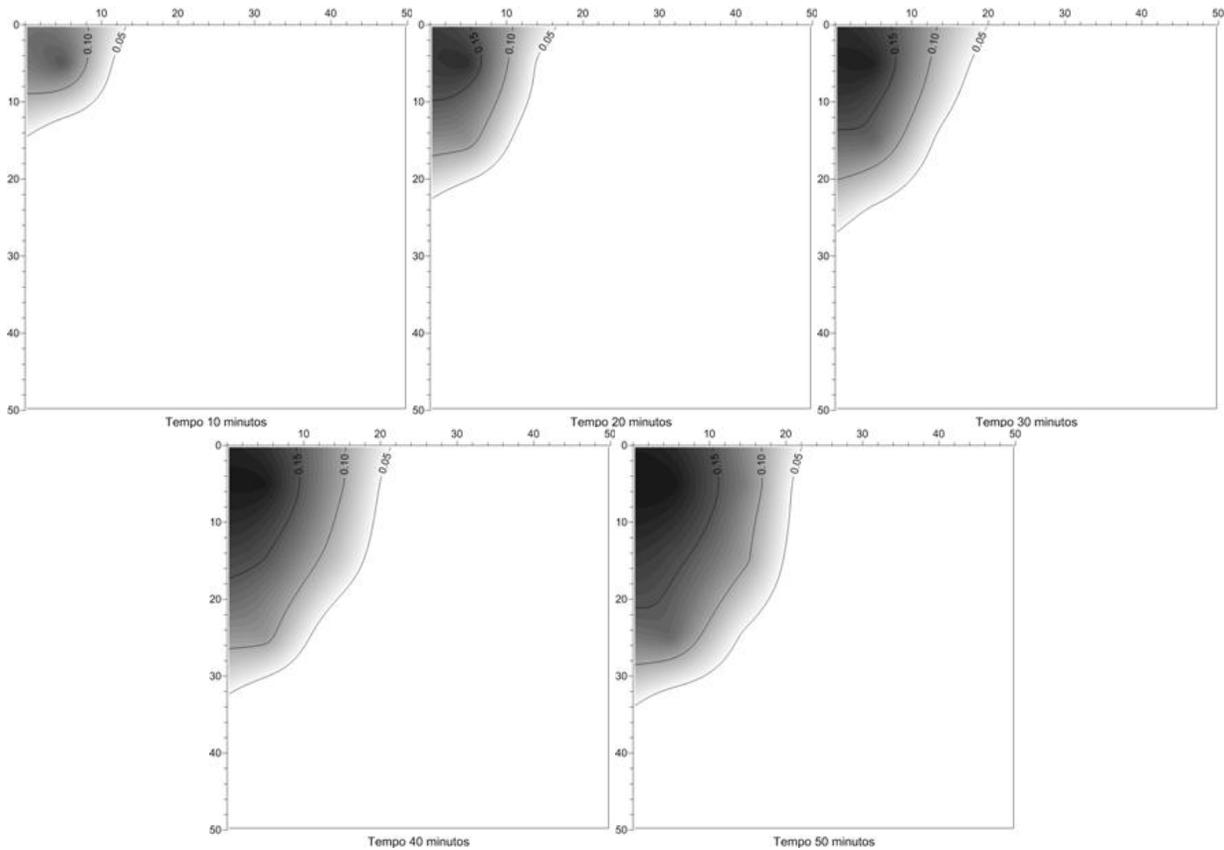


Figura 11 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

As figuras 12, 13 e 14 mostram o bulbo molhado formado para o solo argiloso. Para este material, na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , a profundidade do bulbo molhado no tempo de aplicação igual a 160 min foi de 50 cm e a largura nesse mesmo tempo foi de 22 cm. Na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  a maior profundidade foi de 40 cm e a maior largura de 20 cm no tempo de 80 min. Para a vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  estas mesmas dimensões foram obtidas no tempo de 50 min.

Cote et al. (2003) observaram que a forma do bulbo molhado foi mais alongado em solos arenosos e com formato esférico em solos de textura fina. Nos solos argilosos, em razão da menor taxa de infiltração, verifica-se a formação de um bulbo molhado com maior dimensão horizontal devido a maior influência das forças de retenção sobre a força da gravidade. (BRESLER, 1978). No entanto, também há uma grande influência da estrutura do solo na formação do bulbo molhado. Thorburn, Cook e Bristow (2003) verificaram que o bulbo molhado

formado em 5 solos de textura semelhante teve grande variação, explicada pela diferença na estrutura destes solos.

Neste trabalho, o bulbo molhado no solo argiloso teve maior comprimento vertical do que o esperado. A causa mais provável para este comportamento diferente obtido no presente trabalho é a influência do conteúdo inicial de água no solo. Para este tipo de solo, o perfil não estava homogêneo no início da aplicação de água, sendo mais úmido na parte inferior, o que levou a formação de um bulbo mais alongado verticalmente quando era esperado um bulbo molhado mais largo. Também se pode atribuir este comportamento à estrutura do solo, que foi peneirado, e por isso tinha uma densidade mais baixa que o solo natural.

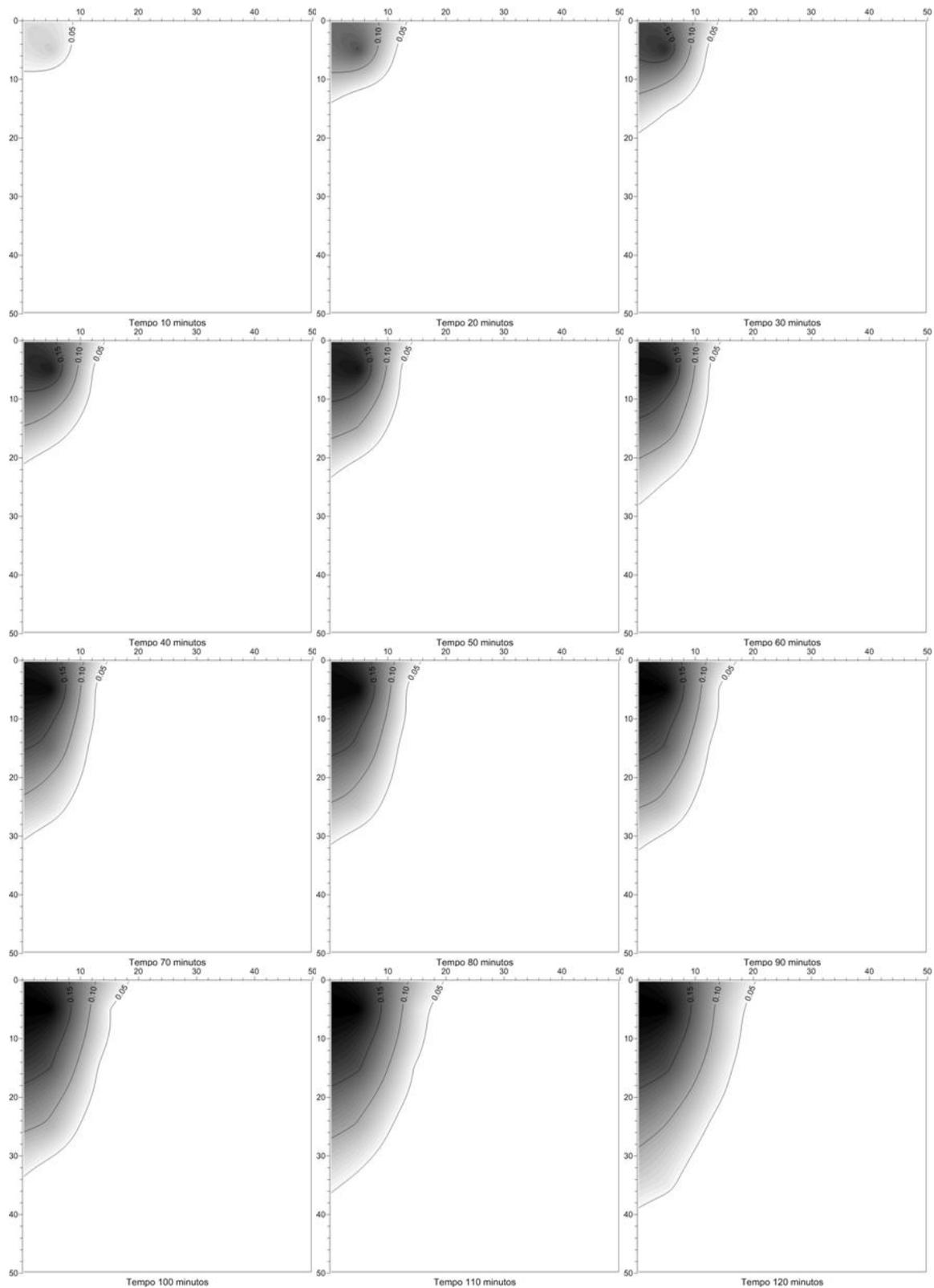


Figura 12 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

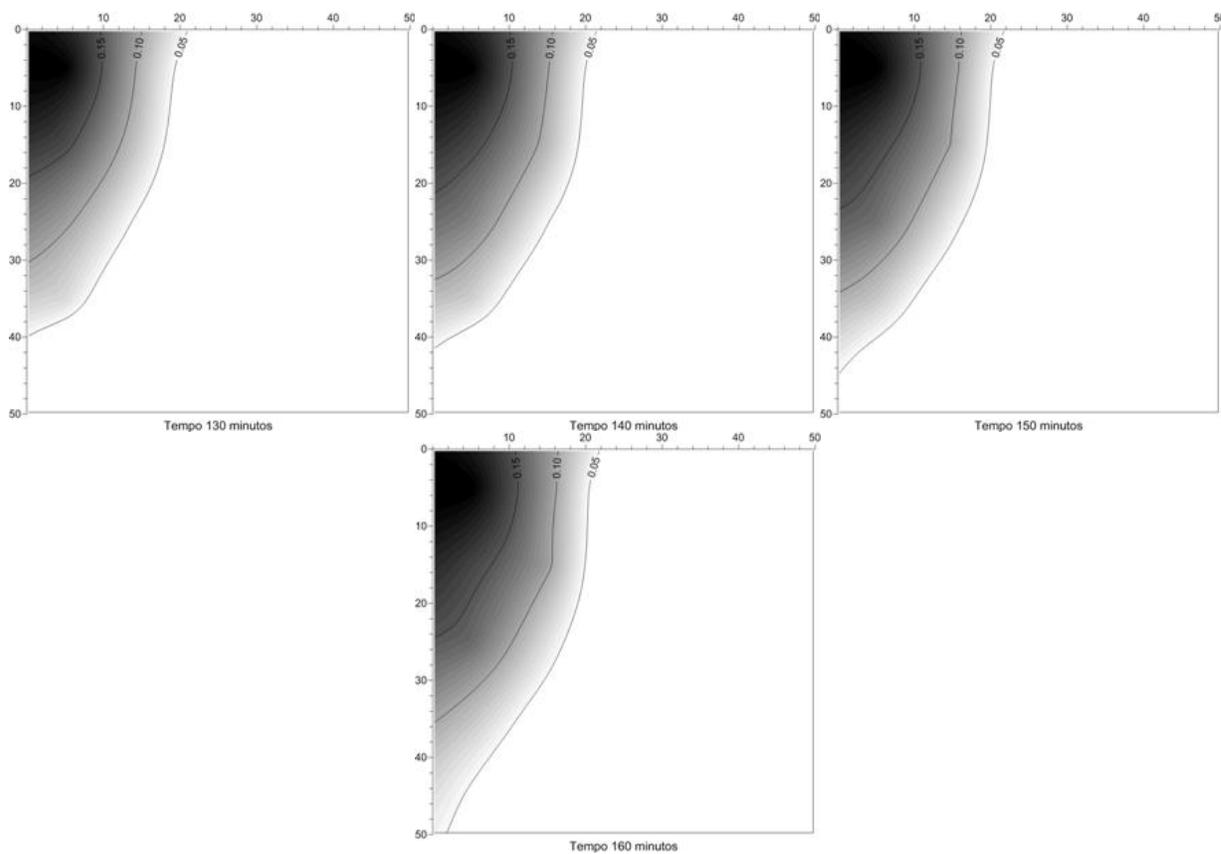


Figura 12 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrica indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

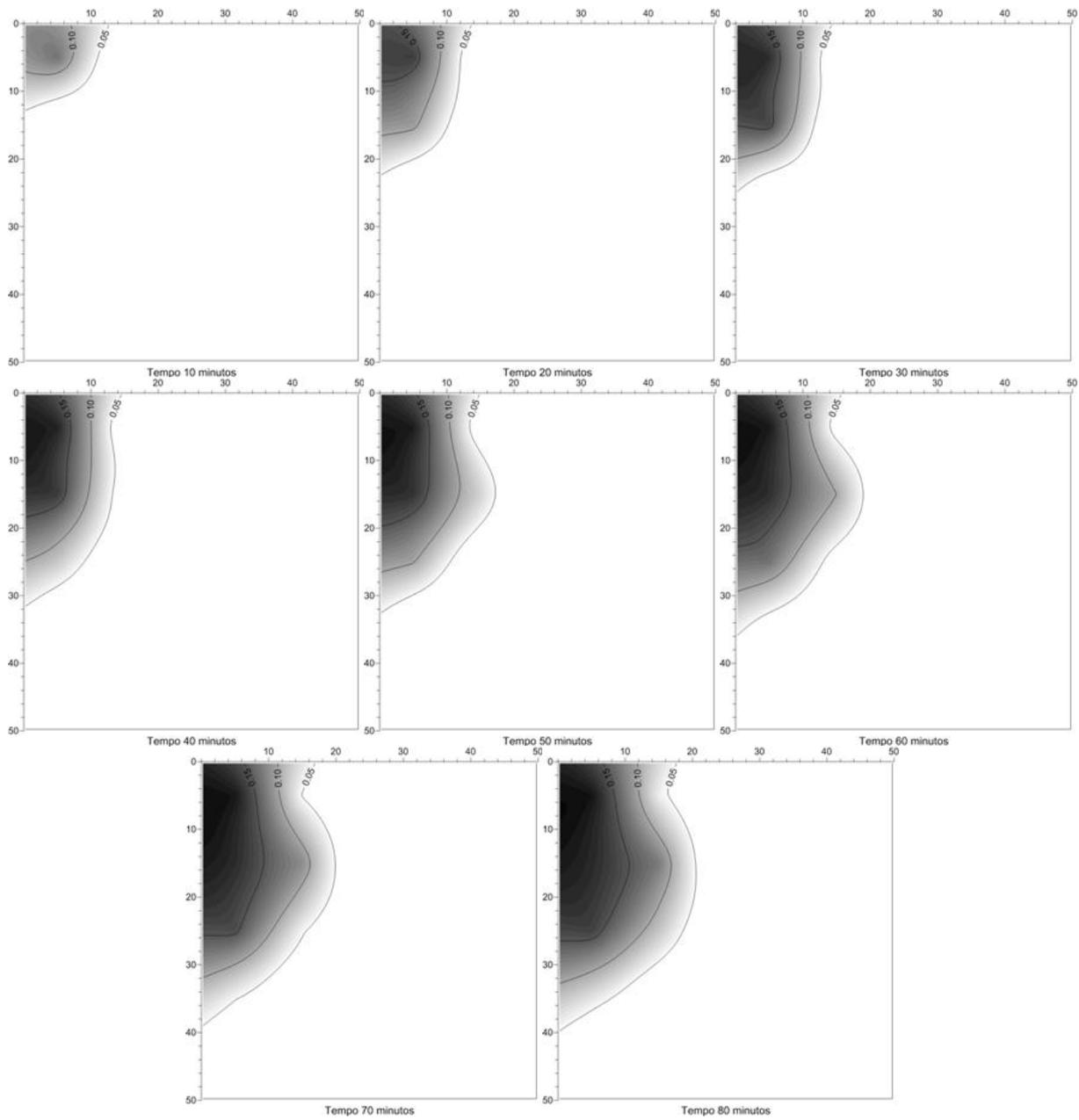


Figura 13 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrica indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

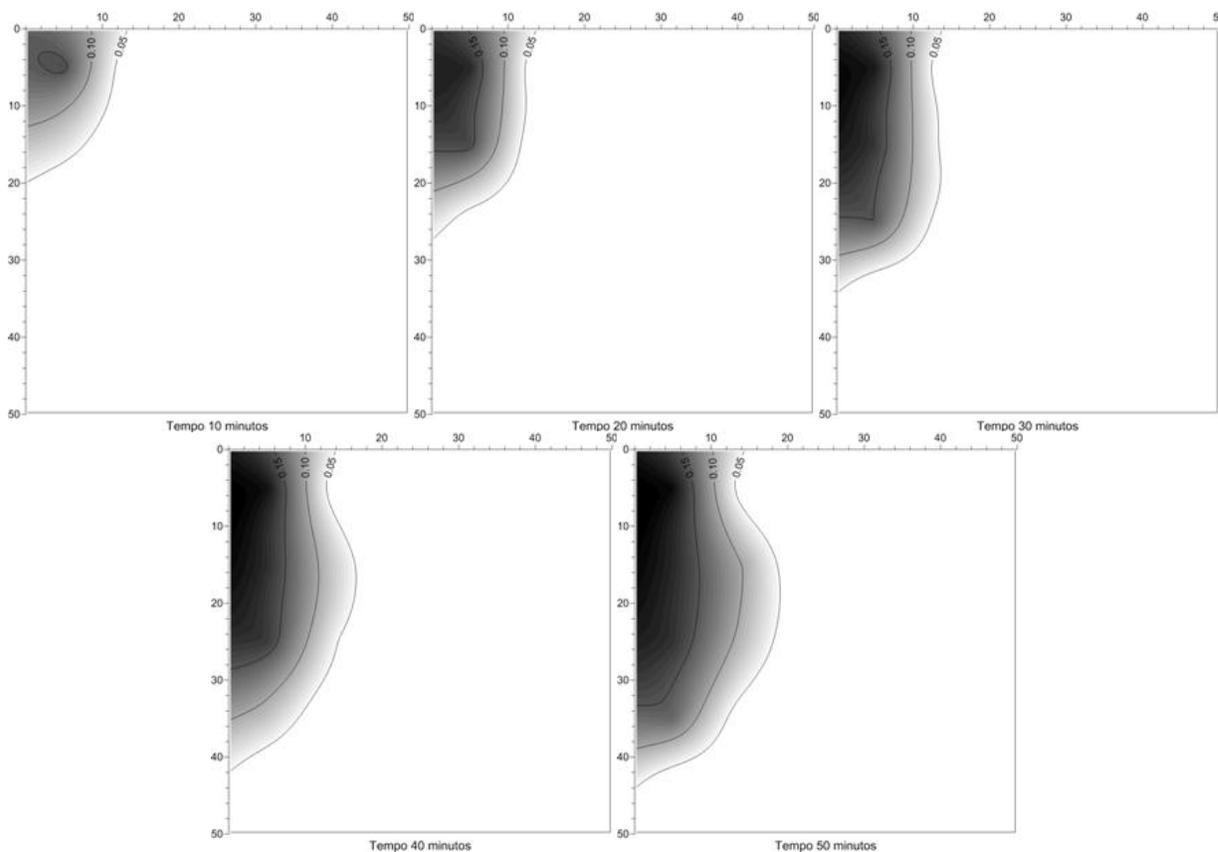


Figura 14 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  para os dados medidos com a TDR. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

## 4.2 Simulação do bulbo molhado

Em relação à simulação do bulbo molhado um modelo, um modelo numérico utilizando a técnica dos volumes finitos foi implementado em Visual Basic para simular a formação do bulbo molhado em irrigação por gotejamento (Anexo B e Figura 15). Os dados de entrada do modelo foram a curva de retenção, representada pelos parâmetros de ajuste  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ , a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), a vazão do emissor ( $q$ ) e o conteúdo de água inicial no perfil do solo ( $\theta_{ini}$ ). O conteúdo de água inicial pode ser uniforme ou variável, bastando para isso preencher a coluna correspondente a esse valor.

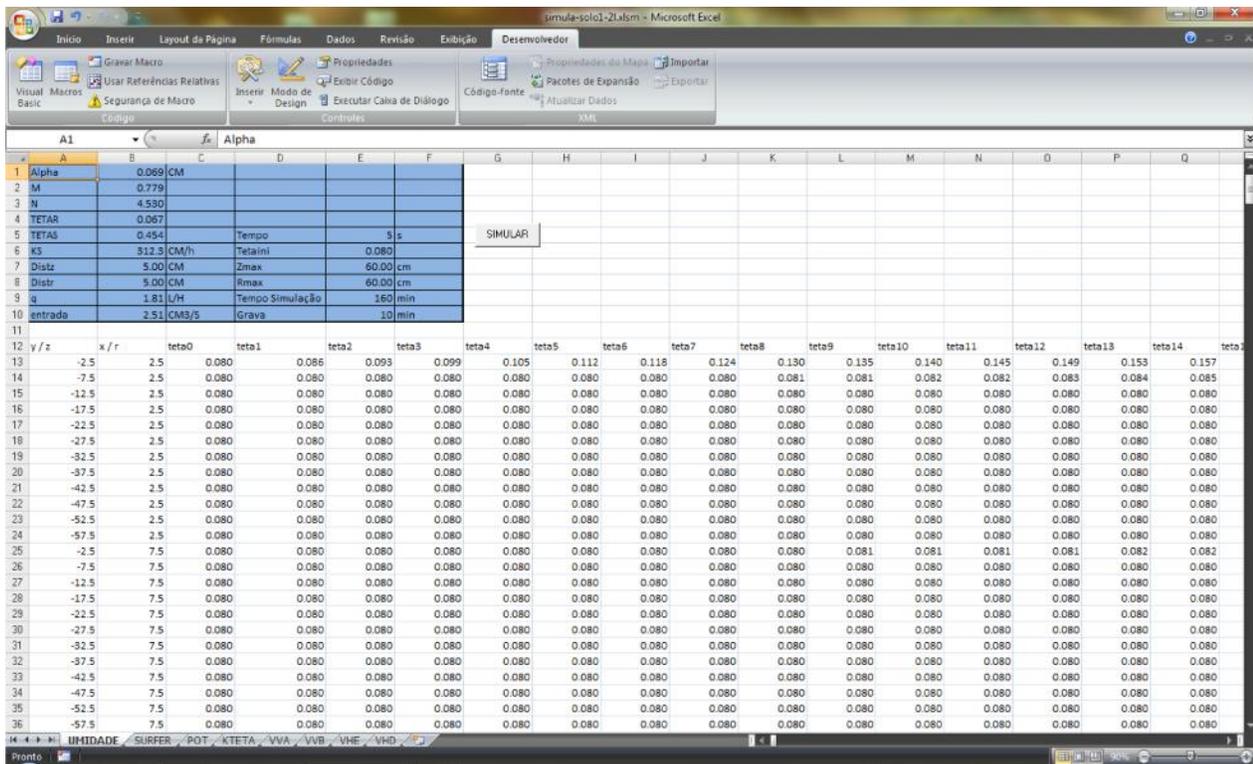


Figura 15 - Tela do programa para simular a formação do bulbo molhado em irrigação por gotejamento

Cada interação do modelo numérico foi realizada para um tempo de simulação de 5 segundos, e para uma distância entre os nós de 5 cm na vertical e 5 cm na horizontal. Quando o tempo de aplicação de água atingia 10 minutos, os valores de conteúdo de água eram salvos em outra planilha para depois serem processados no software Surfer.

As figuras 16 a 24 mostram a formação do bulbo molhado nos diferentes materiais (areia, solo arenoso e solo argiloso) nas vazões de 2, 4 e 6 L h<sup>-1</sup> obtidas a partir dos dados simulados. Estas figuras foram feitas da mesma forma e nas mesmas condições que aquelas com dados obtidos do experimento com a TDR. É interessante notar que tanto o formato como as dimensões do bulbo molhado têm boa concordância entre os dados medidos e os dados simulados. O modelo numérico proposto foi capaz de simular o bulbo molhado nas mais diferentes condições de textura e estrutura do solo e de conteúdo de água inicial.

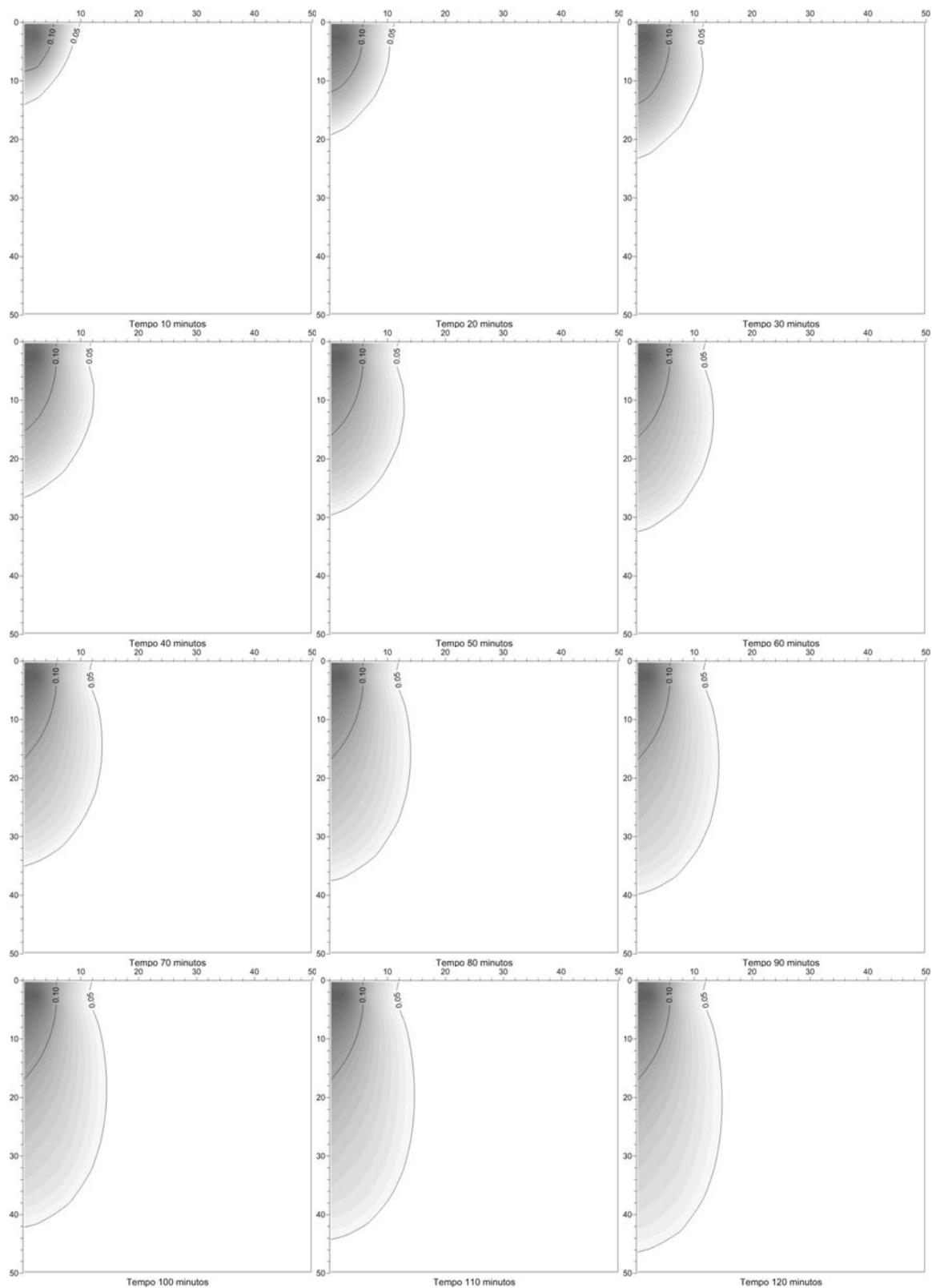


Figura 16 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

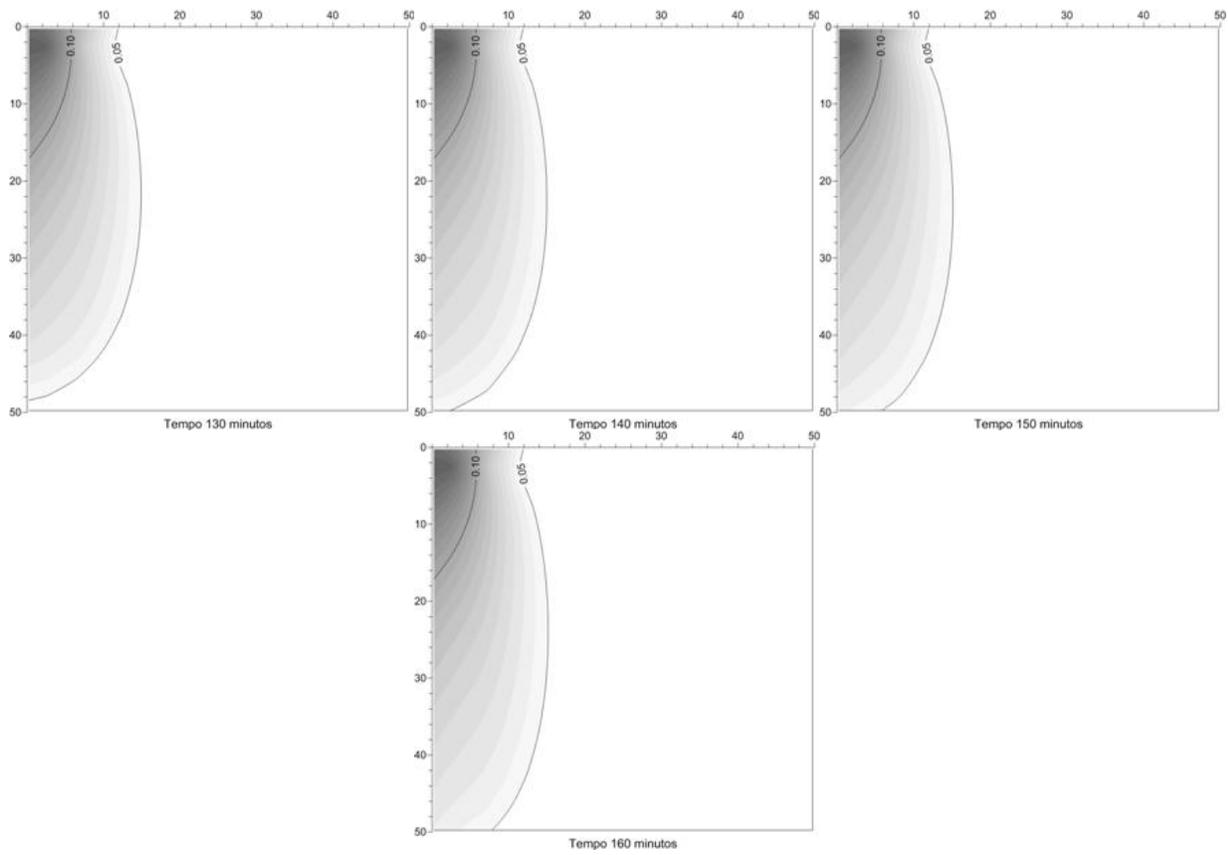


Figura 16 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

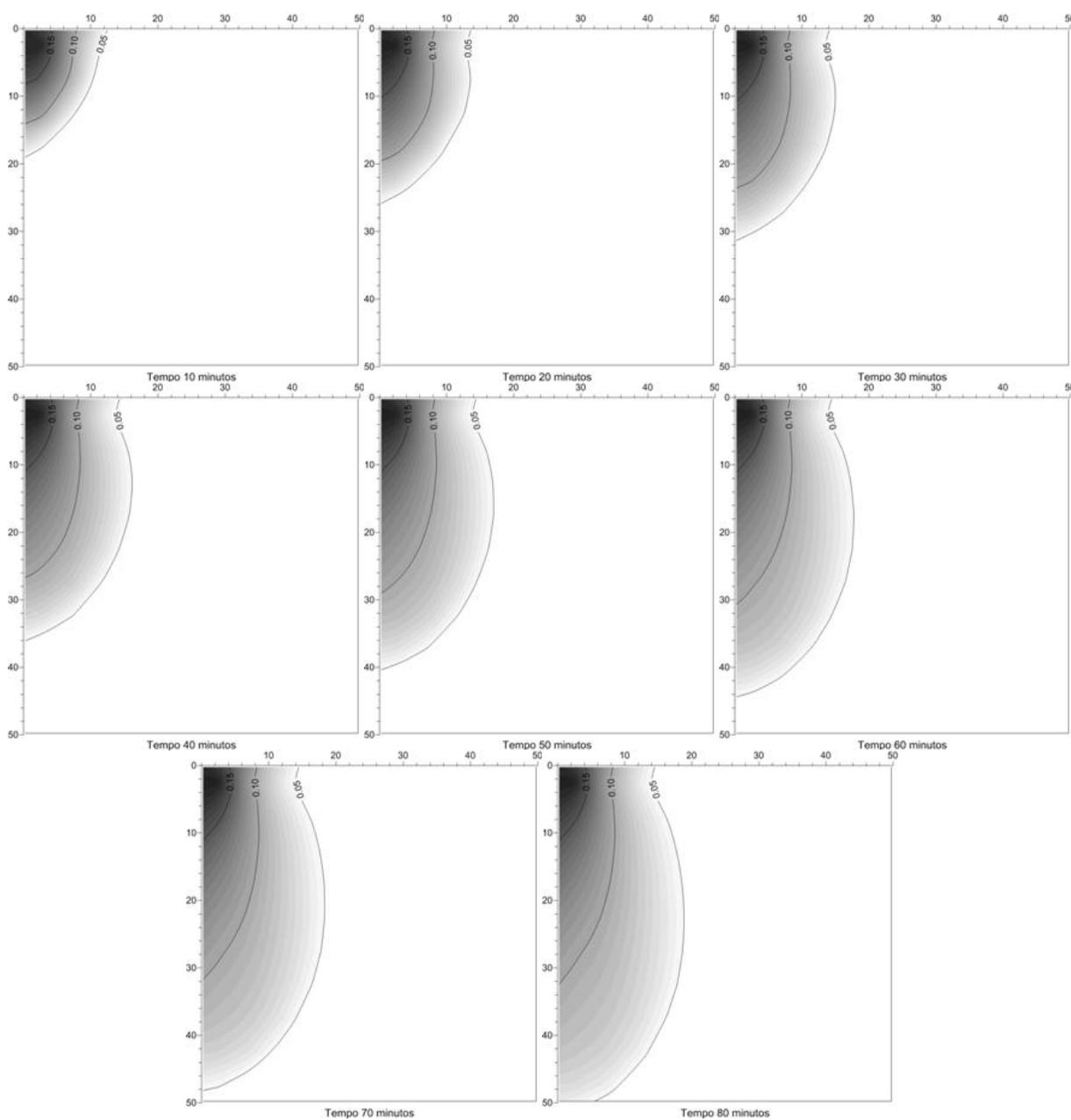


Figura 17 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

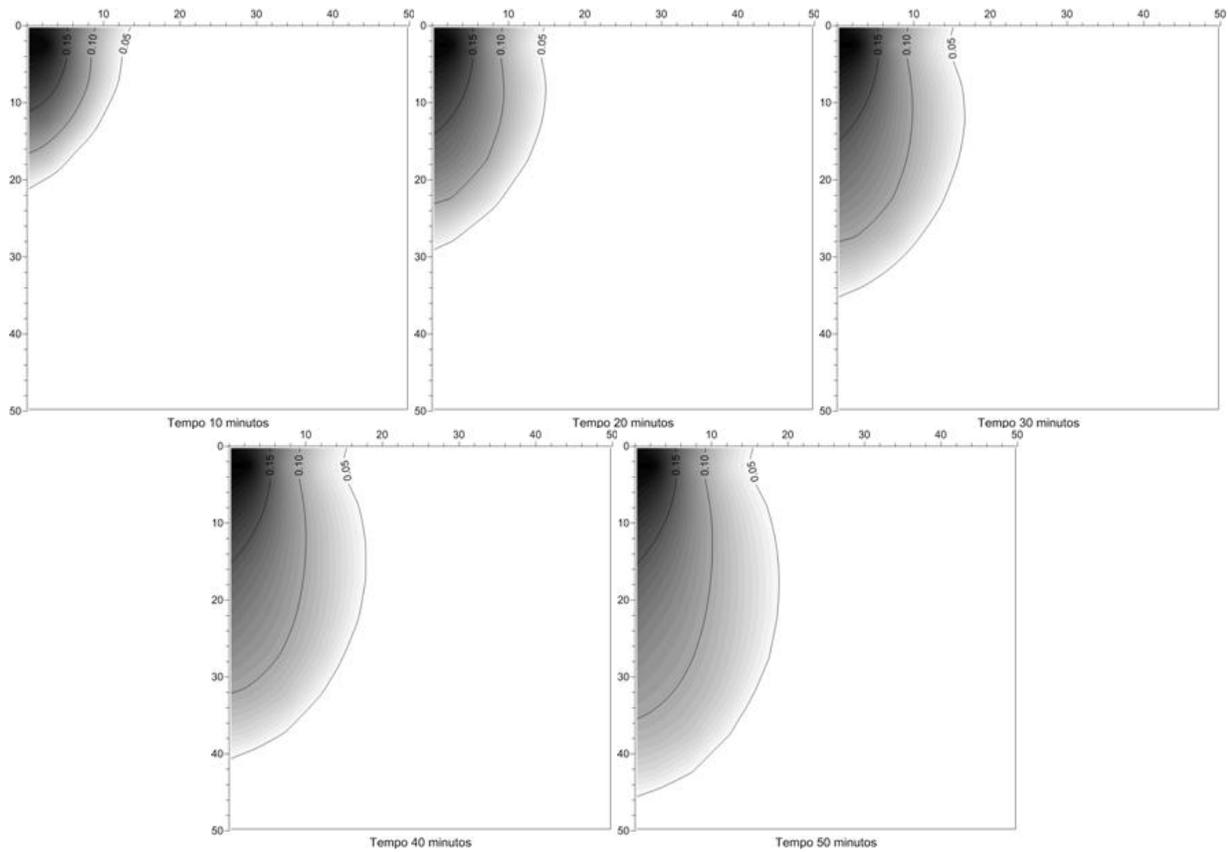


Figura 18 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

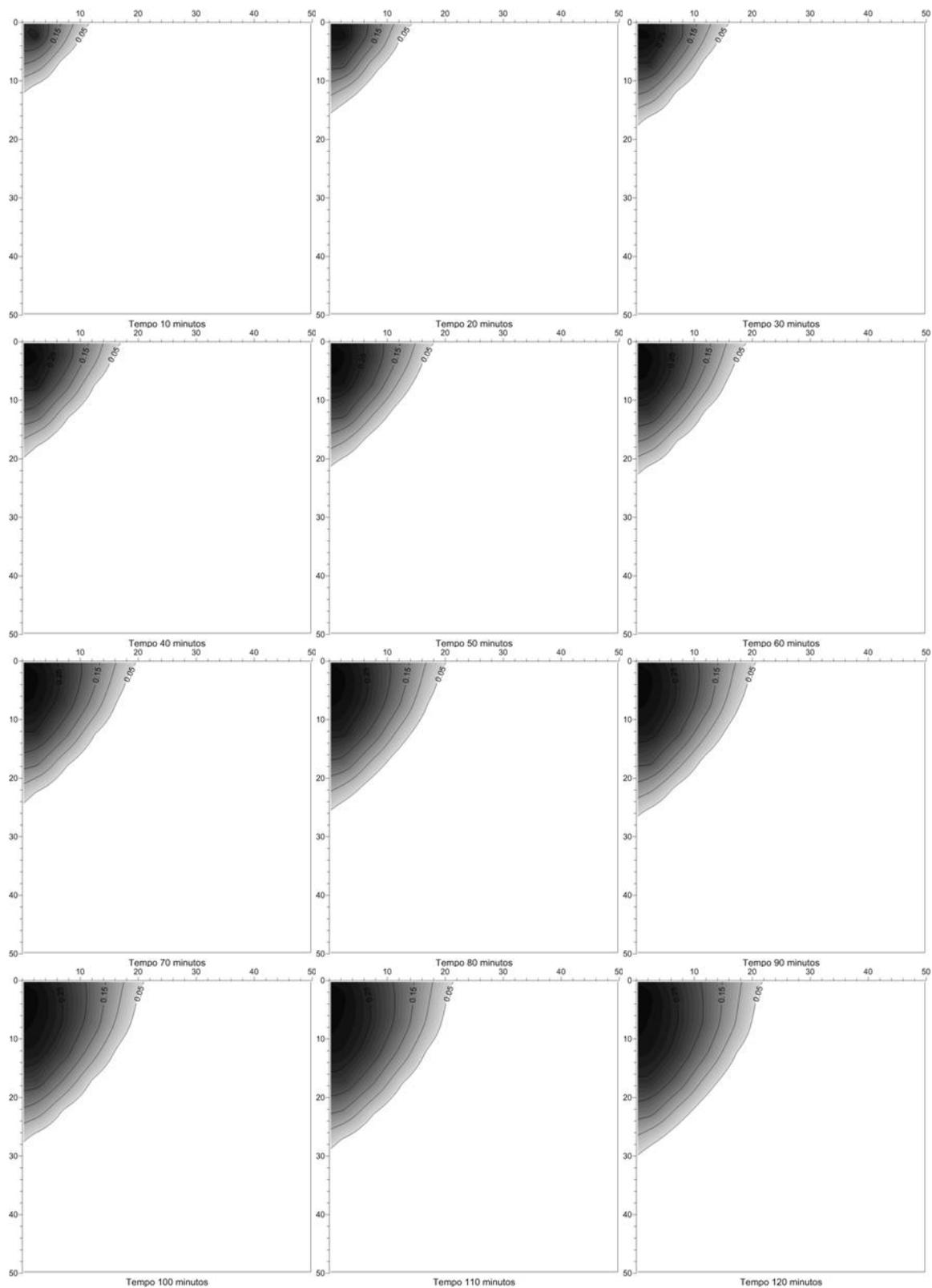


Figura 19 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

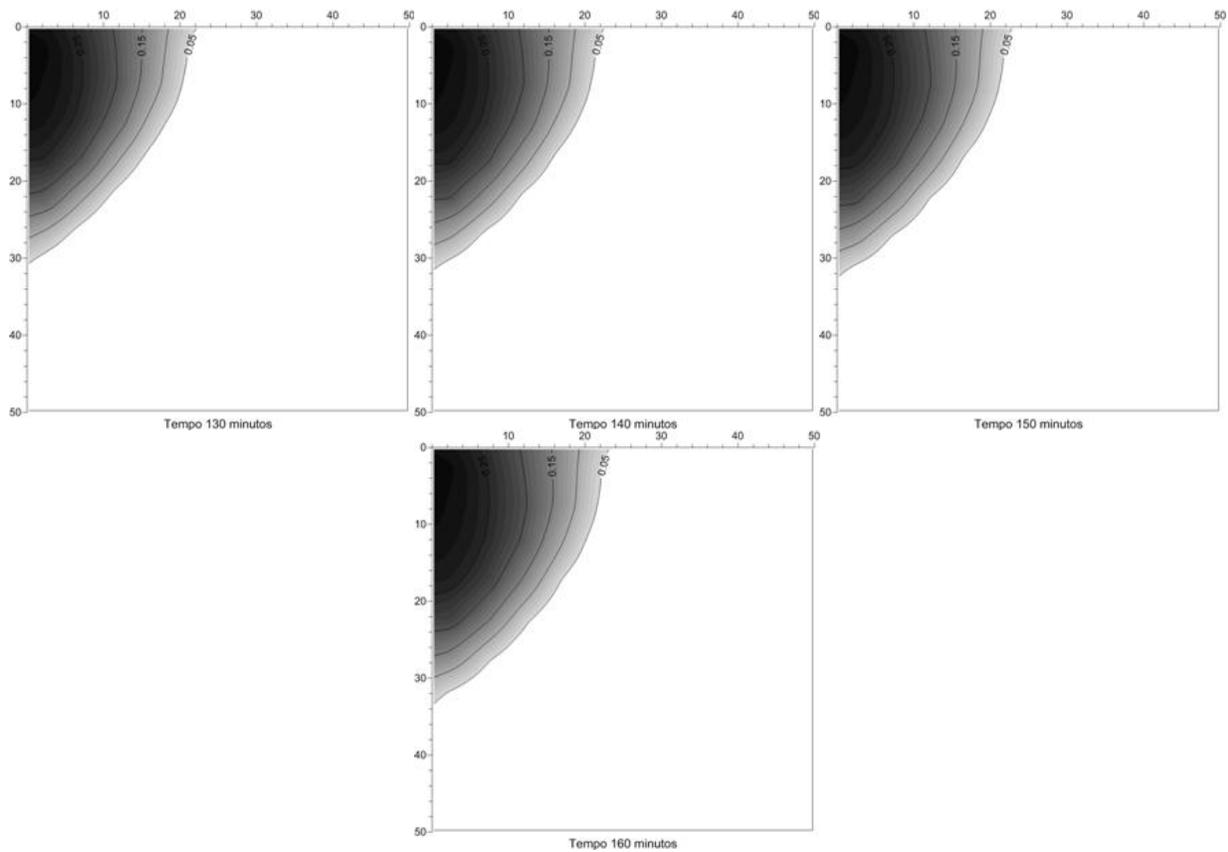


Figura 19 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

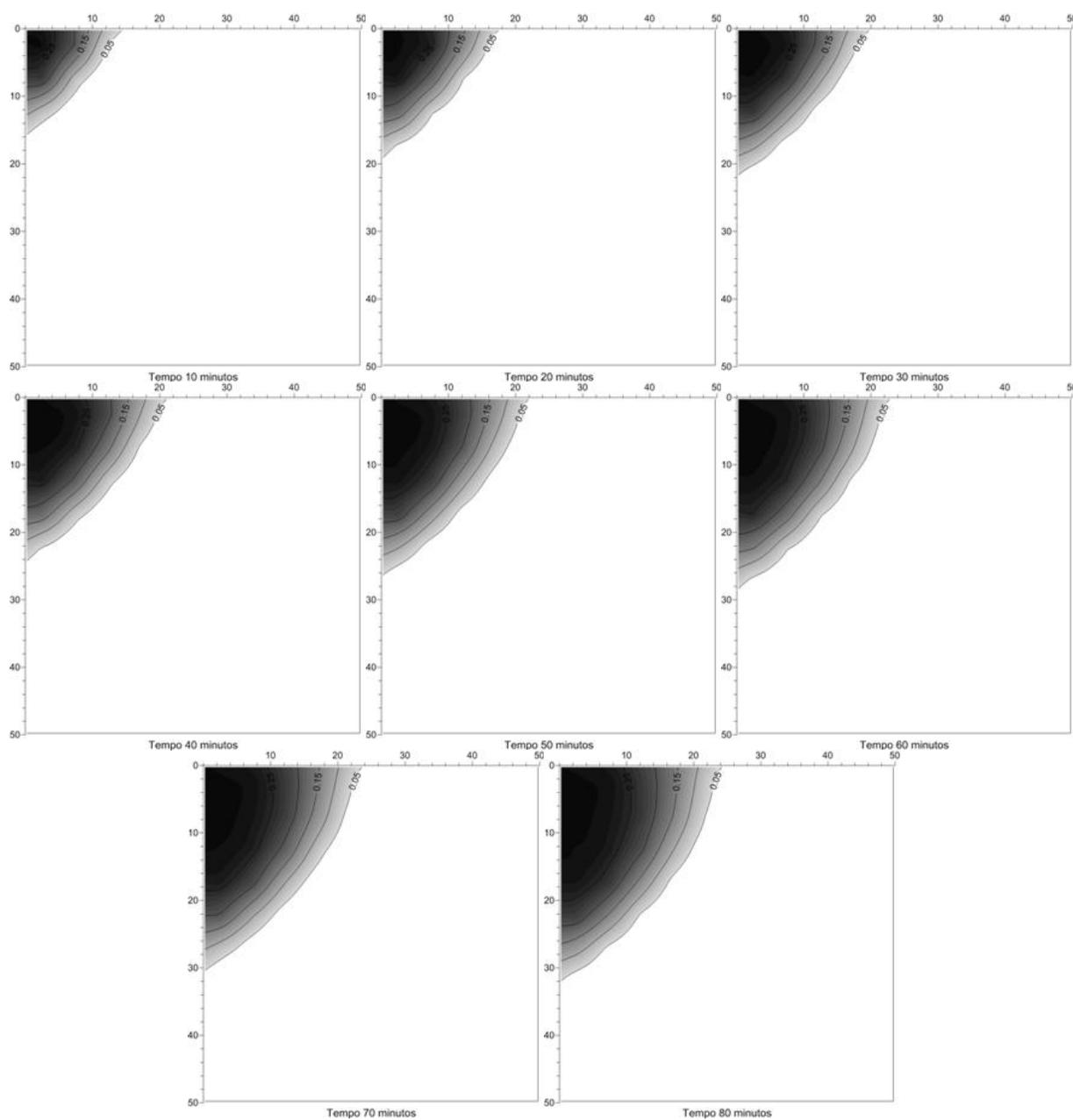


Figura 20 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

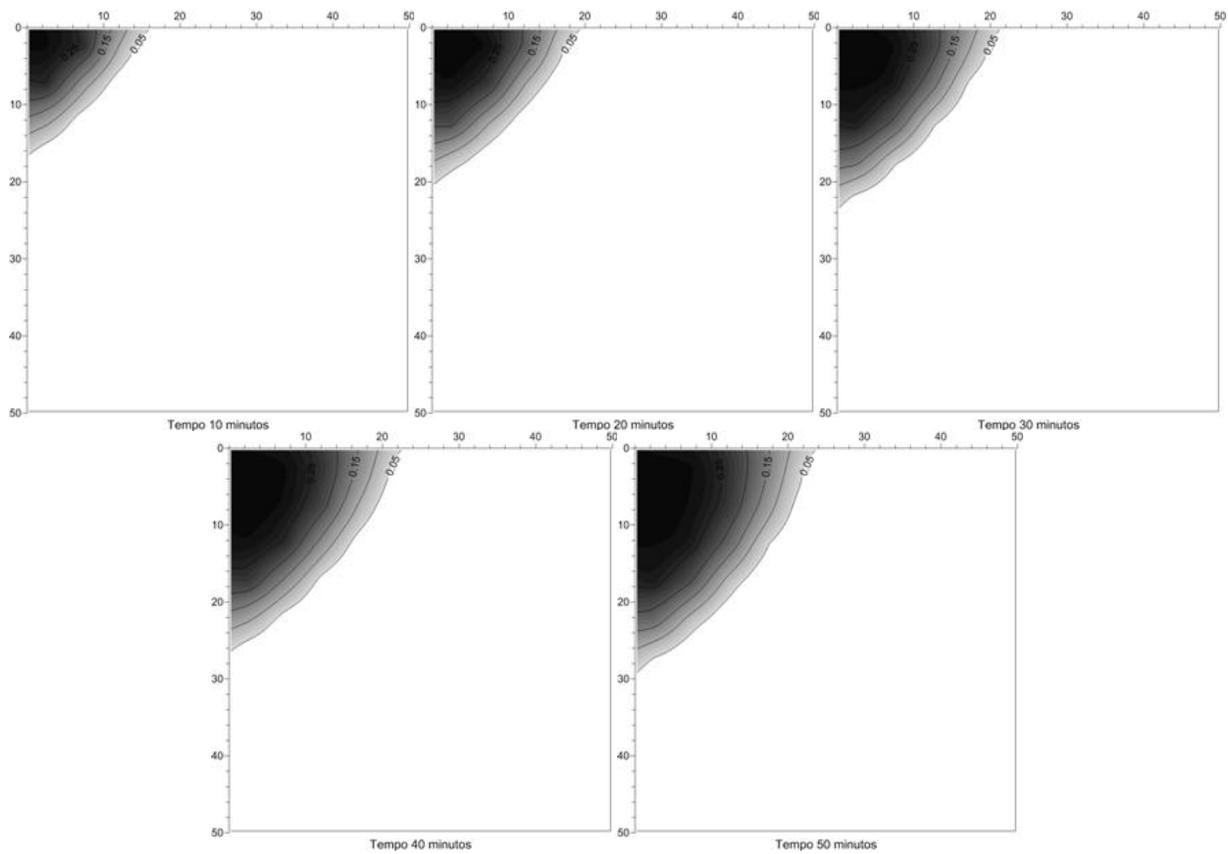


Figura 21 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

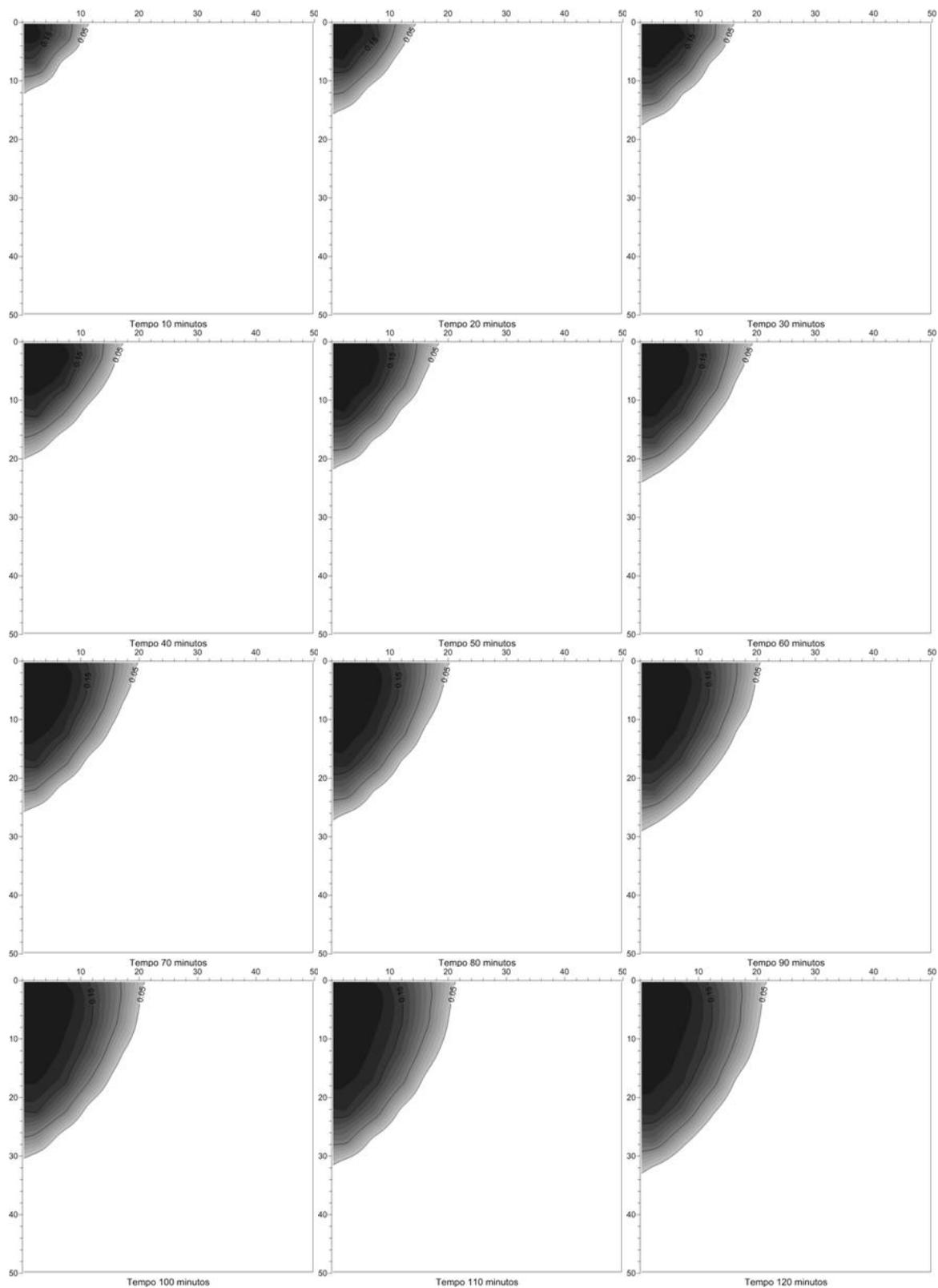


Figura 22 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

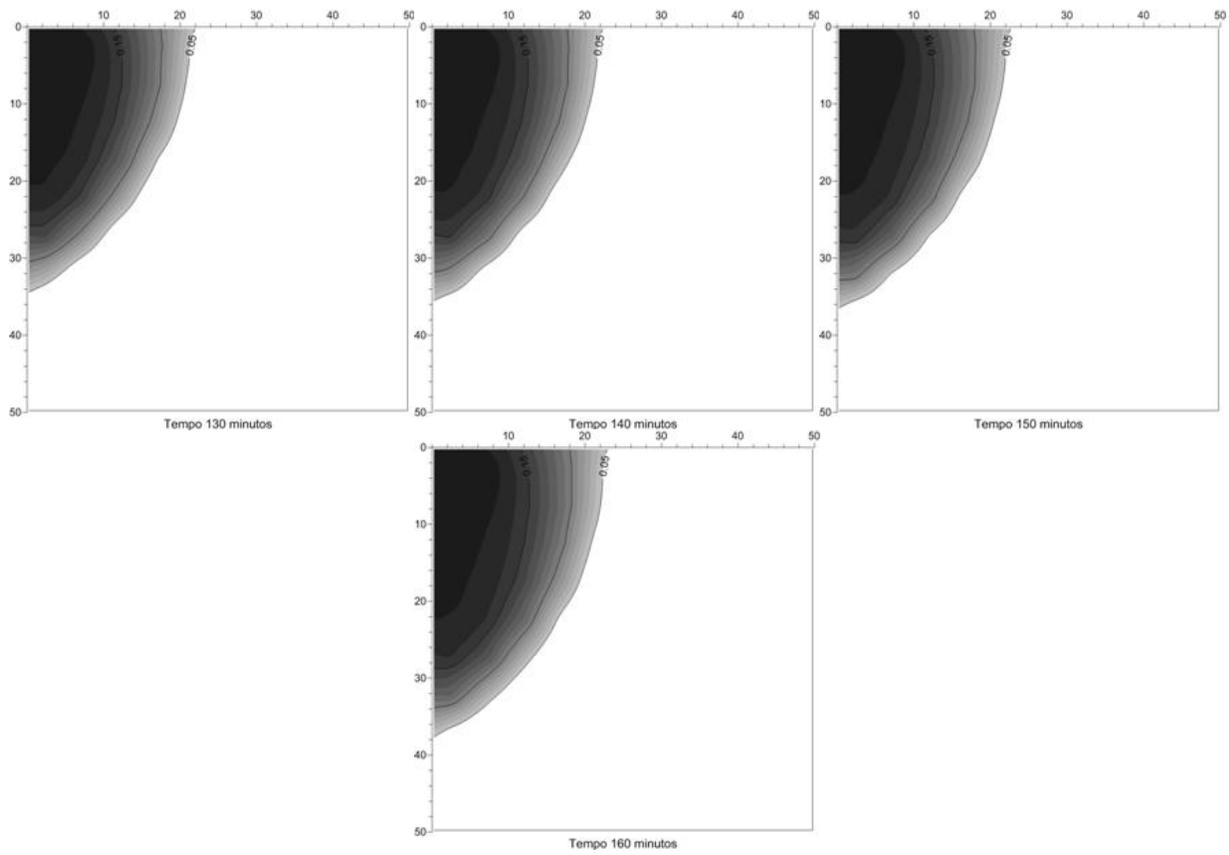


Figura 22 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

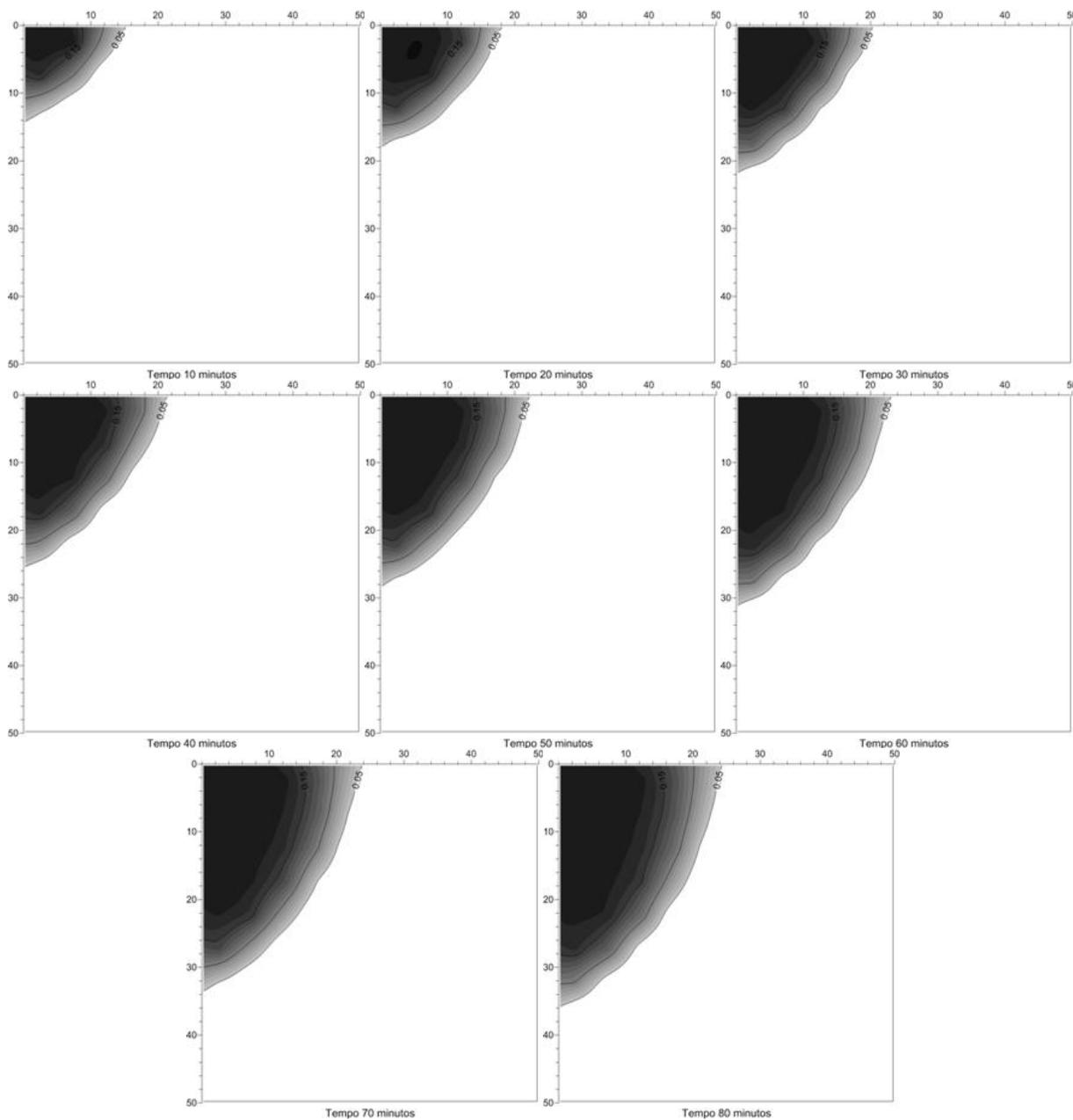


Figura 23 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

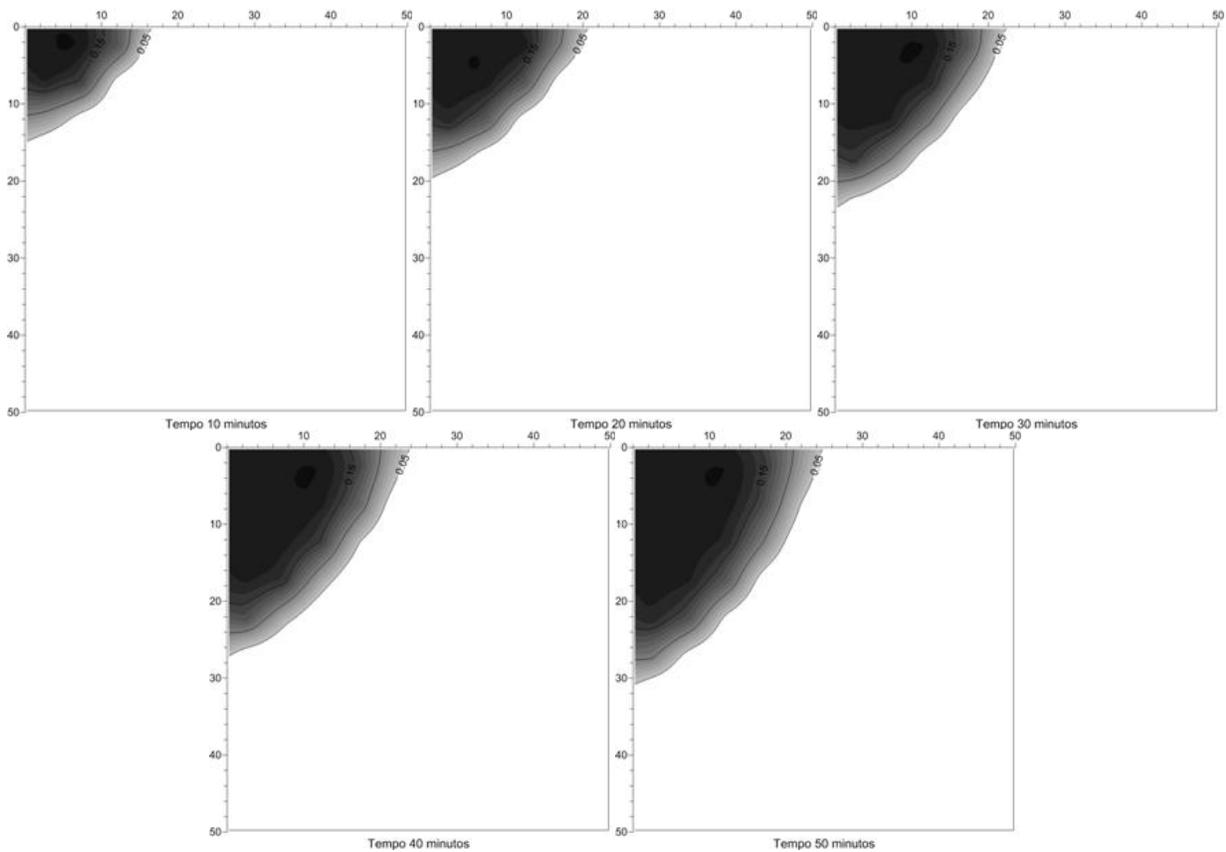


Figura 24 - Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrica indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. Cada figura representa um tempo de aplicação de água de 10 minutos

As figuras 25, 26 e 27 mostram as dimensões verticais e horizontais do bulbo molhado tanto dos dados simulados como dos dados medidos. Para a areia, ambos os valores estiveram bastante próximos, exceto o raio do bulbo molhado na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  que foi superestimado pelo modelo. Para o solo arenoso, houve uma tendência do modelo em superestimar a profundidade do bulbo molhado nos tempos iniciais de aplicação de água, mas com o passar do tempo, a profundidade do bulbo molhado passou a ser subestimada. No solo argiloso, pode-se observar uma tendência do modelo em superestimar o raio do bulbo molhado e subestimar a sua profundidade.

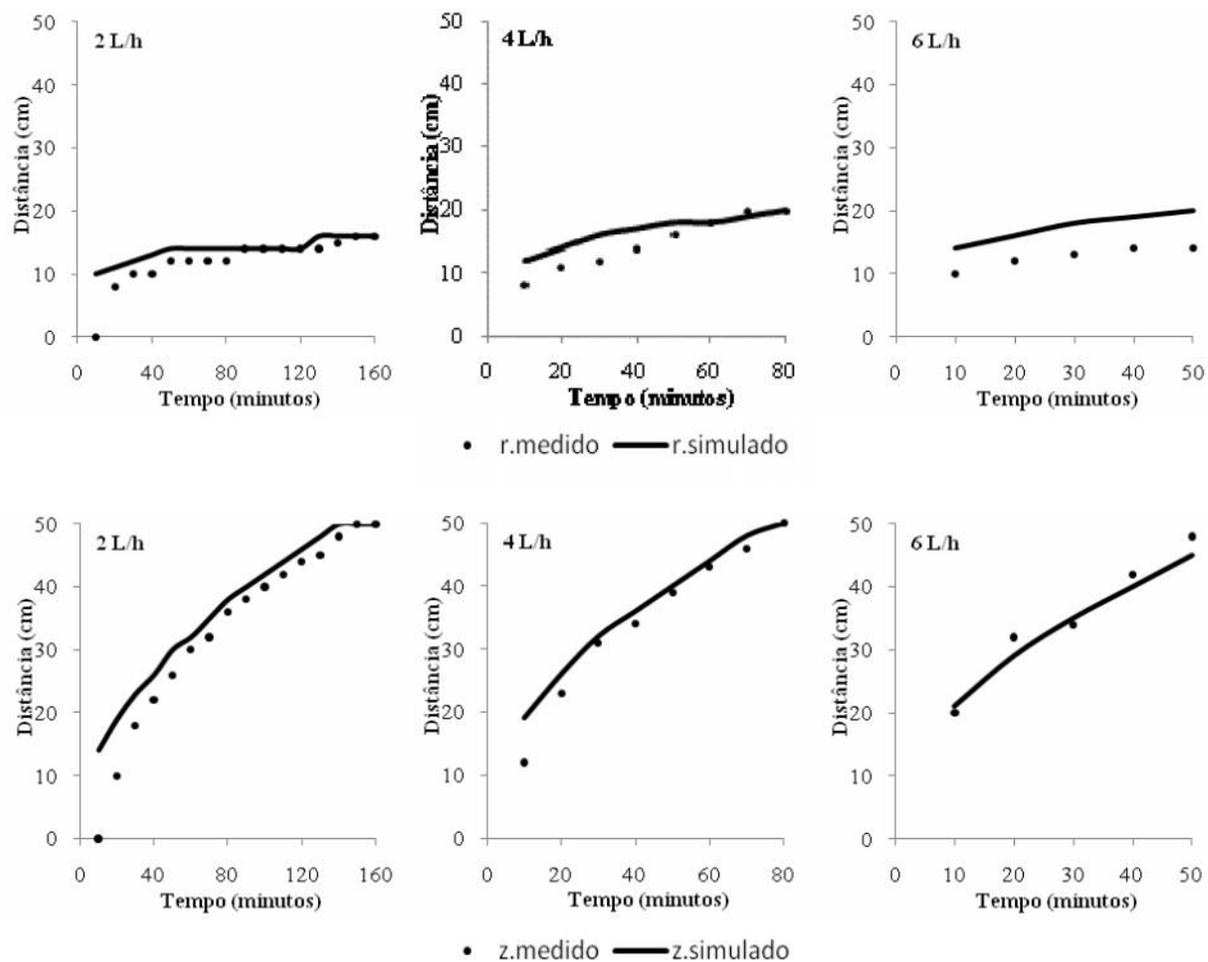


Figura 25 - Distância horizontal (r) e distância vertical (z) do bulbo molhado nas vazões de 2, 4 e 6 L h<sup>-1</sup> em areia. Comparação entre os dados simulados e medidos em experimento com a TDR

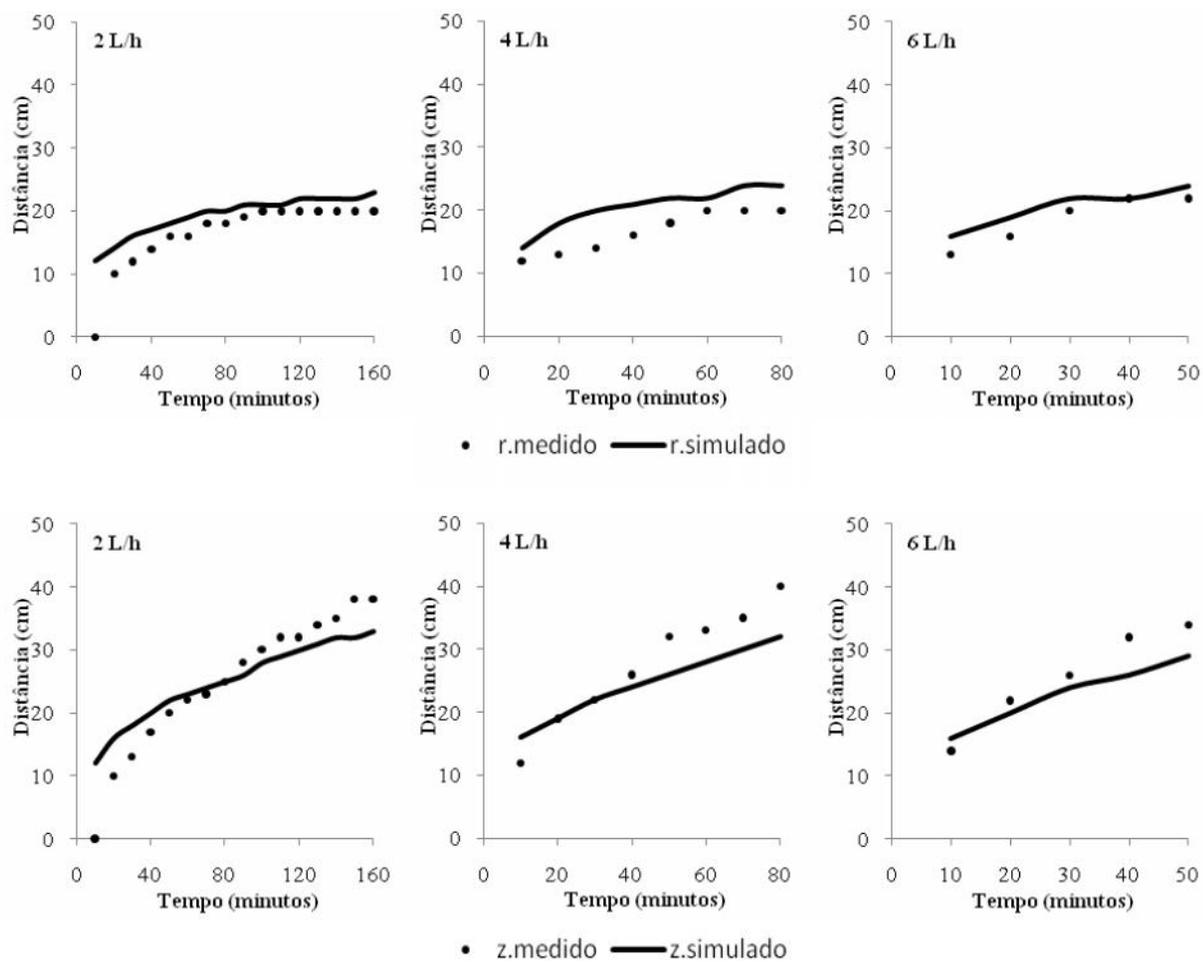


Figura 26 - Distância horizontal (r) e distância vertical (z) do bulbo molhado nas vazões de 2, 4 e 6 L h<sup>-1</sup> em solo arenoso. Comparação entre os dados simulados e medidos em experimento com a TDR

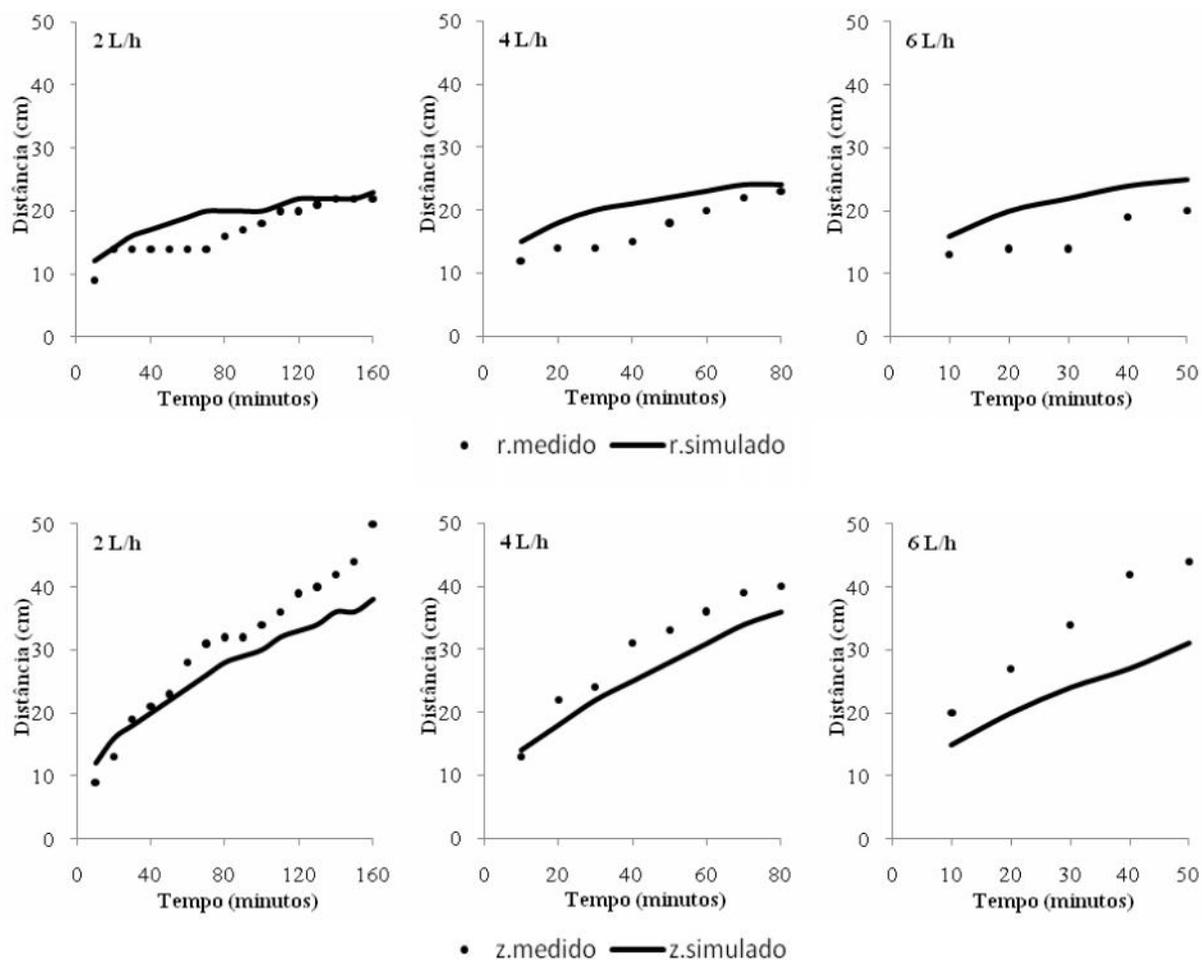


Figura 27 - Distância horizontal (r) e distância vertical (z) do bulbo molhado nas vazões de 2, 4 e 6 L h<sup>-1</sup> em solo argiloso. Comparação entre os dados simulados e medidos em experimento com a TDR

A Tabela 4 apresenta a raiz do erro quadrático médio entre os dados simulados e os dados medidos. Para a areia foi obtida a maior proximidade entre os dados medidos e simulados, com REQM de 0,017 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para todas as vazões utilizadas. Já para o solo arenoso, os valores de REQM foram 0,033 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a vazão de 2 L h<sup>-1</sup>, 0,034 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a vazão de 4 L h<sup>-1</sup>, e 0,040 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a vazão de 6 L h<sup>-1</sup>. Para o solo argiloso, os valores de REQM foram de 0,031 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> na vazão de 2 L h<sup>-1</sup>, 0,033 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a vazão de 4 L h<sup>-1</sup> e 0,033 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a vazão de 6 L h<sup>-1</sup>.

Há diversos trabalhos relatando a eficiência de modelos na previsão do bulbo molhado, comparando os resultados da simulação com dados obtidos experimentalmente. Skaggs et al. (2004, 2010) avaliaram a eficácia do modelo Hydrus em comparação a dados experimentais, e encontraram que a REQM variou entre 0,01 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, valores bastante próximo dos obtidos

neste trabalho. Kandelous e Simunek (2010) também encontraram valores de REQM variando até um máximo de  $0,045 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^3$  em simulações de um sistema de gotejamento subsuperficial com o modelo Hydrus.

Comparando os desvios do modelo em relação aos dados medidos do presente trabalho, e comparando com outros resultados apresentados na literatura, é possível afirmar que as previsões do modelo numérico proposto foram muito boas, mesmo considerando pequenos desvios em alguns pontos.

Ainda na Tabela 4, também é possível visualizar uma tendência de aumento da REQM com o tempo. Em outras palavras, com o passar do tempo os desvios das simulações sofrem um aumento. Resultados semelhantes foram encontrados por Bufon et al. (2011). Para estes autores, a explicação para este comportamento reside no fato de haver duas possíveis fontes de erro nos modelos desse tipo: a primeira associada aos dados de entrada e a segunda ao acúmulo dos desvios em cada passo da simulação. Desse modo, a imprecisão dos parâmetros de entrada do modelo gera um erro associado ao modelo, que por sua vez, é amplificado com o aumento do tempo de simulação.

Tabela 4 - Raiz do erro quadrático médio entre os valores de conteúdo de água no solo simulados e medidos com a TDR

Tempo (minutos)	2 L h <sup>-1</sup>			4 L h <sup>-1</sup>			6 L h <sup>-1</sup>		
	Areia	Solo arenoso	Solo argiloso	Areia	Solo arenoso	Solo argiloso	Areia	Solo arenoso	Solo argiloso
10	0,014	0,021	0,010	0,015	0,023	0,016	0,014	0,023	0,013
20	0,013	0,023	0,017	0,010	0,026	0,022	0,014	0,027	0,022
30	0,010	0,026	0,021	0,009	0,030	0,026	0,015	0,030	0,035
40	0,007	0,028	0,023	0,013	0,032	0,032	0,017	0,034	0,043
50	0,007	0,028	0,025	0,015	0,035	0,037	0,022	0,069	0,049
60	0,007	0,030	0,027	0,020	0,037	0,040	-	-	-
70	0,008	0,031	0,029	0,022	0,039	0,043	-	-	-
80	0,010	0,033	0,030	0,025	0,042	0,046	-	-	-
90	0,011	0,034	0,032	-	-	-	-	-	-
100	0,013	0,035	0,034	-	-	-	-	-	-
110	0,014	0,036	0,036	-	-	-	-	-	-
120	0,016	0,037	0,037	-	-	-	-	-	-
130	0,017	0,037	0,039	-	-	-	-	-	-
140	0,019	0,038	0,041	-	-	-	-	-	-
150	0,020	0,040	0,042	-	-	-	-	-	-
160	0,043	0,041	0,044	-	-	-	-	-	-
Média	0,017	0,033	0,031	0,017	0,034	0,033	0,017	0,040	0,033

## 5 CONCLUSÕES

A TDR se mostrou eficiente na determinação do bulbo molhado formado por um emissor pontual no decorrer do tempo.

Pelo balanço de massa, a TDR conseguiu medir aproximadamente 90% do volume total de água aplicado pelo emissor.

A forma e as dimensões do bulbo molhado sofreram grande influência do conteúdo de água inicial e das características do material, tais como textura e estrutura.

O modelo numérico proposto foi capaz de simular a formação do bulbo molhado em diferentes condições de tipo de solo e vazão do emissor. Para todas as condições de simulação apresentadas neste trabalho, os desvios do modelo em relação aos dados experimentais foram pequenos.



## REFERÊNCIAS

- AH KOON, P.D.; GREGORY, P.J.; BELL, J.P. Influence of drip irrigation emission rate on distribution and drainage of water beneath a sugar cane and fallow plot. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, p. 267-282, 1990.
- ALLEN, R.R.; BROCKWAY, C.E. Concepts for energy-efficient irrigation system design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 110, n. 2, p. 99-106, 1984.
- AMIR, I.; DAG, J. Lateral and longitudinal wetting patterns of very low energy moving emitters. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 13, n. 4, p. 183-187, 1993.
- ANGELAKIS, A.N.; ROLSTON, D.E.; KADIR, T.N.; SCOTT, V.H. Soil water distribution under trickle source. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 3, p. 484-500, 1993.
- ASSOULINE, S. Effects of micro drip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 66, p. 1630-1636, 2002.
- BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.J.C.M.; NIELSEN, D.R. Gamma ray beam attenuation as auxiliary technique for evaluation of soil water retention curve. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.499-502, 1998.
- BARROS, A.C.; FOLEGATTI, M.V.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B.L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 700-707, 2009.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; ALLEN, R.G.; DROOGERS, P.; D'URSO, G.D.; STEDUTO, P. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: state of the art. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 92, p. 111-125, 2007.
- BEN-GAL, A.; LAZAROVITCH, N.; SHANI, U. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 3, p. 1407-1413, 2004.
- BHATNAGAR, P.R.; CHAUHAN, H.S. Soil water movement under a single surface trickle source. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 799-808, 2008.
- BOTREL, T.A. **Simulação da distribuição espacial da água em solo irrigado com gotejador**. 1988. 61 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.
- BRANDT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN-ASHER, I.; HELLER, J.; GODELBERG, D. Infiltration from trickle source: I Mathematical models. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 35, n. 5, p. 675-682, 1971.
- BRESLER, E. Trickle-drip irrigation: principles and application to soil water management. **Advances in Agronomy**, New York, v. 29, p. 343-393, 1977.

\_\_\_\_\_. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 1, n. 1, p. 3-17, 1978.

BUFON, V.B.; LASCANO, R.J.; BEDNARZ, C.; BOOKER, J.D.; GITZ, D.C. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus-2D model. **Irrigation Science**, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00271-011-0279-z>>. Acesso em: 10 nov. 2011.

CAMERON, K.C.; BUCHAN, G.D. Darcy's law. In: TRIMBLE, S.W. **Encyclopedia of water science**. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 143-146.

COELHO, E.F.; OR, D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 206, p. 123-136, 1999.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A.; LEDO, C.A.S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 23-30, 2006.

COTE, C.M.; BRISTOW, K.L.; CHARLESWORTH, P.B.; COOK, F.J.; THORBURN, P.J. Analysis of soil wetting and solute transport in sub-surface trickle irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 22, n. 3, p. 143-156, 2003.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, 2000.

EL-HAFEDH, A.V.O.M.; DAGHARU, H.; MAALEJ, M. Analysis of several discharge rate spacing duration combinations in drip irrigation system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, p. 33-52, 2001.

ELMALOGLU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 1587-1595, 2009

EVETT, S.R.; TOLK, J.A.; HOWELL, T.A. Time domain reflectometry laboratory calibration in travel time, bulk electrical conductivity and effective frequency. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, n. 4, p. 1020-1029, 2005.

\_\_\_\_\_. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence and precision. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, n. 3, p. 894-907, 2006.

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, p. 69-111, 1988.

GHALI, G.S.; SVEHLIK, Z.J. Soil-water dynamics and optimum operating regime in trickle-irrigated fields. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 13, p. 127-143, 1988.

GONCALVES, A.C.A.; TRINTINALHA, M.A.; FOLEGATTI, M.V.; REZENDE, R.; TORMENA, C.A. Spatial variability and temporal stability of water storage in a cultivated tropical soil. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 153-162, 2011.

HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J.; PRUEGER, J.H. Managing soils to achieve greater water use efficiency. A review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 271–280, 2001

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HINNELL, A.; LAZAROVITCH, N.; FURMAN, A.; POULTON, M.; WARRICK, A. Neuro-drip: estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using neural networks. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 28, n. 6, p. 535-544, 2010.

HOWELL, T. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture, **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 281–289, 2001.

JONES, S.B.; WRAITH, J.M.; OR, D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 16, p. 141-153, 2002.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 649-658, 2010.

KANDELOUS, M.M.; SIMUNEK, J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 1070–1076, 2010.

KANDELOUS, M.M.; LIAGHAT, A.; ABBASI, F. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. **Iranian Journal of Agricultural Science**, Karaj, v. 39, n. 2, p. 371-378, 2008.

KANDELOUS, M.M.; SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. Th.; MALEK, K. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, n. 2, p. 488-497, 2011.

KELLER, J.; BLIESNER, R. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Chapman and Hall, 1990. 625 p.

LAFOLIE, F.; GUENNELON, R.; VAN GENUCHTEN, MTH. Analysis of water flow under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 1310–1318, 1989.

LAZAROVITCH, N.; ŠIMUNEK, J.; SHANI, U. System dependent boundary condition for water flow from subsurface source, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 1, p. 46–50, 2005.

LAZAROVITCH, N.; POULTON, M.; FURMAN, A.; WARRICK, A. Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. **Journal of Engineering Mathematics**, London, v. 64, n. 2, p. 201-218, 2009.

LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P.; DAUTREBANDE, S. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 88, p. 319-328, 1986.

LOMEN, D.O.; WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration: II. Line sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 38, p. 568-572, 1974.

LUBANA, P.P.S.; NARDA, N.K. Modelling soil water dynamics under trickle emitters - a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 78, p. 217-232, 2001.

MESHKAT, M.; WARNER, R.C.; WORKMAN, S.R. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 125, n. 6, p. 315-323, 1999.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 222, p. 163-190, 2000.

\_\_\_\_\_. Experimental and numerical evaluation of analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1657-1671, 2003.

MONCEF, H.; HEDI, D.; JELLOUL, B.; MOHAMED, M. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. **Irrigation and Drainage**, Chichester, v. 51, p. 347-360, 2002.

MUALEM, Y. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, p. 513-522, 1976.

NARASHIMHAN, T.N. Buckingham, 1907: an appreciation. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, p. 434-441, 2005.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 31, p. 213-237, 2001.

OR, D.; WRAITH, J.M. Soil water content and water potential relationships. In: WARRICK, A.W. (Ed.). **Soil physics companion**. Boca Raton: CRC Press, 2002. chap. 3, p. 49-84.

PARLANGE, J.Y. Theory of water movement in soils: 4. Two and three dimensional steady infiltration. **Soil Science**, Baltimore, v. 113, n. 2, p. 96-101, 1972.

PELLETIER, G.; TAN, C.S. Determining irrigation wetting patterns using time domain reflectometry. **HortScience**, St Joseph, v. 28, n. 4, p. 338-339, 1993.

PIKUL JR., J.L. Soil water measurement: gravimetric. In: In: TRIMBLE, S.W. **Encyclopedia of water science**. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 1063-1065.

PROVENZANO, G. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 133, n. 4, p. 342-349, 2007.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. v. 1, 478 p.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, New York, v. 1, p. 318-333, 1931.

ROBINSON, D.A.; JONES, S.B.; WRAITH, J.J.M.; OR, D.; FRIEDMAN, S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 444-475, 2003.

SCHMITZ, G.H.; SCHUTZE, N.; PETERSOHN, U. New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 5, p. 287-297, 2002.

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, p. 242-253, 1986.

SELLE, B. MINASNY, B.; BETHUNE, M. THAYALAKUMARAN, T.; CHANDRA, S. Applicability of Richards' equation models to predict deep percolation under surface irrigation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, n. 3/4, p. 569-578, 2011.

SERRARENS, D.; MACLINTYRE, J.L.; HOPMANS, J.W.; BASSOI, L.H. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 2, p. 349-354, 2000.

SILANS, A.M.B.P.; WERLANG, L.M. Dinâmica da umidade de um solo da Caatinga em função de sua condutividade térmica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 950-958, 2011.

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

SIMUNEK, J. Models of water flow and solute transport in the unsaturated zone. In: ANDERSON, M.G. **Encyclopedia of hydrological sciences**. West Sussex: John Wiley, 2005. p. 1171-1180.

SIMUNEK, J.; BRADFORD, S.A. Vadose zone modeling: introduction as importance. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, p. 581-586, 2008.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.Th.; SEJNA, M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n.2; p. 587-600, 2008.

SINGH, D.K.; RAJPUT, T.B.S.; SINGH, D.K.; SIKARWAR, H.S.; SAHOO, R.N.; AHMAD, T. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 83, p. 130-134, 2006.

SIYAL, A.A.; SKAGGS, T.H. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 893–904, 2009.

SKAGGS, T.H.; TROUT, T.J.; ROTHFUSS, Y. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 1886–1896, 2010.

SKAGGS, T.H.; TROUT, T.J.; SIMUNEK, J.; SHOUSE, P.J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 4, p. 304-310, 2004.

SKIERUCHA, W.; WILCZEK, A.; ALOKHINA, O. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements, **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 147, n. 2, p. 544-552, 2008

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 7-15, 2004

SOUZA, C.F.; FOLEGATTI, M.V.; OR, D. Distribution and storage characterization of soil solution for drip irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 27, p. 277-288, 2009.

SOUZA, C.F.; OR, D.; MATSURA, E.E. A variable-volume TDR probe for measuring water content in large soil volumes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 25-31, 2004.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F.; OR, D. Sondas de tdr para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 12-25, 2006.

STANGL, R.; BUCHAN, G.D.; LOISKANDL, W. Field use and calibration of a TDR-based probe for monitoring water content in a high-clay landslide soil in Austria, **Geoderma**, Amsterdam, v. 150, n. 1/2, p. 23-31, 2009.

TAGHAVI, S.A.; MARIÑO, M.A.; ROLSTON, D.E. Infiltration from trickle irrigation source. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 110, n. 4, p. 331-341, 1984.

THABET, M.; ZAYANI, K. Wetting patterns under trickle source in a loamy sand soil of south Tunisia. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science**, Alexandria, v. 3, n. 1, p. 38-42, 2008.

THORBURN, P.J.; COOK, F.J.; BRISTOW, K.L. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 22, p. 121-127, 2003.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

TOPP, G.C.; FERRÉ, T.P.A. Time-domain reflectometry. In: HILLEL, D. (Ed.). **Encyclopedia of soils in the environment**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 174-181.

\_\_\_\_\_. Measuring soil water content. In: ANDERSON, M.G. **Encyclopedia of hydrological sciences**. West Sussex: John Wiley, 2005. p. 1077-1088.

TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 47, n. 1, p. 125-132, 1998.

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

TOPP, G.C.; PARKIN, G.W.; FERRÉ, T.P.A. Soil water content. In: CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2006. chap. 70, p. 939-961.

TRINTINALHA, M.A.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; FOLEGATTI, M.V.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. **Acta Scieniarium: Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 3, p. 353-360, 2004.

TULLER, M.; OR, D. Water retention and characteristic curve. In HILLER, D.; HATFIELD, J.L. **Encyclopedia of soil in the environment**. Oxford: Elsevier, 2004. v. 4, p. 278-289.

TUNG-CHU, S. Capillary tube infiltration model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 5, p. 514-521, 1993.

VALLONE, M.; CATALDO, A.; TARRICONE, L. TDR moisture measurement in sand-like materials: a comparison between different calibration procedures. In: IMEKO TC4 SYMPOSIUM ON NOVELTIES IN ELECTRICAL MEASUREMENTS AND INSTRUMENTATION, 15., 2007, Iasi. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 1-6.

WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 38, p. 383-386, 1974.

WARRICK, A.W.; LOMEN, D.O. Time-dependent linearized infiltration: III. Strip and disk sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 40, p. 639-643, 1976.

YAO, W.W.; MA, X.Y.; LI, J.; PARKES, M. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 29, n. 4, p. 331-339, 2011.

ZHOU, Q.; KANG, S.; ZHANG, L.; LI, F. Comparison of APRI and HYDRUS-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 291, n. 1, p. 211-223, 2007.

ZUR, B. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 16, p. 101-105, 1996.



## **ANEXOS**



## ANEXO A

Script em BASIC para criar os mapas de isolinhas no Surfer

```

Sub Main
Dim SurferApp As Object
Set SurferApp = CreateObject("Surfer.Application")
SurferApp.Visible = True
Dim Plot As Object
Set Plot = SurferApp.Documents.Add(srfDocPlot)
SurferApp.ScreenUpdating = False
    For i = 2 To 82 Step 2
        j=i/2
SurferApp.GridData2("D:\tese-final\solo3-surf.xlsx",DataFileOptions:="sheet=6l-
difmean",xCol:=3,yCol:=2,zCol:=j+4,xMin:=0,xMax:=50,yMin:=-
50,yMax:=0,NumCols:=101,NumRows:=101,Algorithm:=srfKriging,DupMethod:=srfDupAvg,ShowReport:=
False,OutGrid:="d:\tese-final\solo3-6l-difmean.grd")
Set MapFrame = Plot.Shapes.AddContourMap(GridFileName:="d:\tese-final\solo3-6l-
Set Overlay = MapFrame.Overlays(1)
Set Levels = Overlay.Levels
Levels.LoadFile("d:\tese-final\solo3-dif.lvl")
Overlay.FillContours = True
Overlay.SmoothContours = srfConSmoothHigh
Levels.SetLabelFrequency(FirstIndex:=1, NumberToSet:=1, NumberToSkip:=9)
Overlay.LabelEdgeDist=0.05
Overlay.LabelLabelDist=15.0
Overlay.OrientLabelsUphill= True
Overlay.LabelFormat.Type=1
Overlay.LabelFormat.NumDigits = 2
Overlay.LabelFont.Size=12

Dim Axes As Object
Set Axes = MapFrame.Axes
Dim XAxis As Object
Set BottomAxis = Axes(1)
BottomAxis.ShowLabels = False
BottomAxis.MajorTickType=1
BottomAxis.LabelFont.Size=12
BottomAxis.Title="Tempo "+i+" minutos"
Set UpAxis = Axes(2)
UpAxis.ShowLabels = True
UpAxis.SetScale(0,50,10,10,50,0,0)
UpAxis.LabelFont.Size=12
Set LeftAxis = Axes(3)
LeftAxis.LabelFormat.AbsoluteValue = True
LeftAxis.SetScale(-50,0,10,-50,0,0,0)

```

```
LeftAxis.LabelFont.Size=12
Set RightAxis = Axes(4)
RightAxis.MajorTickType=1
RightAxis.LabelFont.Size=12
Path = "d:\tese-final\solo3-6l-difmean\solo3-6l-difmean-"+i
Plot.Export2(FileName:= Path+".jpg" , SelectionOnly:=False , Options:="Width=900, Height=900,
KeepAspect=0", FilterId:="jpg")
MapFrame.Delete
SurferApp.GridConvert(InGrid:="d:\tese-final\solo3-6l-difmean.grd", OutGrid:=Path+".txt",
OutFmt:=srfGridFmtXYZ)
Debug.Print "feito "+i+" minutos"
Next i
SurferApp.ScreenUpdating = True
End Sub
```

## ANEXO B

Programa em VBA para simular a formação do bulbo molhado em irrigação por gotejamento.

```

Option Explicit
Sub Macro1()
' Macro1 Macro
Dim Pi As Double
Pi = WorksheetFunction.Pi
'declarar variáveis
Dim Tamanzoz, Tamanzhor As Integer
Dim r, z As Integer
Dim Rmax, Zmax As Integer
Dim Tetaini As Double
Dim Simulatempo As Integer
Dim lin As Integer
Dim col As Integer
Dim t As Integer
Dim dif As Double
    Sheets("SURFER").Select
    Cells.Select
    Selection.ClearContents

    Sheets("UMIDADE").Select
    Rows("11:4800").Select
    Selection.ClearContents
'capturar os valores dos parâmetros
Sheets("UMIDADE").Select
Dim Alpha, M, N, TetaR, TetaS, Ks, Distr, Distz, Entrada As Double
Dim Tempo, Grava As Integer
Alpha = Sheets("UMIDADE").Cells(1, 2)
M = Sheets("UMIDADE").Cells(2, 2)
N = Sheets("UMIDADE").Cells(3, 2)
TetaR = Sheets("UMIDADE").Cells(4, 2)
TetaS = Sheets("UMIDADE").Cells(5, 2)
Ks = Sheets("UMIDADE").Cells(6, 2)
Distz = Sheets("UMIDADE").Cells(7, 2)
Distr = Sheets("UMIDADE").Cells(8, 2)
Entrada = Sheets("UMIDADE").Cells(10, 2)
Tempo = Sheets("UMIDADE").Cells(5, 5)
Tetaini = Sheets("UMIDADE").Cells(6, 5)
Zmax = Sheets("UMIDADE").Cells(7, 5)
Rmax = Sheets("UMIDADE").Cells(8, 5)
Simulatempo = Sheets("UMIDADE").Cells(9, 5) * 60 / Tempo
Grava = Sheets("UMIDADE").Cells(10, 5) * 60 / Tempo

```

```

TamanhoR = Rmax / Distr
TamanhoZ = Zmax / Distz
'declarar todas as matrizes vazias
Dim Teta(), Pot(), KTeta, Vva(), Vvb(), Vhe(), Vhd(), NTeta(), VAnel() As Double
'redimensionar as matrizes para o Tamanho
ReDim Teta(TamanhoZ, TamanhoR)
ReDim Pot(TamanhoZ + 1, TamanhoR + 1)
ReDim KTeta(TamanhoZ + 1, TamanhoR + 1)
ReDim Vva(TamanhoZ, TamanhoR)
ReDim Vvb(TamanhoZ, TamanhoR)
ReDim Vhe(TamanhoZ, TamanhoR)
ReDim Vhd(TamanhoZ, TamanhoR)
ReDim NTeta(TamanhoZ, TamanhoR)
ReDim VAnel(TamanhoR)
'preencher as coordenadas
lin = 13
Sheets("UMIDADE").Cells(12, 2).Value = "x / r"
Sheets("UMIDADE").Cells(12, 1).Value = "y / z"
Sheets("UMIDADE").Cells(12, 3).Value = "teta0"
For r = 1 To TamanhoR
For z = 1 To TamanhoZ
Sheets("UMIDADE").Cells(lin, 1).Select
    Sheets("UMIDADE").Cells(lin, 2).Value = ((Rmax - Distr / 2) - (TamanhoR - r) * Distr)
    Sheets("UMIDADE").Cells(lin, 1).Value = -((Zmax - Distz / 2) - (TamanhoZ - z) * Distz)
    If Tetaini = 0 Then
    Else
    Sheets("UMIDADE").Cells(lin, 3).Value = Tetaini
    End If
    lin = lin + 1
Next z
Next r
.....
Sheets("UMIDADE").Select
'iniciar as simulações no tempo
For t = 1 To Simulatetimepo
'escrever o número da simulação no cabeçalho

    Cells(12, t + 3).Select
    ActiveCell = "teta" & t

For r = 1 To TamanhoR
'CALCULAR O VOLUME DO ANEL PARA USAR EM SEGUIDA
VAnel(r) = Pi * (((r) * Distr) ^ 2 - ((r - 1) * Distr) ^ 2) * Distz
Next r
.....
'preencher a matriz de Teta
lin = 13
For r = 1 To TamanhoR

```

For z = 1 To Tamanhoz

    Teta(z, r) = Cells(lin, t + 2)

    lin = lin + 1

Next z

Next r

.....  
'calcular os valores de Pot e KTeta

lin = 13

For r = 1 To Tamanhohor

For z = 1 To Tamanhoz

    Pot(z, r) = (((TetaS - TetaR) / (Teta(z, r) - TetaR)) ^ (1 / M) - 1) ^ (1 / N) / Alpha

    KTeta(z, r) = Ks \* ((Teta(z, r) - TetaR) / (TetaS - TetaR)) ^ (1 / 2) \* (1 - (1 - ((Teta(z, r) - TetaR) / (TetaS - TetaR)) ^ (1 / M)) ^ M) ^ 2

    lin = lin + 1

Next z

Next r

.....  
'calcular as condições de contorno

For r = 0 To Tamanhohor + 1

For z = 0 To Tamanhoz + 1

    If z = 1 Then

        KTeta(z - 1, r) = -KTeta(z, r)

        Pot(z - 1, r) = Pot(z, r) + Distz

    End If

    If z = Tamanhoz Then

        KTeta(z + 1, r) = -KTeta(z, r)

        Pot(z + 1, r) = Pot(z, r) - Distz

    End If

    If r = 1 Then

        KTeta(z, r - 1) = -KTeta(z, r)

        Pot(z, r - 1) = Pot(z, r)

    End If

    If r = Tamanhohor Then

        KTeta(z, r + 1) = -KTeta(z, r)

        Pot(z, r + 1) = Pot(z, r)

    End If

Next z

Next r

.....  
'calcular os volumes que se movimentam Vva, Vvb, Vhe, Vhd

lin = 13

For r = 1 To Tamanhohor

For z = 1 To Tamanhoz

    Vva(z, r) = ((KTeta(z, r) + KTeta(z - 1, r)) / 2) \* ((Pot(z, r) - Pot(z - 1, r) + Distz) / Distz) \* (Pi \* (r \* Distr) ^ 2 - Pi \* ((r - 1) \* Distr) ^ 2) \* Tempo

```

    Vvb(z, r) = ((KTeta(z + 1, r) + KTeta(z, r)) / 2) * ((Pot(z + 1, r) - Pot(z, r) + Distz) / Distz) * (Pi * (r * Distr)
^ 2 - Pi * ((r - 1) * Distr) ^ 2) * Tempo
    Vhe(z, r) = ((KTeta(z, r - 1) + KTeta(z, r)) / 2) * ((Pot(z, r) - Pot(z, r - 1)) / Distr) * 2 * Pi * Distr * Distz *
(r - 1) * Tempo
    Vhd(z, r) = ((KTeta(z, r) + KTeta(z, r + 1)) / 2) * ((Pot(z, r + 1) - Pot(z, r)) / Distr) * 2 * Pi * Distr * Distz *
(r) * Tempo
    'lin = lin + 1
Next z
Next r

'calcular a nova umidade
For r = 1 To Tamanhor
For z = 1 To Tamanhoz
    Teta(z, r) = Teta(z, r) + ((Vva(z, r) - Vvb(z, r) + Vhe(z, r) - Vhd(z, r)) / (VAnel(r) * 3600))
Next z
Next r
'somar o volume de água emitido nas células superficiais
dif = (Entrada)
For r = 1 To Tamanhor
'For r = 1 To 1
    Teta(1, r) = Teta(1, r) + (dif / VAnel(r))
    'Teta(1, 1) = Teta(1, 1) + (dif / VAnel(r))
    If Teta(1, r) > TetaS Then
        Cells(11, t + 3).Value = "sim"
        dif = (Teta(1, r) - TetaS) * VAnel(r)
        Teta(1, r) = TetaS
    Else
        Exit For
    End If
Next r
'escrever a nova umidade
lin = 13
For r = 1 To Tamanhor
For z = 1 To Tamanhoz
If Teta(z, r) > TetaS Then
Teta(z, r) = TetaS
End If
If Teta(z, r) < TetaR Then
Teta(z, r) = TetaR
End If
    Sheets("UMIDADE").Cells(lin, t + 3).Value = Teta(z, r)
    lin = lin + 1
Next z
Next r
If (t Mod Grava) = 0 Then
    Sheets("SURFER").Select

```

```
lin = 13
For r = 1 To Tamanhor
For z = 1 To Tamanhoz
'colocar na outra planilha SURFER os valores para os tempos e interesse
col = t / Grava
Sheets("SURFER").Cells(1, col + 2).Value = "teta" & t / 60 * Tempo
Sheets("SURFER").Cells(lin - 11, col + 2).Value = Teta(z, r)
If t = Grava Then
    Sheets("SURFER").Cells(1, 1).Value = "Y/z"
    Sheets("SURFER").Cells(1, 2).Value = "X/r"
    Sheets("SURFER").Cells(lin - 11, 2).Value = ((Rmax - Distr / 2) - (Tamanhor - r) * Distr)
    Sheets("SURFER").Cells(lin - 11, 1).Value = -((Zmax - Ditz / 2) - (Tamanhoz - z) * Ditz)
End If
lin = lin + 1
Next z
Next r
Sheets("UMIDADE").Select
End If
Next t
End Sub
```