



MICHAEL SILVEIRA THEBALDI

**EFEITOS DA CONTRAPRESSÃO NA
HIDRÁULICA DE EMISSORES EM
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

LAVRAS – MG

2014

MICHAEL SILVEIRA THEBALDI

**EFEITOS DA CONTRAPRESSÃO NA HIDRÁULICA DE EMISSORES
EM GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Luiz Antonio Lima

Coorientadores

Dr. Alberto Colombo

Dr. Manoel Alves de Faria

LAVRAS – MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Thebaldi, Michael Silveira.

Efeitos da contrapressão na hidráulica de emissores em
gotejamento subsuperficial / Michael Silveira Thebaldi. – Lavras :
UFLA, 2014.

132 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Luiz Antônio Lima.

Bibliografia.

1. Irrigação localizada. 2. Dimensionamento. 3. Simulação. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 627.52

MICHAEL SILVEIRA THEBALDI

**EFEITOS DA CONTRAPRESSÃO NA HIDRÁULICA DE EMISSORES
EM GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 03 de outubro de 2014.

| | |
|--|------|
| Dr. Alberto Colombo | UFLA |
| Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira | UFLA |
| Dr. Antônio Carlos Barreto | IFTM |
| Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista | UFG |

Dr. Luiz Antonio Lima
Orientador

Dr. Manoel Alves de Faria
Coorientador

LAVRAS – MG

2014

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Mariza, e à minha família por me apoiarem e me guiarem até aqui.

À Ludmila, minha namorada amada, pelo apoio incondicional e carinho em todos os momentos difíceis.

Aos amigos, mas em especial à Ana Carla Nogueira, Alberto Andrade, Alberto Felisberto, Beatriz Conceição, Camila Franco, Elvis Lima, Igor Ferreira, João Barreto, José Antônio Sant'Ana, Livia Alvarenga, Mateus Bueno, Matheus Colares, Murilo Barros, Pedro Lima, Rafael Gatto, Rafael Teixeira, Rosângela Marques e Waina Junqueira por fazerem esse período ser muito mais alegre.

Aos meus companheiros de república, aqui no Brasil e nos EUA, André Luiz Silva, Carlos Eduardo Castro, Eusímio Fraga, Fernando Guedes, Juliano, Márcio Guedes, Rafael Narlin, Ranoel Gonçalves, Renato Camargos e Ricardo Gava.

Ao Willian Almeida e à Rafaella Andrade pela ajuda nos experimentos.

A todos os professores do programa de pós-graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, mas, em especial, ao meu orientador, professor Luiz Antônio Lima e ao professor Antônio Marciano da Silva, pelo aprendizado que vai além da academia.

Aos técnicos administrativos do Núcleo de Engenharia de Água e Solo José Luís, Oswaldo, Marcos e Rose.

To my friends of the Soil Hydrology Laboratory of the University of California at Davis, Ahmad Moradi, Armem Malazian, Christopher Bianucci, Emmanuel Leger, Estelle Yeh, Harmony Mairesse, Maziar Kandelous, Navneet Bilga, Peter Hartsough, Shahar Baram, Sharon Dabach and Valentin Couvreur.

To the University of California at Davis, in the name of Professor Jan Hopmans, for all the support to my research. I'd also like to thank Mike Mata,

Engineer of the Campbell Tract Field Station, for all the help during my field experiments.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de doutorado sanduíche no exterior (Processo BEX 2947-13-7).

*“God sends the rain on the just and the unjust and when He decides not, He’s
provided irrigation engineers”*

Peter M. Waller

RESUMO GERAL

Sendo a irrigação essencial à produção agrícola e com a crescente restrição de captação de água para este fim, faz-se necessário a adoção de sistemas de irrigação que demandem menores vazões, dentre os quais se destaca o gotejamento subsuperficial. Porém, seu uso, necessita de maiores informações sobre seu comportamento hidráulico. Assim, os objetivos desse trabalho foram: determinar a relação entre a vazão e a pressão de quatro gotejadores em condições superficiais e subsuperficiais; determinar a variação de vazão destes gotejadores quando enterrados em duas profundidades em um solo franco bem como a contrapressão gerada pelo solo na condição subsuperficial; verificar a influência da variação da vazão dos gotejadores enterrados em solo franco sobre o comprimento máximo das linhas laterais e simular, usando o modelo Hydrus 2D/3D, o comportamento da frente de umedecimento em função da profundidade de instalação dos emissores, vazões dos gotejadores em condição superficial e subsuperficial, comparando-as com valores reais obtidos em campo. Para tal, o comportamento hidráulico em condição superficial e subsuperficial dos gotejadores TalDrip, JardimLine, D5000 e Hydro PCND foi determinado em laboratório na Universidade Federal de Lavras e o desempenho destes em campo foi testado na Universidade da Califórnia em Davis, EUA, enterrados a 0,10 e 0,20 m no solo *Yolo Loam* e considerando tempos de irrigação de 0,5; 1,0 e 3,0 horas. Os emissores avaliados tiveram seus coeficientes e expoentes de descarga alterados em aplicação submersos em água, representando o efeito da contrapressão. A variação de vazão entre a aplicação superficial e subsuperficial no solo *Yolo Loam* à pressão de entrada nas laterais de 145 kPa foi maior quanto maior a vazão do emissor, em função das maiores contrapressões do solo geradas sobre o ponto de descarga dos emissores em gotejamento enterrado. A profundidade de instalação dos emissores bem como o tempo de irrigação não influenciaram a contrapressão e conseqüentemente a variação de vazão. Para emissores não autocompensantes, o comprimento máximo de linhas laterais é maior no caso de aplicação subsuperficial enquanto que, no caso de emissores autocompensantes, as laterais superficiais podem ter comprimentos maiores que as subsuperficiais. A simulação utilizando a condição de contorno especial da função característica do gotejamento subsuperficial do *software* Hydrus 2D/3D mostrou-se mais precisa que a condição em que o fluxo superficial, a partir do tubo gotejador TalDrip, foi considerado.

Palavras-chave: Irrigação localizada. Dimensionamento. Simulação.

GENERAL ABSTRACT

Irrigation is essential for agricultural production and with the increasing restriction of water intake for this purpose, is necessary the adoption of irrigation systems that require lower flow, as the subsurface drip irrigation. However, its use requires further information about its hydraulic behavior. Thus, the aims of this study were to determine the relationship between flow and pressure of four drippers in both surface and subsurface conditions; determine the flow variation of these drippers when buried at two depths in a Loam soil and backpressure generated by the soil on subsurface condition; verify the influence of flow variation of buried emitters in the Loam soil on the maximum length of the irrigation laterals and simulate, using the Hydrus 2D / 3D model, the behavior of the wetting front as a function of depth of installation of the emitters, drippers' flow rates on surface and subsurface conditions, comparing them to actual values obtained in field. To this end, the hydraulic behavior of superficial and subsurface drippers TalDrip, Jardiline, D5000 and Hydro PCND was determined, in laboratory, at the Federal University of Lavras and the performance of these on field was tested at the University of California at Davis, USA, buried at 0.10 and 0.20 m in Yolo loam soil and considering irrigation times of 0.5, 1.0 and 3.0 hours. The evaluated emitters had their proportionally constants and discharge exponents changed when submerged in water, representing the effect of backpressure. The variation of flow between the surface and subsurface application on Yolo Loam soil with lateral's inlet pressure of 145 kPa was greater as higher the emitter flow, due to higher back pressures generated at the emitter's discharge point in subsurface drip. The installation depth of emitters as well as the irrigation time have not affected the backpressure and consequently the flow variation. For non-pressure compensating emitters, the maximum length of lateral lines is greater in the case of subsurface application whereas in the case of pressure-compensating emitters, surface laterals may have lengths greater than the subsurface lines. The simulation using the special boundary condition of the subsurface drip characteristic function implemented on Hydrus 2D / 3D software proved to be more accurate than the condition in which the surface flow from the TalDrip drip line was considered.

Keywords: Trickle irrigation. Design. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1 Cavidades desenvolvidas no solo ao redor de uma fonte pontual aplicando água subsuperficialmente25

CAPÍTULO 2

- Figura 1 Aparato montado para a avaliação da vazão dos segmentos de tubos gotejadores.46
- Figura 2 Estrutura metálica utilizada para manter os gotejadores na profundidade de ensaio (A) e detalhe do conector inicial com válvula utilizado para controle das linhas48

CAPÍTULO 3

- Figura 1 Vista lateral do sistema de irrigação71

CAPÍTULO 5

- Figura 1 Projeto experimental 115
- Figura 2 Detalhes na malha retangular de elementos finitos gerada no Hydrus 2D/3D para as simulações do movimento de água a partir de gotejadores enterrados 119

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 2

| | | |
|------------|---|----|
| Gráfico 1 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador TalDrip em aplicação superficial..... | 49 |
| Gráfico 2 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador TalDrip em aplicação submersa..... | 50 |
| Gráfico 3 | Correlação entre as vazões superficial submersa observada para o tubo gotejador TalDrip..... | 51 |
| Gráfico 4 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador JardimLine em aplicação superficial..... | 52 |
| Gráfico 5 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador JardimLine em aplicação submersa..... | 53 |
| Gráfico 6 | Correlação entre a vazão superficial e a submersa observada para o tubo gotejador JardimLine..... | 54 |
| Gráfico 7 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador D5000 em aplicação superficial..... | 55 |
| Gráfico 8 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador D5000 em aplicação submersa..... | 56 |
| Gráfico 9 | Correlação entre a vazão superficial e a submersa observada para o tubo gotejador D5000..... | 57 |
| Gráfico 10 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador Hydro PCND em aplicação superficial..... | 58 |
| Gráfico 11 | Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador Hydro PCND em aplicação submersa..... | 60 |
| Gráfico 12 | Correlação entre a vazão superficial observada e a vazão submersa observada para o tubo gotejador Hydro PCND..... | 61 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|-----------|---|-----|
| Gráfico 1 | Comprimento máximo da lateral do tubogotejador TalDrip em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis..... | 99 |
| Gráfico 2 | Comprimento máximo da lateral do tubo gotejador JardimLine em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis..... | 101 |
| Gráfico 3 | Comprimento máximo da lateral do tubogotejador D5000 em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis..... | 103 |
| Gráfico 4 | Comprimento máximo da lateral do tubo gotejador Hydro PCND em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis..... | 104 |

CAPÍTULO 5

| | | |
|-----------|---|-----|
| Gráfico 1 | Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 0,5 hora..... | 123 |
| Gráfico 2 | Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 1 hora..... | 124 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Gráfico 3 | Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 3 horas..... | 126 |
| Gráfico 4 | Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,20 m e tempo de irrigação de 0,5 hora | 127 |
| Gráfico 5 | Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,20 m e tempo de irrigação de 1 hora | 128 |
| Gráfico 6 | Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 3 horas..... | 129 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Propriedades texturais e parâmetros hidráulicos do solo <i>Yolo Loam</i> | 74 |
| Tabela 2 | ANOVA das avaliações variação entre vazão superficial e subsuperficial dos gotejadores (ΔQ) e contrapressão (hs) em função dos tratamentos..... | 77 |
| Tabela 3 | Variação de vazão (ΔQ) dos emissores avaliados enterrados no solo <i>Yolo Loame</i> pressão de entrada no início da linha lateral de 145 kPa..... | 79 |
| Tabela 4 | Variação entre a vazão superficial e subsuperficial (ΔQ) para pressão de entrada no emissor de 145 kPa nos diversos tratamentos | 80 |
| Tabela 5 | Vazão superficial à pressão de entrada de 145 kPa e contrapressão calculada atuando sobre os emissores enterrados | 81 |
| Tabela 6 | Contrapressão (kPa) agindo sobre os emissores em condição subsuperficial para pressão de entrada de 145 kPa no solo <i>Yolo Loam</i> nos diversos tratamentos..... | 82 |
| Tabela 7 | Raio da cavidade formada ao redor do ponto fonte, r_0 (m), nos diversos tratamentos no solo <i>Yolo Loam</i> para pressão de entrada de 145 kPa na linha lateral | 83 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Coefficiente de Uniformidade de Christiansen e Coeficiente de Variação de Fabricação e suas classificações nas pressões avaliadas para os diversos emissores | 97 |
|----------|--|----|

CAPÍTULO 5

| | | |
|----------|---|-----|
| Tabela 1 | Raiz quadrada média dos erros entre a umidade volumétrica observada e as simuladas pelo modelo Hydrus 2D/3D considerando a vazão Considerando a contrapressão e sem considerar a contrapressão do emissor TalDrip | 121 |
|----------|---|-----|

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 1 Introdução Geral | 17 |
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 19 |
| 2.1 Irrigação | 19 |
| 2.2 Irrigação localizada | 20 |
| 2.3 Irrigação por gotejamento | 21 |
| 2.4 Gotejamento subsuperficial | 23 |
| 2.5 Descarga em orifícios | 27 |
| 2.6 Movimento de água em meios porosos na irrigação por gotejamento | 30 |
| REFERÊNCIAS | 33 |
| CAPÍTULO 2 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial, parte I: relação vazão-pressão | 41 |
| 1 INTRODUÇÃO | 43 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 45 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| 4 CONCLUSÕES | 63 |
| REFERÊNCIAS | 64 |
| CAPÍTULO 3 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial, parte II: comportamento da vazão | 66 |
| 1 INTRODUÇÃO | 68 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 70 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 77 |
| 4 CONCLUSÕES | 85 |
| REFERÊNCIAS | 86 |
| CAPÍTULO 4 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial, parte III: comprimento máximo de laterais | 88 |
| 1 INTRODUÇÃO | 90 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 92 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 97 |
| 4 CONCLUSÕES | 106 |
| REFERÊNCIAS | 107 |
| CAPÍTULO 5 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial, parte IV: movimento e simulação da frente de umedecimento | 109 |
| 1 INTRODUÇÃO | 111 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 113 |

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----|
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 121 |
| 4 | CONCLUSÕES | 131 |
| | REFERÊNCIAS | 132 |

CAPÍTULO 1 Introdução Geral

1 INTRODUÇÃO

A irrigação é um componente essencial da produção agrícola em que, cada vez mais, maiores produções de alimentos e fibras são necessárias sobre restrições severas de uso da água em função da necessidade iminente de sua conservação e proteção.

De acordo com Ben-Gal e Lazarovitch (2012), com o uso da irrigação por gotejamento, aplicada subsuperficialmente ou superficialmente, consegue-se aumentar a eficiência de uso da água, pela redução ou extinção da evaporação, do escoamento superficial, da lixiviação de água e contaminantes para zonas abaixo do sistema radicular das culturas, além da redução das plantas daninhas na área de cultivo e aumento na produtividade com o possível fornecimento de condições ótimas de absorção de água e nutrientes pelas culturas.

Os emissores no gotejamento subsuperficial são instalados no interior do solo, o que provoca um efeito adicional aos efeitos já gerados no gotejamento convencional, citados anteriormente. Adicionalmente, há um aumento na vida útil dos materiais (laterais e emissores), facilita o uso de máquinas no campo de produção e no caso de uso de águas residuárias, previne o contato dos produtores e mão de obra com água de baixa qualidade (CAMP, 1998; LAMM et al., 2009).

O desenvolvimento do gotejamento enterrado teve início nos anos 60, porém, com o desenvolvimento da técnica em Israel nos anos 80 houve sua difusão pelo mundo (CAMP, 1998), representando nos dias atuais um importante componente da irrigação agrícola e paisagística.

Entretanto, o sucesso da irrigação por gotejamento subsuperficial é dependente da transposição de alguns obstáculos. O emissor quando enterrado geralmente possui uma cavidade limitada ao seu redor que fica preenchida por

água, o que cria uma pressão positiva quando a intensidade de aplicação do emissor supera a taxa de infiltração do solo (SHANI; OR, 1995). Assim, projetos instalados em campo podem ser prejudicados, já que a lâmina dimensionada não será disponibilizada à cultura.

Alguns autores sugerem o uso de emissores autocompensantes para que haja a redução do problema de uniformidade causada pelo fenômeno, porém, os valores de contrapressão encontrados na literatura variam consideravelmente. Como exemplo, valores entre 1,5 a 20kPa obtidos por Gil et al. (2011), 3 a 11 kPa encontrados por Gil et al. (2010) e até 80 kPa, obtidos por Shani et al. (1996), valores estes passíveis de fazer com que os emissores autocompensantes saiam de sua faixa de autocompensation, obtendo como resultado, com o efeito adicional da variabilidade espacial das características físico-hídricas do solo, baixa uniformidade na irrigação.

Assim, os objetivos deste trabalho foram: a) Determinar a relação entre a vazão e a pressão de quatro gotejadores em condições superficiais e subsuperficiais e as possíveis diferenças no comportamento hidráulico dos emissores nessas duas condições. b) Determinar a variação de vazão (em relação à vazão superficial) destes gotejadores quando enterrados em duas profundidades em um solo franco bem como a contrapressão gerada pelo solo na condição subsuperficial. c) Verificar a influência da variação da vazão dos gotejadores enterrados em solo franco sobre o comprimento máximo das linhas laterais. d) Simular, usando o modelo Hydrus 2D/3D, o comportamento da frente de umedecimento em função da profundidade de instalação do emissor TalDrip, assim como de sua vazão, sem considerar o fenômeno da contrapressão e o considerando, em três tempos de irrigação, comparando-as com valores reais obtidos em campo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Irrigação

A irrigação é uma técnica milenar que tem por objetivo fornecer água à planta no momento em que ela necessita e na quantidade exata. Dependendo da região, o cultivo de determinadas culturas não é possível sem a utilização da irrigação.

Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2006), a irrigação não deve ser considerada isoladamente, mas sim parte de um conjunto de técnicas utilizadas para garantir a produção econômica de determinada cultura, sendo uma estratégia para elevar a rentabilidade da propriedade rural por meio do aumento da produção e principalmente da produtividade, de forma sustentável e com maior geração possível de emprego e renda. A irrigação constitui alternativa para a melhoria do rendimento de grande parte das culturas, proporcionando um incremento médio de produtividade, que pode atingir 200% (GONZAGA NETO, 2000).

Podem-se enumerar três métodos de irrigação, caracterizados em diferentes formas consideradas como sistemas, que apresentam suas particularidades na forma de aplicar água às culturas. São eles: o método de irrigação por superfície que se constitui principalmente dos sistemas de irrigação por inundação, faixas e sulcos. Os métodos de irrigação pressurizados que são a irrigação por aspersão (representada pela aspersão convencional e aspersão mecanizada) e localizada (gotejamento e microaspersão).

O suprimento adequado de água é capaz de gerar incrementos na produção agrícola e assim é possível afirmar que a adoção de sistemas de irrigação corretamente dimensionados, aliados ao manejo apropriado, pode proporcionar melhor qualidade às plantas ou mudas, redução de lixiviação de

nutrientes, maior potencial germinativo e homogeneidade no desenvolvimento (GRUBER, 2006; NEVES et al., 2010). Portanto, a irrigação deve ser utilizada sempre que o déficit hídrico for uma limitação para o desenvolvimento e a produção da cultura, pois tem como objetivo aumentar a produtividade, garantir a qualidade na colheita, reduzir custos unitários de produção, melhorar a qualidade final do produto, dentre outros (ALBUQUERQUE, 2010; COSTA et al., 2010).

2.2 Irrigação localizada

Este método compreende a aplicação de água em apenas uma fração da área cultivada, com baixa vazão e de forma frequente, mantendo o solo na zona radicular das plantas sob alto regime de umidade próximo à capacidade de campo, umidade em que a água do solo ocupa principalmente os poros de menor tamanho. Inicialmente, utilizaram-se, para a aplicação de água, tubos de polietileno com pequenos orifícios chamados de gotejadores (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

Com o tempo, pôde-se observar que a adoção do sistema de gotejamento para solos mais permeáveis e culturas de amplo sistema radicular limitava o crescimento da cultura em função do pequeno bulbo molhado, comprometendo o desenvolvimento e a sustentação da planta, em função da infiltração vertical ser dominante em relação à infiltração horizontal em solos arenosos, porém esta situação pode ser contornada pelo projetista de irrigação. Para superar esse problema, a microaspersão foi concebida com a principal característica de aplicar água, com baixa pressão, mediante sua pulverização em pequenas gotas (BOMAN, 2007).

A aplicação de água ao solo no gotejamento é sob a forma de fonte pontual, ficando a superfície do solo com uma área molhada circular e seu

volume com a forma de um bulbo. Quando os gotejadores são próximos uns aos outros pode haver a formação de uma faixa molhada contínua. No caso da microaspersão, a área molhada também se apresenta na forma de discos ou faixas, só que com maior diâmetro molhado, podendo ser utilizada a modalidade da microaspersão invertida e suspensa, a fim de reduzir a exposição dos jatos de água à ação do vento.

Como vantagens da irrigação localizada têm-se, principalmente: a maior eficiência no uso da água, o controle fitossanitário e a possibilidade de utilização em solos salinos ou com água salina.

Uma das dificuldades encontradas na irrigação localizada reside na facilidade com que as seções menores dos emissores se obstruem, podendo afetar a distribuição da água para as plantas e, conseqüentemente, a produção (BENÍCIO et al., 2009). Esse problema afeta principalmente o gotejamento, tendo menor importância na microaspersão, graças à maior área da seção de descarga dos emissores. Para comparação, um gotejador possui diâmetro de passagem da água que varia de 0,3 mm a 1 mm, enquanto o diâmetro do bocal dos microaspersores pode chegar a mais de 2 mm (CABELLO, 1996).

Em contrapartida, as perdas de água nos sistemas por microaspersão são, normalmente, maiores do que na irrigação por gotejamento. Isso ocorre devido à maior superfície molhada de solo e também pelo arraste do vento, já que a água é lançada ao ar. Mesmo com operação próxima à superfície do solo, os microaspersores têm sua uniformidade afetada significativamente pelo vento (SILVA; SILVA, 2005).

2.3 Irrigação por gotejamento

Para Dasberg e Bresler (1985) e Dasberg e Or (1999), a irrigação por gotejamento compreende a aplicação de pequenas quantidades de água

diretamente na zona radicular das plantas, por meio de fonte pontual ou linha de gotejadores sobre ou abaixo do solo, com pressões de operação variando entre 20 e 200 kPa e baixa vazão (1 a 30 L h⁻¹). A aplicação resulta em um volume de solo molhado, conhecido como bulbo molhado.

A irrigação por gotejamento é um sistema fixo, cujo custo elevado limita seu uso para culturas nobres, com alta capacidade de retorno. Além disso, exige alto investimento em obras e aquisição de equipamentos para captação, condução, controle e distribuição da água, devendo ser considerados gastos com mão de obra e energia elétrica para operação e manejo do sistema, que representam importantes custos operacionais adicionais à produção (SILVA; FARIA; REIS, 2003).

Esse sistema de irrigação possui como limitação o fato de seus emissores possuírem orifícios e labirintos pequenos, suscetíveis ao entupimento (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Este fato é agravado com a aplicação de efluentes tratados e fertirrigação, devido aos altos teores de sólidos suspensos e bactérias formadoras de biofilme (CARARO; BOTREL, 2007; RIBEIRO et al., 2005).

Mantovani e Ramos (1994) afirmam que a uniformidade de distribuição (UD) na irrigação por gotejamento deve estar entre 90 e 95%. Uma uniformidade de apenas 55,7% foi encontrada em um sistema de irrigação por gotejamento avaliado por Gomes et al. (2000). Em outro trabalho realizado por Gomes et al. (2003), encontrou-se um valor de 93%. A diferença de uniformidade entre os dois sistemas avaliados se deve ao tempo de uso, sendo, no segundo caso, um sistema recém-instalado, e no primeiro caso, um sistema com 26 vezes mais tempo de operação. Certamente a baixa uniformidade do sistema mais antigo pode ter sido por problemas com entupimentos.

O sistema de irrigação por gotejamento superficial é o mais utilizado entre os sistemas por gotejamento. Dentre suas vantagens incluem a facilidade

de instalação, inspeção, mudança de posição e limpeza de emissores, além da possibilidade de verificação dos padrões de umidade na superfície do solo e da medida da vazão dos emissores, individualmente (NOGUEIRA; COELHO; LEÃO, 2000).

2.4 Gotejamento subsuperficial

O gotejamento subsuperficial vem se tornando um método comum de irrigação na agricultura e paisagismo, provendo água e nutrientes às plantas enquanto mantém a superfície do solo seca (BEN-GAL; LAZOROVITCH; SHANI, 2004). Isto é importante quando a água residuária é utilizada, já que há a redução de odores e riscos à saúde (TROOIJEN; HILLS; LAMM, 2002).

No sistema de gotejamento subsuperficial, toda a rede é enterrada, inclusive as laterais. De acordo com Souza, Coelho e Paz (2007), o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial apresenta algumas vantagens em relação ao superficial, tais como: aumento na eficiência de irrigação e no uso de água e maior durabilidade, aumentando assim a disponibilidade de nutrientes e a redução da área de evaporação de água a partir da superfície do solo. Com isso, proporciona um bulbo molhado com umedecimento de um volume de solo até 46% maior que o verificado no gotejamento superficial, aumentando assim a eficiência na absorção de água. Adicionalmente às características citadas anteriormente, possui menor incidência de plantas daninhas, menor incidência de doenças justificadas por uma menor umidade na superfície, grande potencial para automação, possibilidade de aplicação de produtos químicos em solução na água de irrigação, flexibilidade no uso de maquinário agrícola, dentre outros (LAMM et al., 2009; LIMA et al., 2010; SCALOPPI, 1986).

Uma das principais limitações do gotejamento subterrâneo está geralmente relacionada ao estabelecimento inicial da cultura. Por não umedecer

a superfície do solo ou não permitir condições satisfatórias de umidade para a germinação de sementes ou pegamento de mudas, se faz necessário o uso de um segundo sistema de irrigação, frequentemente por aspersão, aumentando os custos e reduzindo o retorno econômico (MAROUELLI; SILVA, 2002). Outro problema potencial é o entupimento de gotejadores devido à entrada de partículas de solo, em função da possibilidade de formação de vácuo no interior dos tubos e gotejadores, ou de raízes nos gotejadores, o que pode ser prevenido pelo uso de ventosas, gotejadores especiais e/ou injeção de Trifluralina em pequenas concentrações (CABELLO, 1996; LAMM et al., 2009).

Camp (1998) sugere que a profundidade de instalação de gotejadores enterrados deve ser suficiente para que não haja afloramento de umidade na superfície do solo e que as operações de preparo possam ser realizadas sem causar danos às laterais, já que a lateral deve permanecer instalada no campo.

Estudos realizados por Nogueira, Coelho e Leão (2000) e Souza, Coelho e Paz (2007) mostram vantagens da irrigação por gotejamento subsuperficial sobre a superficial, apresentando uma variação de umidade no solo menor do que a superficial, sendo a água melhor distribuída verticalmente formando um bulbo de formato esférico, enquanto a superficial apresenta distribuição de maior incidência vertical dificultando a formação de uma faixa úmida.

Em se tratando de intrusão radicular, diversas alternativas de controle já foram sugeridas e testadas, principalmente em outras culturas. Ruskin e Ferguson (2011) apresentaram quatro soluções para tal problema: emissores dotados de barreiras mecânicas, adição do herbicida Trifluralina na água de irrigação, incorporação da Trifluralina no plástico do emissor ou a incorporação da Trifluralina no filtro de discos.

Além do entupimento de causas físicas, químicas e biológicas, o gotejamento subsuperficial apresenta outro problema, que é a redução da vazão dos gotejadores causada pela contrapressão da água no orifício formado ao redor

do ponto de descarga do emissor (GIL et al., 2011), sendo assim, uma das diferenças chave entre o gotejamento superficial e o subsuperficial é que, no último, a vazão pode ser afetada pelas propriedades do solo (GIL et al., 2008). A cavidade formada com a emissão de água pelos gotejadores enterrados pode ser visualizada na Figura 1 (GIL et al., 2010).

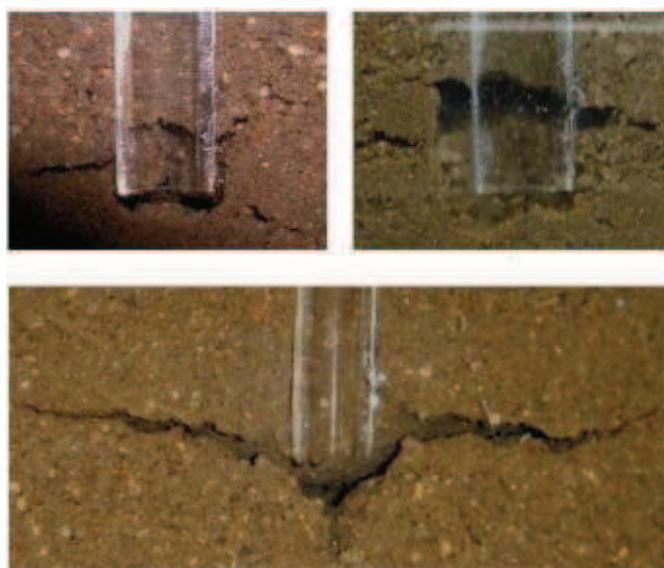


Figura 1 Cavidades desenvolvidas no solo ao redor de uma fonte pontual aplicando água subsuperficialmente

Fonte: Gil et al. (2010).

Shani et al. (1996) mediram a pressão da água em pontos separados de descarga dos emissores em condições de campo e encontraram valores de até 80 kPa de contrapressão, em diferentes modelos de emissores com diferentes vazões. Esses autores concluíram que a contrapressão aumenta em solos que possuem menor taxa de infiltração em comparação à taxa de aplicação de água do emissor. Neste caso, há menor diferença de pressão através do emissor e, conseqüentemente, a vazão do emissor cai em comparação ao emissor

descarregando na atmosfera. A redução de vazão é maior em solos com poros de menores diâmetros e proporcional à vazão nominal do emissor (GIL et al., 2008).

Philip (1992) estudou o movimento de água em um ponto fonte enterrado e verificou que, na maioria dos solos, uma região esférica de pressão positiva é formada ao redor da fonte. Philip desenvolveu então, uma função analítica para determinar a pressão no ponto de descarga em regime permanente de vazão. Shani et al. (1996) testou a aplicabilidade desta expressão sob condições variáveis de irrigação subsuperficial.

Para vazões moderadas, a pressão no ponto de descarga é linear e a vazão do emissor é uma linha reta e a inclinação depende do raio da cavidade esférica formada na periferia da fonte pontual, condutividade hidráulica do solo saturado e do parâmetro α do modelo de condutividade hidráulica do solo não saturado de Gardner (GIL et al., 2008).

Portanto, se há uma contrapressão h_s no ponto de descarga de um emissor enterrado, o gradiente hidráulico entre o interior do emissor e o solo irá decrescer.

Lazarovitch, Simunek e Shani (2005) obtiveram em condições de campo pela aplicação de água em dois emissores isolados, valores de contrapressão (h_s) de até 30 kPa, menor que os obtidos por Shani et al. (1996) com a mesma taxa de vazão do emissor e em solos similares.

Gil et al. (2007) estudaram a influência das propriedades do solo em testes laboratoriais com vasos contendo solos uniformes com mesma densidade. Seus resultados apresentaram valores de contrapressão menores que de outros autores em solos similares e com mesma vazão aplicada em condições de campo, já que nestas condições, a estrutura do solo aumenta a resistência mecânica à pressão da água.

Em seu trabalho, Lazarovitch et al. (2006) fizeram a simulação da variabilidade da vazão aplicada por uma lateral de gotejamento subsuperficial levando em consideração a variabilidade espacial das propriedades do solo. Seus resultados mostraram que o gotejamento subsuperficial pode ser menos uniforme que o gotejamento convencional.

Autores como Battam, Sutton e Boughton (2003) e Ben-Gal, Lazarovitch e Shani (2004) propuseram métodos para projeto de sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. Os autores propuseram um método *in situ* chamado de “covas do solo” para determinar a vazão máxima dos emissores para que não ocorresse o fenômeno da contrapressão.

Ben-Gal, Lazarovitch e Shani (2004) aplicaram água em uma cavidade preenchida por cascalho. A quantidade necessária de cascalho foi determinada pela área de contato entre a cavidade e o solo e é uma função da taxa de irrigação, do espaçamento entre emissores e propriedades hidráulicas do solo. Uma solução teórica, para o raio de uma cavidade preenchida com cascalho, baseada no perímetro da zona saturada de uma fonte linear de água no solo, demonstrou que cavidades maiores são necessárias à medida que diminui a condutividade hidráulica do solo. Este método foi testado usando o *software* HYDRUS-2D, desenvolvido por Simunek, Sejna e Genuchten (1999b). Combinações de propriedades do solo, taxa de vazão do emissor e tamanho da cavidade foram selecionadas com sucesso e caracterizadas por trincheiras de cascalho que não encheram completamente com água durante o evento de irrigação.

2.5 Descarga em orifícios

Segundo Porto (2006), orifício é uma abertura de perímetro fechado, de forma geométrica definida, podendo ser retangular, circular, triangular, entre

outros, realizado na parede ou fundo de um reservatório ou na parede de um canal ou conduto em pressão, pelo qual passa líquido em repouso ou em movimento escoado graças à energia potencial, energia cinética ou ambas. O escoamento pelo orifício pode ocorrer para um ambiente sob pressão atmosférica ou para uma região ocupada pelo mesmo líquido. No primeiro caso, a saída do líquido é denominada descarga livre e, no segundo caso, é chamada de descarga afogada ou por orifício submerso. Adicionalmente, de acordo com Fialho (2007), orifício é uma passagem restrita de uma linha hidráulica, utilizada para controlar o fluxo ou criar uma diferença de pressão.

Na Equação 1, é apresentada a expressão geral para a vazão descarregada através de um orifício de área A , de pequenas dimensões e parede fina, sujeito a uma carga h .

$$Q = C_d A (2 g h)^{0,5} \quad (1)$$

em que:

Q = Vazão que passa pelo bocal ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

C_d = Coeficiente de descarga hidráulico (adimensional);

A = Área do bocal (m^2);

g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); e

h = pressão de operação (kPa).

O coeficiente de descarga, C_d , é dado pelo produto do coeficiente de contração da veia líquida, C_c pelo coeficiente de redução de velocidade, C_v , e pode ser obtido pela relação entre a vazão real e a vazão teórica.

Os valores dos coeficientes de contração da veia líquida, redução de velocidade e descarga são levantados experimentalmente (TEIXEIRA; MELO; COELHO, 2007). Desde que a forma geométrica do orifício permita tratá-lo

como de canto vivo, e o escoamento local seja turbulento, a variável a limitar e/ou controlar a vazão ou pressão, pode ser descrita através da Equação 1 (LINSINGEN, 2003).

Ainda segundo Linsingen (2003), em determinadas situações, como em baixas temperaturas, pequena queda de pressão ou com pequenas aberturas do orifício, as forças viscosas podem prevalecer e o escoamento pode tornar-se laminar, assim, a Equação 1 deixa de ser válida. Na prática, costuma-se utilizar a Equação 1 para ambos os regimes de escoamento, e para orifícios de qualquer geometria, inclusive para resistências formadas por tubos curtos de pequeno diâmetro, utilizando-se um coeficiente de descarga C_d experimental adequado.

No caso de gotejadores, a Equação 1 pode ser reescrita para a forma apresentada na Equação 2:

$$Q_e = A C_d (2 g h)^x \quad (2)$$

Em que:

Q_e = vazão do emissor ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

x = expoente de descarga do emissor, adimensional.

Assim, pode ser definida uma constante de proporcionalidade (Equação 3):

$$k = A C_d (2 g)^x \quad (3)$$

Em que:

k = constante de proporcionalidade, que possui unidades específicas às unidades de pressão ou carga e vazão utilizadas.

Assim, a relação entre a descarga de água por um emissor, Q_e e a pressão de operação pode ser generalizada pela Equação 4.

$$Q_e = k (h^x) \quad (4)$$

O Cd varia entre 0,6 e 1,0 (KELLER; BLIESNER, 1990) e como o desenho hidráulico de gotejadores é variado, podem resultar em regimes de escoamento laminar, turbulento, de orifício ou compensadores de pressão. Essas classificações estão associadas à forma que o escoamento ocorre dentro do emissor e altera as características do coeficiente de descarga hidráulico de gotejadores bem como o expoente de descarga do emissor (CLARK et al., 2007).

Para o caso de orifícios afogados ou submersos, de acordo com Azevedo Netto et al. (1998), os resultados experimentais mostram que os coeficientes para os orifícios afogados são um pouco menores que os correspondentes à descarga livre, mas o erro cometido com o uso deste é pequeno.

2.6 Movimento de água em meios porosos na irrigação por gotejamento

O projeto e manejo da irrigação localizada, principalmente do gotejamento, requerem uma compreensão do padrão de distribuição da água e de soluto, os quais podem ser descritos e preditos por soluções das equações de fluxo que regem o fenômeno (BRISTOW et al., 2000).

As soluções analíticas da equação tridimensional de Richards têm sido derivadas para infiltração em regime permanente a partir de fontes pontuais enterradas e cavidades (PHILIP, 1968, 1984), a partir de fontes pontuais situadas na superfície do solo (RAATS, 1971) e a partir de áreas circulares com lâminas rasas de água situadas na superfície do solo (WOODING, 1968). Essas soluções

analíticas lidam com o fluxo em regime permanente radial, e descrevem bem as fases iniciais da infiltração e fornecem uma estimativa da umidade nas regiões em que passa a frente de molhamento (CLOTHIER; SCOTTER, 1982). Embora sejam de fácil implementação, estas soluções lidam principalmente com considerações de projeto da fonte gotejadora (COTE et al., 2003).

Para melhorar o manejo da irrigação, abordagens mais dinâmicas são necessárias. Soluções analíticas de infiltração radial em regime transiente têm sido desenvolvidas para pontos-fonte situados na superfície do solo (WARRICK, 1974), que foram depois testados com dados experimentais (REVOL et al., 1997), e para as fontes tipo faixa-edisco (WARRICK; LOMEN, 1976). Essas soluções mostraram com maior precisão as condições bastante dinâmicas associadas com a entrada de água em “pulsos” frequentemente usado em irrigação por gotejamento (COELHO; OR, 1997). No entanto, essas soluções são baseadas em suposições limitantes relativas à configuração da fonte, à linearização da equação de fluxo, propriedades hidráulicas do solo homogêneas (COTE et al., 2003). Assim, a sua aplicação no manejo da irrigação localizada é limitada. Soluções numéricas das equações de fluxo foram desenvolvidas para fontes pontuais superficiais, aumentando assim o leque de aplicação (BRESLER et al., 1971), e incluindo o transporte de solutos (BRESLER, 1975). As limitações dessas soluções surgem a partir do tratamento impreciso das condições de contorno de superfície (LAFOLIE; GUENNELON; GENUCHTEN, 1989).

Segundo Cote et al. (2003), as análises teóricas só podem produzir diretrizes de projeto e manejo de irrigação quando se aproximam do sistema e os processos reais avaliados. Um progresso considerável foi feito na compreensão conceitual e descrição matemática do fluxo de água, transporte de solutos e absorção de água pelos sistemas radiculares em irrigação localizada. Este conhecimento foi integrado em pacotes de *software* diferentes, como o HYDRUS2D/3D, que simula o fluxo de água tridimensional simétrico

axialmente, transporte de solutos e absorção de água e nutrientes pelas raízes com base em soluções numéricas como o uso da técnica de elementos finitos e equações de fluxo (SIMUNEK; SEJNA; GENUCHTEN, 1999a), oriundas da equação de Richards. O HYDRUS permite a implementação de uma vasta gama de condições de contorno, limites irregulares e heterogeneidades do solo. O pacote é suportado por uma interface gráfica interativa com base em dados para o pré-processamento, geração da malha de cálculo, apresentação de resultados em gráficos, sendo, portanto, razoavelmente fácil de usar. Com esses atributos, o HYDRUS é uma boa ferramenta para analisar as características de projeto e gestão de sistemas de irrigação localizada, superficial e subsuperficial (COTE et al., 2003).

O programa HYDRUS-2D foi verificado por Patel e Rajput (2008) e Skaggs et al. (2004) comparando-se teores de água medidos e simulados durante a irrigação utilizando um ponto fonte enterrado. Nesses trabalhos, a previsão da distribuição do conteúdo de água ajustou-se bem com as observações experimentais, por isso, o programa é recomendado como uma ferramenta útil para pesquisa e projeto de sistemas de gotejamento subsuperficial (GIL et al., 2011).

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. E. P. Manejo da irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 17-24, 2010.

AZEVEDO NETO, J. M. et al. **Manual de hidráulica**. 8.ed.São Paulo: E. Blucher, 1998. 650 p.

BATTAM, M. A.; SUTTON, B. G.; BOUGHTON, D. G. Soil pits as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems. **Irrigation Science**, New York, v.22, n.3/4, p.135-141, 2003.

BEN-GAL, A.; LAZAROVITCH, N. **Beyond burying the lateral**: current issues in and future opportunities for subsurface drip irrigation. Disponível em: <http://mop.ardom.co.il/data/reports/Subsurface_drip_irrigation_2003.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2012.

BEN-GAL, A.; LAZOROVITCH, N.; SHANI, U. Subsurface drip irrigation in gravel filled cavities. **Vadose Zone Journal**, Austin, v.3, n. 4, p.1407-1413, Nov. 2004.

BENÍCIO, F. R. et al. Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão na cultura da goiaba em Barbalha, CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 3, n. 2, p. 55-61, 2009.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BOMAN, B. J. Microsprinkler irrigation. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.). **Microirrigation for crop production**: design, operation, and management. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 515-606.

BRESLER, E. Two-dimensional transport of solutes during nonsteady infiltration from a trickle source. **Soil Science Society of America Proceedings**, Fayetteville, v. 39, p.604-613, 1975.

BRESLER, E. et al. Infiltration from a trickle source: II., experimental data and theoretical predictions. **Soil Science Society of America Proceedings**, Fayetteville, v.35, p.683-689, 1971.

BRISTOW, K. L. et al. Soil wetting and solute transport in trickle irrigation systems. In: INTERNATIONAL MICRO-IRRIGATION CONFERENCE, 6., 2000, Cape Town. **Proceedings...**Cape Town: Micro, 2000. 1 CD-ROM.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia:** goteo, microaspersión, exudación. 3.ed. Madrid: Mundi, 1996. 513 p.

CAMP, C. R. Subsurface drip irrigation: a review. **Transactions of ASAE**, Saint Joseph, v.41, n.5, p.1353-1376, 1998.

CARARO, D. C.; BOTREL, T. A. Uso de cloração e ar comprimido no controle de entupimento de gotejadores ocasionado pela aplicação de água residuária. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p. 336-345, 2007.

CLARK, G. A. et al. General system design principles. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.). **Microirrigation for crop production:** design, operation and management. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 161-220.

CLOTHIER, B. E.; SCOTTER, D. R. Constant-flux infiltration from a hemispherical cavity. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v.46, p.696-700, 1982.

COELHO, F. E.; OR, D. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v.61, n. 5, p.1331-1341, Sept. 1997.

COSTA, E. L. et al. Métodos e sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 7-16, 2010.

COTE, C. M. et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. **Irrigation Science**, New York, v.22, n. 3/4, p.143-156, 2003.

DASBERG, S.; BRESLER, E. **Drip irrigation manual**. Bet Dagan: International Irrigation Information Center, 1985. 95p. (Publication, 9).

DASBERG, S.; OR, D. **Drip irrigation**. Berlin: Springer, 1999.162p.

FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicação e análises**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007. 280 p.

GIL, M. et al. Efecto del suelo em el caudal del gotero em riego subsuperficial: determinación de caudales máximos. In: CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS, 1., 2007, Pamplona. **Anales...** Pamplona: Asociación Española de Riegos y Drenajes, 2007.p. 221-231.

GIL, M. et al. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, New York, v.26, n. 6, p.451-458, Sept. 2008.

GIL, M. et al. Evolution of the spherical cavity radius generated around a subsurface drip emitter. **Biogeosciences**, Orono, v. 7, n. 6, p.1935-1958, June 2010.

GIL, M. et al. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 137, n. 5, p. 287-294, 2011.

GOMES, E. P. et al. Avaliação da uniformidade de irrigação por gotejamento na cultura do tomate de mesa. In: WORKSHOP TOMATE NA UNICAMP, 1., 2003, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2003.p. 1-4.

GOMES, E. P. et al. Avaliação de um sistema de irrigação por gotejamento através de dois critérios matemáticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFC, 2000. 1 CD-ROM.

GONZAGA NETO, L. Produtividade e competitividade dependem do aumento de hectares irrigados. **Revista dos Agrônomos**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 14-20, 2000.

GRUBER, Y. B. G. **Otimização da lâmina de irrigação na produção de mudas clonais de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* var. *plathyphylla*)**. 2006. 145 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2006.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: V. N. Reinhold, 1990. 652 p.

LAFOLIE, F.; GUENNELON, R.; GENUCHTEN, M. T. H. van. Analysis of water and flow under trickle irrigation: I., theory and numerical solution. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v.53, p.1310-1318, 1989.

LAMM, F. R. et al. **Twenty years of progress with SDI in Kansas**. Saint Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. 23 p. (ASABE Paper, 95923). Disponível em: <<http://www.ksre.ksu.edu/sdi/Reports/2009/FRL20Yr09.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2012.

LAZAROVITCH, N. et al. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.132, n. 6, p.531-536, Nov./Dec. 2006.

LAZAROVITCH, N.; SIMUNEK, J.; SHANI, U. System-dependent boundary conditions for water flow from a subsurface source. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v.69, n.1, p.46-50, Jan. 2005.

LIMA, L. A. et al. Automação em irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 71-79, 2010.

LINSINGEN, I. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2003. 399 p.

MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M. Manejo de Irrigação. In: COSTA, E. F.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. (Ed.). **Quimigação**: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. p.129-158.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Profundidade de instalação da linha de gotejadores em tomateiro para processamento industrial. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.20, n.2, p. 206-210, jun. 2002.

NEVES, W. S. et al. Importância do manejo da irrigação sobre a ocorrência de doenças de plantas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 249, p. 110-115, 2010.

NOGUEIRA, C. C. P.; COELHO, E. F.; LEÃO, M. C. S. Características e dimensionais do volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.315-320, 2000.

PATEL, N.; RAJPUT, T. B. S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95, n.12, p.1335-1349, 2008.

PHILIP, J. R. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. **Water Resources Research**, Washington, v.4, p. 1039-1047, 1968.

PHILIP, J. R. Travel times from buried and surface infiltration point sources. **Water Resources Research**, Washington, v.20, p.990-994, 1984.

PHILIP, J. R. What happens near a quasi-linear point source? **Water Resources Research**, Washington, v.28, n. 1, p.47-52, Jan. 1992.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: USP, 2006. 540 p.

RAATS, P. A. C. Steady infiltration from point sources, cavities, and basins. **Soil Science Society of America Proceedings**, Fayetteville, v.35, p.689-694, 1971.

REVOL, P. et al. Infiltration from a surface point source and drip irrigation2:an approximate time-dependent solution for wet-front position. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 8, p. 1869-1874, Aug.1997.

RIBEIRO, T. A. P. et al. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.450-456, 2005.

RUSKIN, R.; FERGUNSON, K. R. **Protection of subsurface drip irrigation systems from root intrusion**. Disponível em:
<<http://www.geoflow.com/protection.html>>. Acesso em: 16 jan. 2012.

SCALOPPI, E. D. Características dos principais sistemas de irrigação. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 25, p. 22-27, 1986.

SHANI, U. et al. Soil limiting from subsurface emitters: I., pressure measurements. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.122, n. 5, p.291-295, Oct. 1996.

SHANI, U.; OR, D. In situ method for estimating subsurface unsaturated hydraulic conductivity. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, n.8, p.1863-1870, 1995.

SILVA, A. L.; FARIA, M. A.; REIS, R. P. Viabilidade técnico-econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.37-44, 2003.

SILVA, C. A.; SILVA, C. J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, v. 4, n. 8, p. 1-17, 2005.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; GENUCHTEN, M. T. van. **HYDRUS-2D/MESHGEN-2D**: simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Golden: International Groundwater Modeling Centre, 1999a.229 p.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; GENUCHTEN, M. T. van. **The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and solute transport in variably-saturated media**. Version 2.0. Prague: PC Progress, 1999b.251 p.

SKAGGS, T. H. et al. 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.

SOUZA, E. A.; COELHO, E.D.; PAZ, V. P. da S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.4, p.1161-1166, jul./ago. 2007.

TEIXEIRA, M. B.; MELO, R. F.; COELHO, R. D. Coeficiente de descarga de emissores de pivô central. **Irriga**, Botucatu, v.12, n.1, p.123-134, 2007.

TROOEN, T. P.; HILLS, D. J.; LAMM, F. R. Drip irrigation with biological effluent. In: IRRIGATION ASSOCIATION INTERNATIONAL IRRIGATION TECHNICAL CONFERENCE, 1., 2002, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: Irrigation Association, 2002. p. 24-26.

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

WARRICK, A. W.; LOMEN, D. O. Time-dependent linearized infiltration: III., strip and disc sources. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v.40, p.639-643, 1976.

WOODING, R. A. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water Resources Research**, Washington, v.4, p.1259-1273, 1968.

**CAPÍTULO 2 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em
gotejamento subsuperficial, parte I: relação vazão-pressão**

RESUMO

Para o projeto e manejo da irrigação por gotejamento, é necessário o conhecimento da relação entre vazão e pressão atuante sobre os emissores. Porém, a atuação da contrapressão, no caso do gotejamento subsuperficial, pode alterar as características hidráulicas dos emissores. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar a relação entre a vazão e a pressão de diferentes gotejadores em condições superficiais e subsuperficiais e as possíveis diferenças no comportamento hidráulico dos emissores nessas duas condições. Foram utilizados nos ensaios quatro emissores: dois autocompensantes (D5000 e Hydro PCND) e dois não autocompensantes (TalDrip e Jardiline). A vazão dos emissores foi obtida em condição atmosférica e submersa em água, onde os níveis de submersão representaram a contrapressão. Os ensaios foram realizados utilizando as pressões de entrada de 80, 100, 120 e 150 kPa para o tubo gotejador Hydro PCND e 25, 50, 100 e 150 kPa, para os demais, e contrapressões de 0,49, 1,47, 2,45, 4,41 e 6,37 kPa, com quatro repetições. Os emissores tiveram suas constantes de proporcionalidade e expoentes de descarga alterados em aplicação submersa em água, representando o efeito da contrapressão. Emissores não autocompensantes tiveram seu expoente de descarga diminuído enquanto que nos autocompensantes, este aumentou.

Palavras-chave: Expoente de descarga. Constante de proporcionalidade. Irrigação localizada

ABSTRACT

For the design and management of drip irrigation, it is necessary the knowledge of the relationship between flow and pressure acting on emitters. However, the backpressure phenomenon, in the case of subsurface drip irrigation, may change the emitter's hydraulic characteristics. Thus, the objective of this study was to determine the relationship between flow and pressure of different driplines, in surface and subsurface conditions and to find possible differences in the hydraulic behavior of these emitters on both conditions. Four emitters were tested: two pressure compensating (D5000 and Hydro PCND) and two non-pressure compensating (TalDrip and Jardiline). The emitter's flow rate were obtained in atmospheric conditions and submerged in water, where submergence levels represented backpressure. Assays were performed using the inlet pressure of 80, 100, 120, and 150 kPa for Hydro PCND dripline and 25, 50, 100, and 150 kPa for the other ones, and backpressures of 0.49, 1.47, 2.45, 4.41 and 6.37 kPa, with four replications. The emitters had their proportionality constants and discharge exponents changed applying submerged in water, representing the effect of backpressure. Non-pressure compensating emitters had their discharge exponent decreased while in pressure compensating, it increased.

Keywords: Discharge exponent. Proportionality constant. Trickle irrigation.

1 INTRODUÇÃO

A relação vazão-pressão, a perda de carga ao longo da linha lateral e no emissor e o percurso da água no mesmo, constituem as características hidráulicas que influenciam diretamente no desempenho de sistemas de microirrigação. Essas características variam de acordo com o tipo de emissor, do material, do processo de fabricação e da forma de conexão do emissor na linha (FRIZZONE et al., 1998).

Além disso, ainda na fase de projeto, é essencial para o dimensionamento da irrigação localizada que haja informações referentes à vazão dos emissores e ao seu regime de fluxo (NAKAYAMA; BUCKS, 1981). Estas informações são obtidas por meio do coeficiente de variação de fabricação e da equação característica do emissor (relação pressão-vazão) (CABELLO, 1996).

O sistema de irrigação por gotejamento superficial é o mais utilizado entre os sistemas por gotejamento, porém, o gotejamento subsuperficial vem se tornando um método comum de irrigação na agricultura e paisagismo, provendo água e nutrientes às plantas enquanto mantém a superfície do solo seca (BENGAL; LAZAROVITCH; SHANI, 2004), além de propiciar um aumento na eficiência de irrigação e no uso de água, maior durabilidade dos materiais e a redução da área de evaporação de água a partir da superfície do solo.

Em contrapartida, o gotejamento subsuperficial pode sofrer com o fenômeno da contrapressão, que reduz a vazão dos gotejadores. Essa contrapressão da água no orifício formado ao redor do ponto de descarga do emissor (GIL et al., 2011) ocorre quando a intensidade de aplicação do emissor supera a infiltrabilidade do solo.

Sendo assim, uma das diferenças chave entre o gotejamento superficial e o subsuperficial é que o no último a vazão pode ser afetada pelas propriedades do solo (GIL et al., 2008).

Nesse ponto, percebe-se que a contrapressão pode alterar as características hidráulicas dos emissores em gotejamento subsuperficial, assim, o objetivo deste trabalho foi determinar a relação entre a vazão e a pressão de quatro gotejadores em condições superficiais e subsuperficiais e as possíveis diferenças no comportamento hidráulico dos emissores nessas duas condições.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Hidráulica, pertencente ao Núcleo Didático-Científico de Engenharia de Água e Solo do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Os modelos de tubos gotejadores utilizados foram:

- a) NaanDanJain TalDrip, vazão nominal de $1,7 \text{ L h}^{-1}$, diâmetro nominal de $0,017 \text{ m}$ e diâmetro interno de $0,0158 \text{ m}$, espaçamento de $0,30 \text{ m}$ entre emissores;
- b) NaanDanJain JardimLine, vazão nominal de $3,6 \text{ L h}^{-1}$, pressão máxima de operação de 350 kPa bar e espaçamento entre emissores de $0,33 \text{ m}$, diâmetro nominal de 16 mm e diâmetro interno de $13,9 \text{ mm}$;
- c) John Deere Water D5000, autocompensante, vazão nominal de $2,0 \text{ L h}^{-1}$, diâmetro nominal de $0,016 \text{ m}$ e diâmetro interno de $0,0138 \text{ m}$, espaçamento entre emissores de $0,75 \text{ m}$ e faixa de operação entre 50 e 350 kPa ;
- d) John Deere Water Hydro PCND, autocompensante e antidrenante, vazão nominal de $2,35 \text{ L h}^{-1}$, diâmetro nominal de $0,016 \text{ m}$, diâmetro interno de $0,0153 \text{ m}$ e espaçamento entre emissores de $0,65 \text{ m}$, faixa de operação entre 75 e 350 kPa .

Para a realização dos ensaios, foi montado o aparato mostrado na Figura 1, constituído de um compressor (1) anexado a um frasco de Mariotte (2) construído com tubulação de PVC de diâmetro nominal de 150 mm . A pressão de entrada no frasco foi monitorada por meio de um conjunto distribuidor de ar pressurizado (3) fabricado pela Soilmoisture Equipment Corporation. A pressão de entrada nos emissores foi controlada por um manômetro digital (4). A vazão

dos gotejadores foi medida pela taxa de queda do nível da água dentro do frasco de Mariotte, observado em uma mangueira transparente anexada ao corpo deste.

As linhas de gotejadores foram colocadas dentro de um reservatório em fibra de vidro de 2.000 L (5), anexadas em uma estrutura metálica (6). As linhas eram controladas por válvulas na conexão de início de linha.

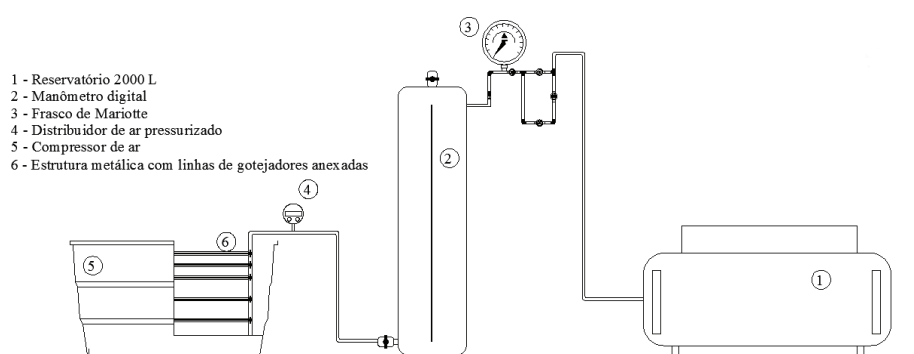


Figura 1 Aparato montado para a avaliação da vazão dos segmentos de tubos gotejadores.

Foram realizados testes com pressões (h_0) crescentes de 25, 50, 100 e 150 kPa para os tubos gotejadores TalDrip, JardimLine e D5000 e 80, 100, 120 e 150 kPa para o tubo gotejador Hydro PCND, sendo avaliados 12 emissores e quatro repetições para cada pressão. Com os pares de valores de vazão média por emissor e pressão, foi obtida a equação característica do emissor (Equação 1), que descreve a relação potencial entre a pressão e a descarga em orifícios (KELLER; KARMELI, 1975).

$$Q_{superficial} = kh_0^x \quad (1)$$

em que:

$Q_{superficial}$ = vazão do emissor, L h⁻¹;

k = constante de proporcionalidade, que caracteriza cada emissor, $L h^{-1} kPa^{-x}$;

h_0 = pressão hidráulica à entrada de água no emissor, kPa; e

x = expoente de descarga do emissor, que caracteriza o regime de fluxo, adimensional.

A constante de proporcionalidade pode ser definida como (Equação 2):

$$k = A C_d (2g)^x (2)$$

em que:

A = área da seção transversal em que ocorre a descarga, m^2 ;

C_d = coeficiente de descarga hidráulica, adimensional;

g = aceleração da gravidade, $m s^{-2}$.

Para a avaliação da vazão dos gotejadores submersos em água, foi utilizado o mesmo aparato da Figura 1, porém, os gotejadores foram submersos em água no interior do um reservatório. A estrutura metálica (Figura 2A) auxiliou para que se mantivesse a mesma profundidade de toda a linha de gotejadores. O reservatório era munido de quatro extravasores para que o nível da água permanecesse constante, mesmo com a descarga dos emissores.

Os gotejadores foram submersos nas profundidades de 0,05; 0,15; 0,25; 0,45 e 0,65 m, correspondentes a 0,49; 1,47; 2,45; 4,41 e 6,37 kPa de contrapressão (h_s) aplicada. A linha de gotejadores na profundidade a ser ensaiada foi controlada por meio de conectores iniciais para tubo gotejadores com válvula acoplada (Figura 2B).

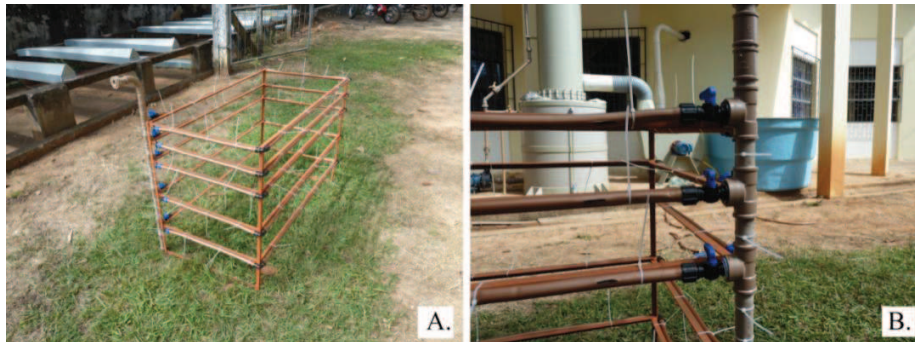


Figura 2 Estrutura metálica utilizada para manter os gotejadores na profundidade de ensaio (A) e detalhe do conector inicial com válvula utilizado para controle das linhas

As pressões de entrada utilizadas também foram de 80, 100, 120 e 150 kPa para o tubo gotejador Hydro PCND e25, 50, 100 e 150 kPa para os demais, sendo realizadas quatro repetições. Os dados foram ajustados à equação de descarga de gotejadores submetidos à contrapressão (Equação 3).

$$Q_{\text{submersa}} = k_{\text{subsuperficial}} (h_0 - h_s)^{x_{\text{subsuperficial}}} \quad (3)$$

em que:

Q_{submersa} = vazão média do emissor submerso, $L h^{-1}$;

h_s = contrapressão causada pelo nível de submersão, kPa;

$k_{\text{subsuperficial}}$ = constante de proporcionalidade subsuperficial, $L h^{-1} kPa^{-x}$, e

$x_{\text{subsuperficial}}$ = expoente de descarga subsuperficial, adimensional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados de vazão e pressão e empregando a análise de regressão, foram determinadas as equações vazão-pressão dos quatro emissores avaliados. A equação vazão-pressão do tubo gotejador TalDrip em aplicação superficial é mostrada no Gráfico 1.

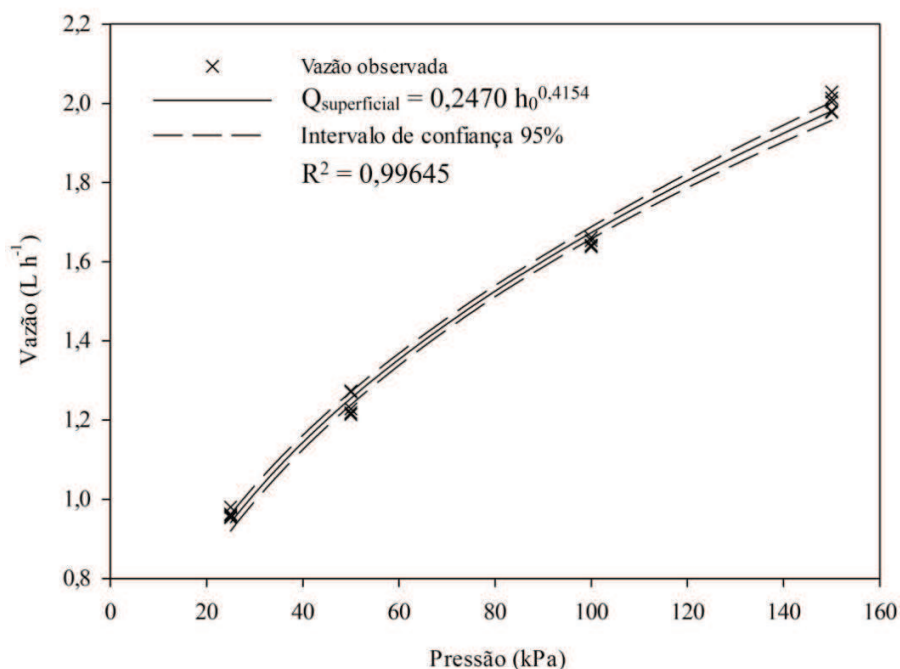


Gráfico 1 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador TalDrip em aplicação superficial

O coeficiente de determinação do modelo vazão-pressão ajustado para o emissor TalDrip foi 99,64%, com constante de proporcionalidade (k) de 0,247L h⁻¹ kPa^{-x} e o expoente de descarga de 0,4154, ambos diferentes aos informados pelo fabricante em catálogo (0,555 e 0,460, respectivamente). O valor do

expoente de descarga obtido o classifica como de fluxo turbulento conforme Keller e Bliesner (1990).

Os valores de vazão média do emissor TalDrip, obtidos para cada pressão e contrapressão aplicadas, estão apresentados no Gráfico 2.

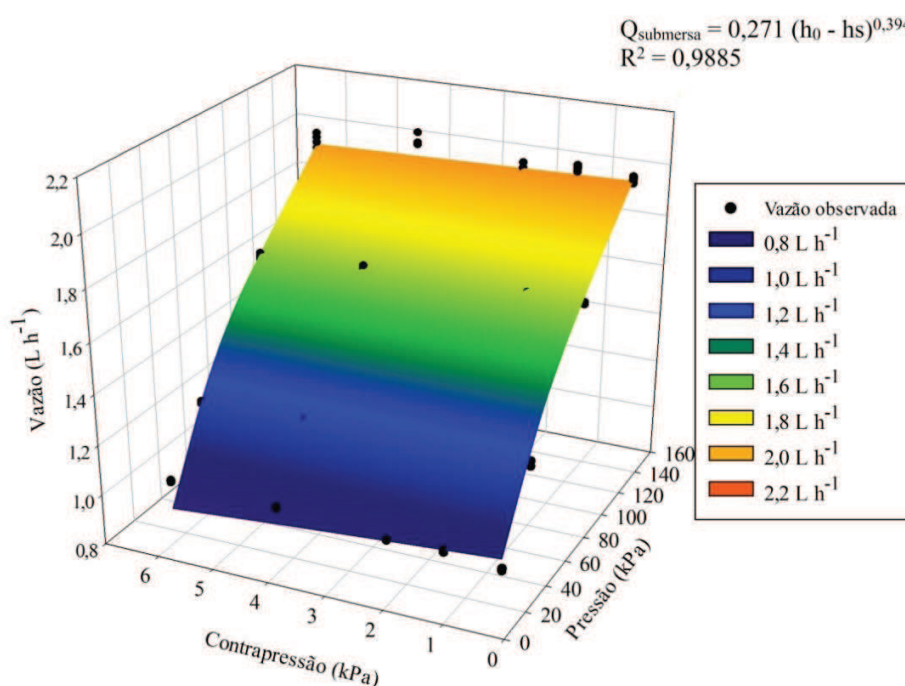


Gráfico 2 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador TalDrip em aplicação submersa

Com a presença da contrapressão atuante sobre o ponto de saída da água dos emissores superior à pressão atmosférica, tanto a constante de proporcionalidade quanto o expoente de descarga do emissor TalDrip foram alterados (“k” de $0,247 \text{ L h}^{-1} \text{ kPa}^{-x}$ para $0,271 \text{ L h}^{-1} \text{ kPa}^{-x}$ e “x” de 0,4154 para 0,394). O coeficiente de determinação dos dados observados em relação ao modelo foi 98,85%, mostrando boa aderência do modelo aos dados.

Segundo Cabello (1996), um emissor autocompensante apresenta o expoente da equação característica da vazão em função da pressão variando entre 0 a 0,4, informação que, para o caso do emissor TalDrip em aplicação submersa (Gráfico 2), não pode ser considerada, pois nota-se que há um aumento considerável da vazão com o incremento da pressão e menores vazões, quando há maiores contrapressões.

No Gráfico 3, pode-se observar a correlação entre as vazões médias superficiais e as submersas observadas, formadas pelos pares pressão–contrapressão. O coeficiente da correlação foi 0,9805, positivo e inferior a um, o que denota uma vazão submersa inferior à superficial.

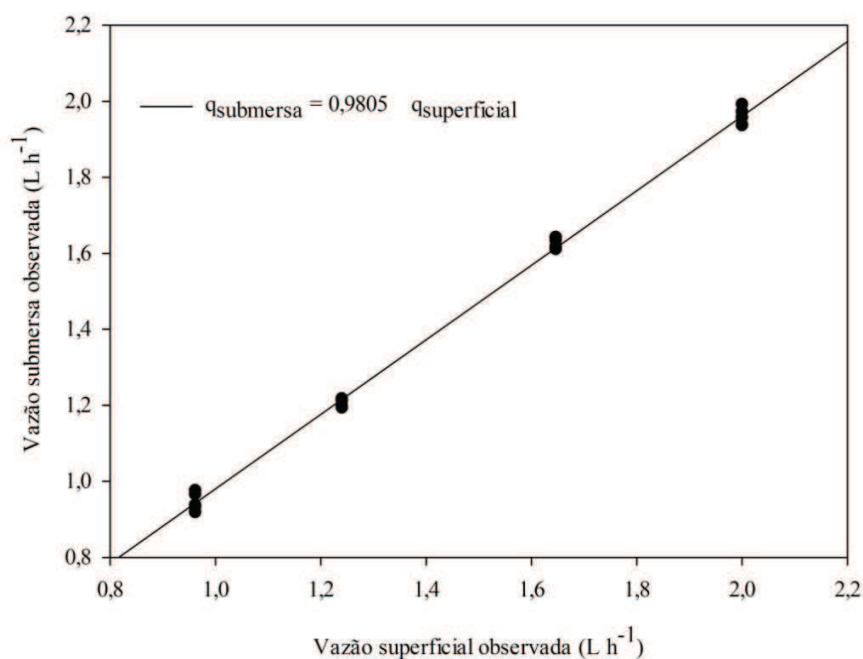


Gráfico 3 Correlação entre as vazões superficial submersa observada para o tubo gotejador TalDrip

Após análise de regressão, obtiveram-se os parâmetros da relação vazão-pressão do emissor JardimLine, sendo o modelo apresentado no Gráfico 4.

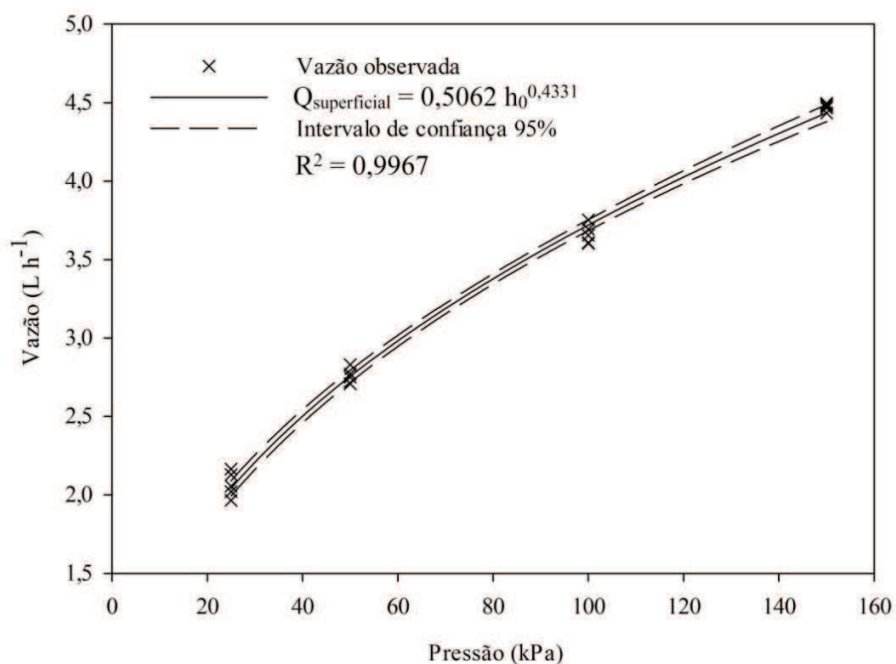


Gráfico 4 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador JardimLine em aplicação superficial

O coeficiente de determinação obtido na análise foi 99,67% e o emissor apresentou como valores dos parâmetros da equação de vazão-pressão $0,5062 \text{ L h}^{-1} \text{ kPa}^{-x}$ para “k” e um expoente de descarga de 0,4331. O valor do coeficiente de proporcionalidade obtido foi diferente do fornecido pelo fabricante (1,192). O expoente de descarga obtido também foi diferente do informado pelo fabricante, 0,48, porém os valores foram mais semelhantes do que na comparação entre os valores do coeficiente de descarga. Assim como no caso do emissor TalDrip, o regime de escoamento deste emissor também pode ser classificado como turbulento (KELLER; BLIESNER, 1990).

A representação da equação vazão-pressão/contrapressão do emissor JardimLine é apresentada no Gráfico 5.

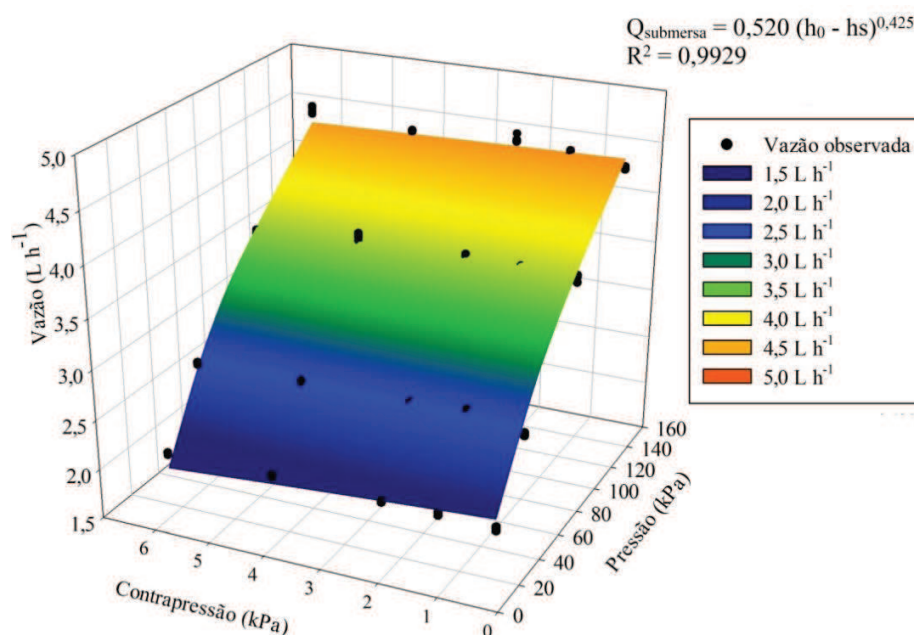


Gráfico 5 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador JardimLine em aplicação submersa

Assim como ocorreu com o emissor TalDrip, com o emissor JardimLine operando submerso em água, a constante de proporcionalidade foi maior e o expoente de descarga foi menor que os obtidos na aplicação superficial. O expoente de descarga ainda caracteriza o regime de escoamento no emissor como turbulento, sendo o R^2 obtido no ajuste do modelo 99,29%.

O coeficiente de correlação entre a vazão superficial observada e a vazão submersa observada (Gráfico 6) para o tubo gotejador JardimLine foi $0,9744 \text{ L h}^{-1} \text{ kPa}^{-x}$, menor que o apresentado para o emissor TalDrip o que denota

uma maior redução na vazão deste emissor quando encontra submerso, em relação ao emissor TalDrip.

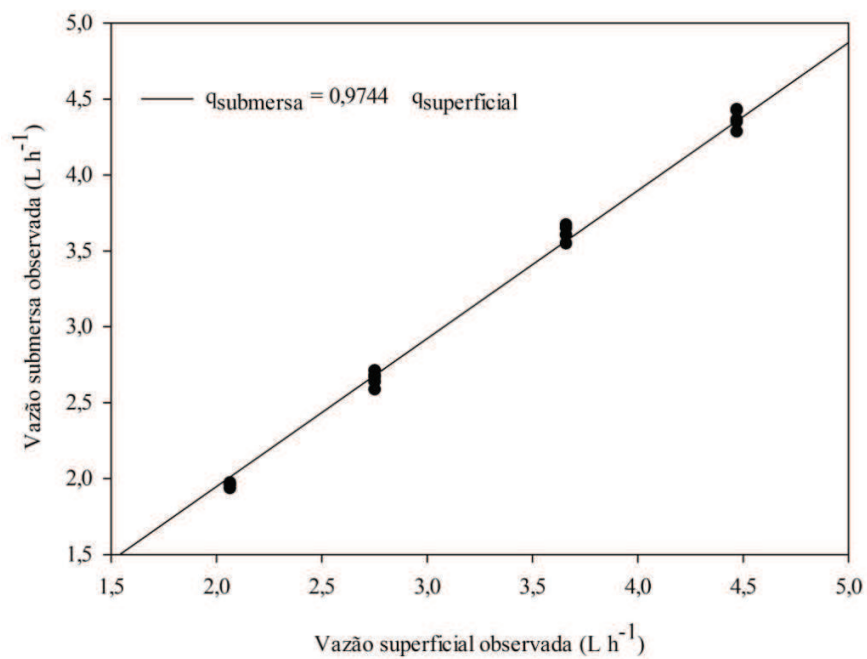


Gráfico 6 Correlação entre a vazão superficial e a submersa observada para o tubo gotejador JardimLine

O comportamento da vazão do gotejador D5000 em função da pressão de serviço está apresentado no Gráfico 7.

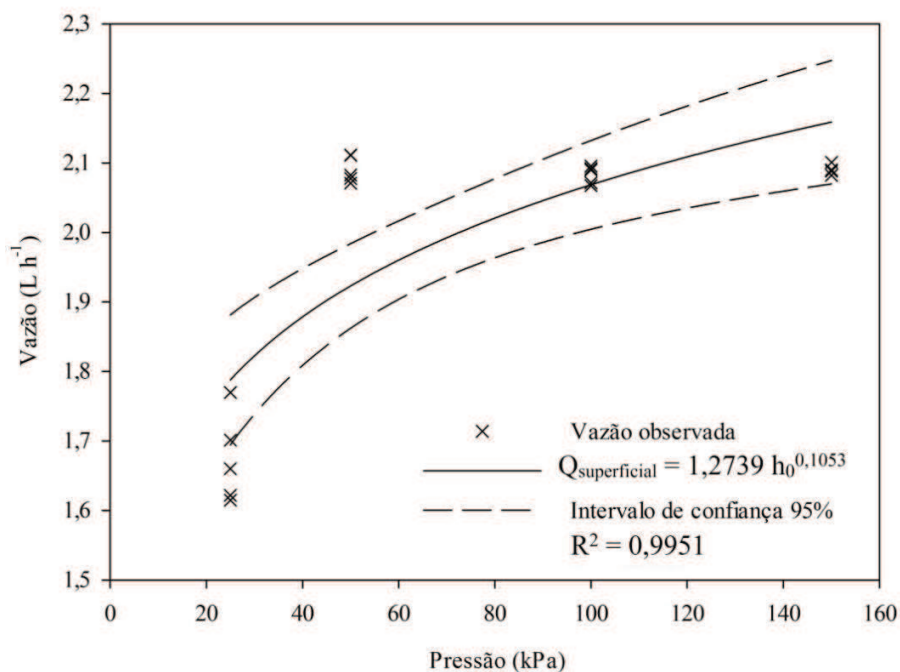


Gráfico 7 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador D5000 em aplicação superficial

Mesmo possuindo um coeficiente de determinação alto, 99,51%, percebe-se ao analisar o Gráfico 7 que a relação vazão-pressão em emissores autocompensantes não seria bem representada pelo modelo potencial proposto por Keller e Karmeli (1975) se o emissor for ensaiado em pressões fora da faixa de compensação e se para essas pressões, as vazões forem muito menores que as vazões que ocorreriam na faixa de compensação.

Thebaldi et al. (2014) ao avaliarem a relação vazão-pressão do emissor autocompensante XFS Subsurface Dripline, da Rain Bird encontraram um coeficiente de determinação de 60,79%, tal fato é explicado em função do aumento acentuado da vazão a partir do início da faixa de autocompensação e a

consequente tendência à manutenção deste comportamento, que não se ajusta bem a um modelo potencial.

Segundo informa o fabricante, a faixa de trabalho de autocompensação do emissor inicia em 50 kPa, o que pode ser constatado no Gráfico 7, pela tendência à manutenção da vazão a partir desta pressão.

Os valores da constante de proporcionalidade (k) e do expoente de descarga (x) foram $1,2739 \text{ L h}^{-1} \text{ kPa}^{-x}$ e $0,1053$, respectivamente. Esse valor obtido de x , muito próximo de zero, confirma que o emissor é autocompensante (CABELLO, 1996; KELLER; BLIESNER, 1990).

O comportamento da curva de vazão-pressão/contrapressão do emissor D5000 em aplicação submersa é apresentado no Gráfico 8.

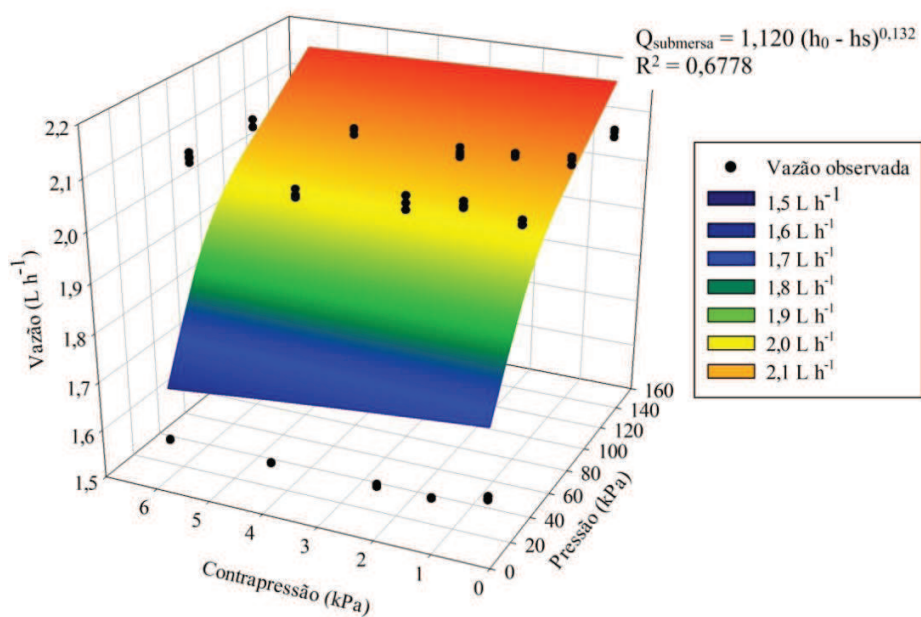


Gráfico 8 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador D5000 em aplicação submersa

Diferentemente do ocorrido para a curva de desempenho para a aplicação superficial da água, o coeficiente de determinação do modelo vazão–pressão do emissor D5000 em aplicação submersa foi baixo (67,78%). Percebe-se, pela análise do Gráfico 8, que os pontos de vazão observados só aderem bem ao modelo para pressão de entrada de 100 kPa, qualquer que seja a contrapressão. Adicionalmente, houve um aumento no expoente de descarga no emissor quando submerso, de 0,1053 para 0,132, mostrando assim, redução no efeito compensante da vazão com a variação da pressão de entrada.

A correlação entre a vazão superficial e a vazão submersa observada para o emissor D5000 é apresentada no Gráfico 9.

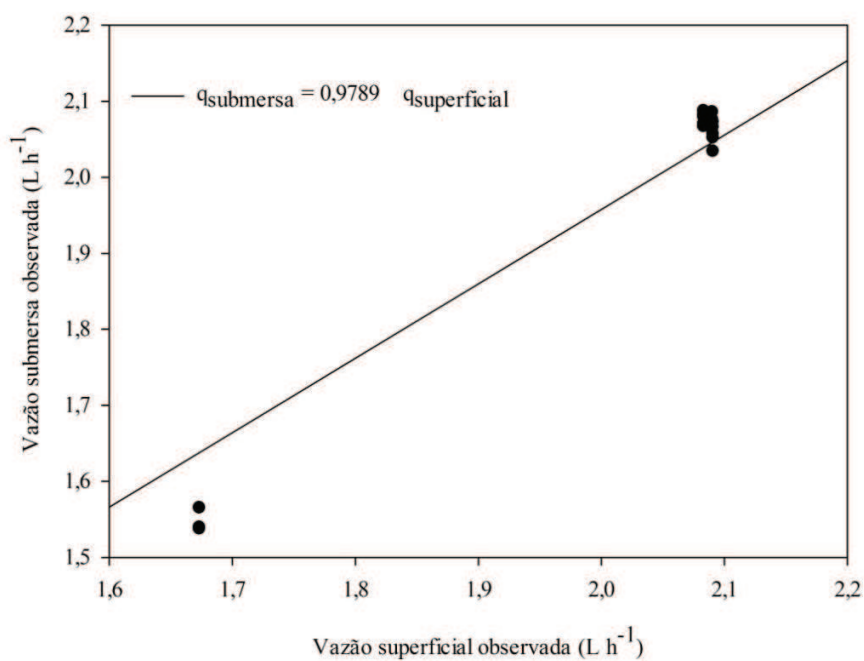


Gráfico 9 Correlação entre a vazão superficial e a submersa observada para o tubo gotejador D5000

Ao analisar o Gráfico 9, nota-se que a maioria dos pares de dados se encontra concentrada na parte superior direita do gráfico. Esse comportamento deve-se ao fato do emissor apresentar faixa de autocompensação a partir de 50 kPa. Os pares observados na área inferior esquerda correspondem à pressão de trabalho de 25 kPa, o que gerou vazões não compensadas. Percebe-se também que estes pares de vazões à pressão de entrada de 25 kPa encontram-se todos abaixo da reta de coeficiente angular 0,9786, mostrando maior influência da contrapressão sobre a redução da vazão, quando o emissor se encontra fora da faixa de autocompensação.

O modelo do comportamento da vazão em função da pressão do emissor Hydro PCND é apresentado no Gráfico 10.

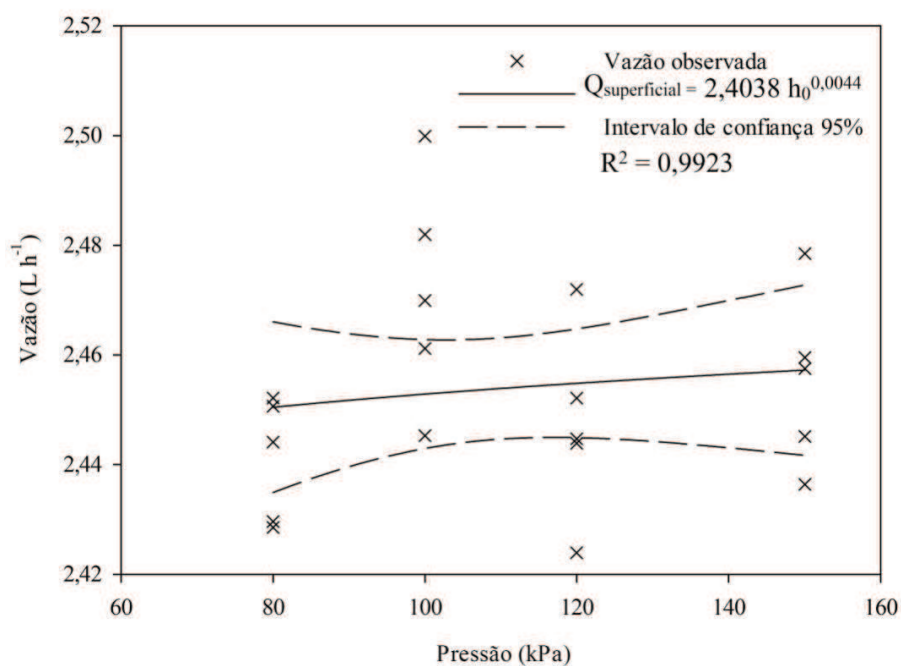


Gráfico 10 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador Hydro PCND em aplicação superficial

O expoente de descarga e a constante de proporcionalidade deste emissor em aplicação superficial foram 0,0044 e $2,4038L h^{-1} kPa^{-x}$, respectivamente e nota-se um bom ajuste do modelo potencial de vazão-pressão devido ao valor do coeficiente de determinação (R^2) ser 99,23%.

Isso ocorreu, pois neste modelo, não foram ensaiadas pressões fora da faixa de autocompensação. Este comportamento também ocorreria se as vazões dentro da faixa de compensação não fossem muito diferentes das vazões compensadas, como verificado por Almeida, Sampaio e Suszek (2006) para o gotejador HPC fabricado pela Bowsmith, autocompensante, com constante de proporcionalidade de 0,0974 e coeficiente de determinação entre dados observados e modelo de 89,02%. Prado, Nunes e Tinos (2014), para contornar este problema, realizaram o ajuste da equação vazão-pressão de um gotejador autocompensante (marca e modelo não informados) apenas na faixa de autocompensação, como realizado para o gotejador Hydro PCND.

Pela análise do expoente de descarga “x”, pode-se inferir maior capacidade autocompensante do emissor Hydro PCND em relação ao emissor D5000, pelo menor expoente, sendo este mais próximo de zero.

A relação vazão-pressão/contrapressão do gotejador Hydro PCND pode ser vista no Gráfico 11.

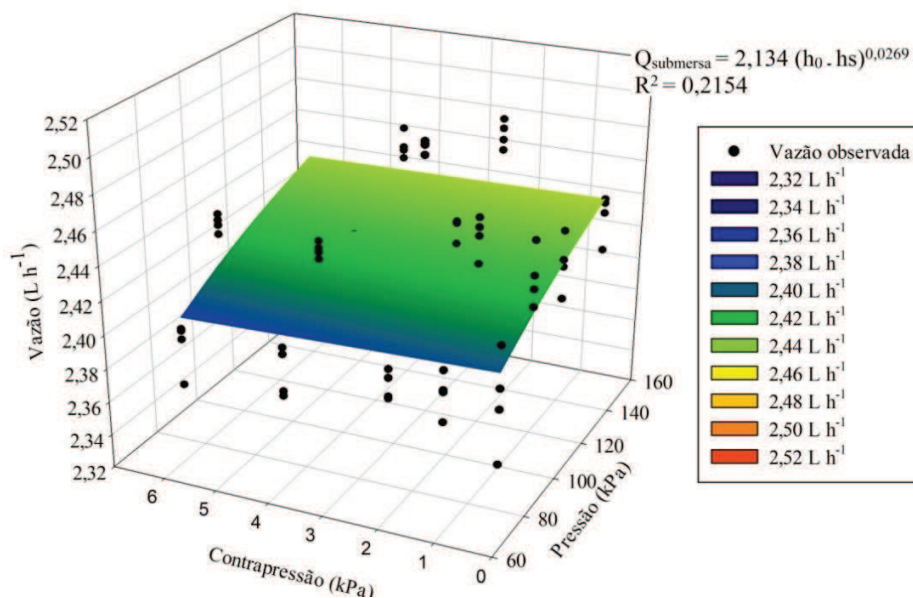


Gráfico 11 Relação vazão-pressão do emissor do tubo gotejador Hydro PCND em aplicação submersa

Quando submerso, ou seja, com contrapressões atuantes na saída do emissor do tubo gotejador Hydro PCND, este apresentou, assim como ocorrido para o gotejador D5000, maior expoente de descarga (0,0269) em relação ao obtido no ensaio superficial (0,0044).

Ao ser submerso em água também nota-se, pela análise do Gráfico 11, uma maior variabilidade dos dados de vazão observados em relação aos mostrados na aplicação superficial (Gráfico 10). A forma plana da superfície de resposta apresentada no Gráfico 11 demonstra o efeito autocompensante, porém, não há boa aderência dos dados observados ao modelo, evidenciado pelo baixo R^2 (21,56%).

O aumento do expoente de descarga (x), comparando-se a aplicação superficial com a submersa para os emissores autocompensantes, deve-se à

atuação da contrapressão sobre o mecanismo de autocompensação do emissor, impedindo que o mesmo reduza a área disponível à descarga de água.

Ao se avaliar a correlação entre as vazões superficiais e submersas observadas para o gotejador Hydro PCND (Gráfico 12), nota-se a presença de alguns pares de dados em que a vazão submersa foi superior à vazão superficial e que esta variabilidade aumenta com o aumento da pressão de entrada nos emissores. Porém, o coeficiente de correlação entre os pares de dados foi 0,9865, inferior a um, que mostra que ainda assim, a vazão superficial supera a submersa.

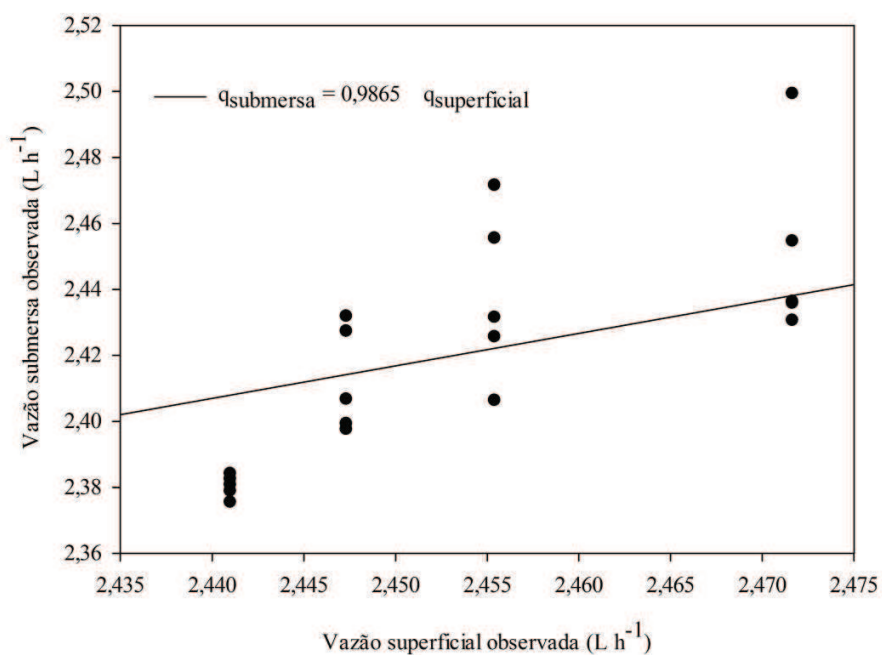


Gráfico 12 Correlação entre a vazão superficial e a submersa observada para o tubo gotejador Hydro PCND

De acordo com Azevedo Neto et al. (1998), há uma redução do coeficiente de descarga em orifícios afogados, situação no qual se encontram emissores deste trabalho quando submersos em água.

Isso levaria a uma redução do coeficiente de proporcionalidade k em todos os casos. Porém nota-se um aumento deste tanto para o emissor TalDrip quanto para o Jardiline. Adicionalmente, uma redução no expoente de descarga (x) dos emissores, como ocorre para esses dois, comparando as curvas características dos emissores em aplicação superficial e submersos, também levaria a uma redução da constante de proporcionalidade, como evidenciado pela Equação 2, fato que não ocorreu.

Já no caso dos emissores autocompensantes testados, D5000 e Hydro PCND, obteve-se uma redução entre as constantes de proporcionalidade ao se comparar a aplicação superficial com a submersa, para ambos, mesmo com o aumento do expoente de descarga na condição submersa. Nota-se, portanto, que a redução do coeficiente de descarga destes emissores quando afogados gerou maior impacto nos valores de $k_{\text{subsuperficial}}$ do que o aumento no expoente de descarga, na aplicação submersa.

4 CONCLUSÕES

Os emissores tiveram suas constantes de proporcionalidade e expoentes de descarga alterados em aplicação submersa em água, representando o efeito da contrapressão. Emissores não autocompensantes tiveram seu expoente de descarga diminuído enquanto que nos autocompensantes, este aumentou.

Os emissores D5000 e Hydro PCND, sob efeito da contrapressão, tiveram seus expoentes de descarga aumentados, o que infere menor capacidade de compensação da vazão devido à atuação da contrapressão sobre o mecanismo regulador da vazão.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. M.; SAMPAIO, S. C.; SUSZEK, M. Comportamento hidráulico de gotejadores em linha lateral de irrigação. **Varia Scientia**, Cascavel, v.6, n.11, p.129-140, 2006.

AZEVEDO NETO, J. M. et al. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: E. Blucher, 1998. 650 p.

BEN-GAL, A.; LAZOROVITCH, N.; SHANI, U. Subsurface drip irrigation in gravel filled cavities. **Vadose Zone Journal**, Austin, v. 3, n. 4, p. 1407-1413, Nov. 2004.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudación**. 3. ed. Madrid: Mundi, 1996. 513 p.

FRIZZONE, J. A. et al. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.278-283, 1998.

GIL, M. et al. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 6, p. 451-458, Sept. 2008.

GIL, M. et al. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 137, n. 5, p. 287-294, 2011.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: V. N. Reinhold, 1990. 652 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.17, n.4, p.678-684, 1975.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 24, n.1, p. 77-80, 1981.

PRADO, G.; NUNES, L. H.; TINOS, A. C. Avaliação técnica de dois tipos de emissores empregados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.8, n.1, p.12-25, 2014.

THEBALDI, M. S. et al. Relação vazão pressão de um tubo gotejador submetido à condição subsuperficial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 43., 2014, Campo Grande. **Anais...Jaboticabal**: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2014. 1 CD-ROM.

CAPÍTULO 3 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial, parte II: comportamento da vazão

RESUMO

O sucesso da irrigação por gotejamento subsuperficial é dependente da transposição do obstáculo da contrapressão, que ocorre quando a intensidade de aplicação de água supera a taxa de infiltração do solo, o que reduz a vazão dos emissores. O objetivo desse trabalho foi determinar a variação de vazão (em relação à vazão superficial) de quatro gotejadores quando enterrados em um solo franco bem como a contrapressão gerada pelo solo na condição subsuperficial. O experimento foi realizado em Delineamento Inteiramente Casualizado em esquema de Faixas. Os tratamentos foram: profundidade de instalação dos tubos gotejadores (dois níveis: 0,10 e 0,20 m), que representavam as faixas; tipo de tubo gotejador (quatro níveis: Hydro PCND, D5000, TalDripe Jardiline) e tempos de irrigação (três níveis: 0,5, 1,0 e 3,0 horas). A variação de vazão entre a aplicação superficial e subsuperficial no solo *Yolo Loam*, com pressão de entrada nas laterais de 145 kPa foi maior quanto maior a vazão do emissor. A profundidade de instalação dos emissores bem como o tempo de irrigação não influenciaram a contrapressão e conseqüentemente a variação de vazão.

Palavras-chave: Irrigação localizada. Manejo da irrigação. Comportamento hidráulico.

ABSTRACT

Subsurface drip irrigation success is dependent of the knowledge of the backpressure, which occurs when the water application intensity exceeds the soil's infiltration rate, which reduces the emitter's flow rate. The aim of this study was to determine the discharge variation (relative to surface flow) of four drippers when buried in a loam soil and the backpressure generated by the soil on subsurface condition. The experiment was conducted in a completely randomized design, in strip plots scheme. The treatments were: dripline's installation depth (two levels: 0.10 and 0.20 m), representing the strips; dripline type (four levels: Hydro PCND, D5000, TalDrip and Jardiline) and irrigation times (three levels: 0.5, 1.0 and 3.0 hours). The flow variation between the surface and subsurface application on Yolo Loam soil, with inlet pressure of 145 kPa, was greater the higher was emitter flow. The emitters installation depth as well the irrigation time did not affect the backpressure and consequently the flow variation.

Palavras-chave: Trickle Irrigation. Irrigation Management. Hydraulics Behavior.

1 INTRODUÇÃO

Essa é a segunda parte da pesquisa sobre a influência da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial. Na primeira parte do trabalho, foram mostrados os efeitos da contrapressão sobre a curva característica de quatro emissores, enquanto na segunda parte, trata-se da vazão desses emissores em aplicação subsuperficial em diferentes profundidades de instalação e tempos de irrigação, bem como da contrapressão gerada.

No sistema de gotejamento subsuperficial toda a rede é enterrada, inclusive as laterais. De acordo com Souza, Coelho e Paz (2007), o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial apresenta algumas vantagens em relação ao superficial, tais como: aumento na eficiência de irrigação e no uso de água, aumentando assim a disponibilidade de nutrientes; maior durabilidade dos materiais e a redução da área de evaporação de água a partir da superfície do solo.

Adicionalmente às características citadas anteriormente, possui menor incidência de plantas daninhas, menor incidência de doenças justificadas por uma menor umidade na superfície, grande potencial para automação, possibilidade de aplicação de produtos químicos em solução na água de irrigação, flexibilidade no uso de maquinário agrícola, dentre outros (LAMM et al., 2009; LIMA et al., 2010).

Entretanto, o sucesso da irrigação por gotejamento subsuperficial é dependente da transposição do obstáculo da contrapressão. O emissor quando enterrado geralmente possui uma cavidade limitada ao seu redor que fica preenchida por água, o que cria uma pressão positiva quando a intensidade de aplicação do emissor supera a taxa de infiltração do solo (SHANI; OR, 1995). Assim, projetos instalados em campo podem ser prejudicados, já que a lâmina dimensionada não será disponibilizada à cultura.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar a variação de vazão (em relação à vazão superficial) de quatro gotejadores quando enterrados em duas profundidades em um solo franco bem como a contrapressão gerada pelo solo na condição subsuperficial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este experimento foi realizado na Universidade da Califórnia em Davis, Estados Unidos da América, entre janeiro e maio de 2014, em várias instalações ligadas ao *Department of Land, Air and Water Resources*.

A área experimental utilizada se localiza na Estação de Campo de Campbell Tract, da Universidade da Califórnia em Davis. Possuía quinze metros de comprimento por quarenta e oito metros de largura e foi devidamente preparada com grade aradora-niveladora até 0,30 m.

O experimento foi realizado em Delineamento Inteiramente Casualizado em esquema de Faixas. Os tratamentos foram: profundidade de instalação dos tubos gotejadores (dois níveis: 0,10 e 0,20 m), que representavam as faixas; tipo de tubo gotejador (quatro níveis: Hydro PCND, D5000, TalDripe Jardiline) e tempos de irrigação (três níveis: 0,5, 1,0 e 3,0 horas).

Para a realização das irrigações, foi montado um sistema portátil com linha de derivação que comportava seis linhas laterais, controladas por registros de globo (Figura 1).

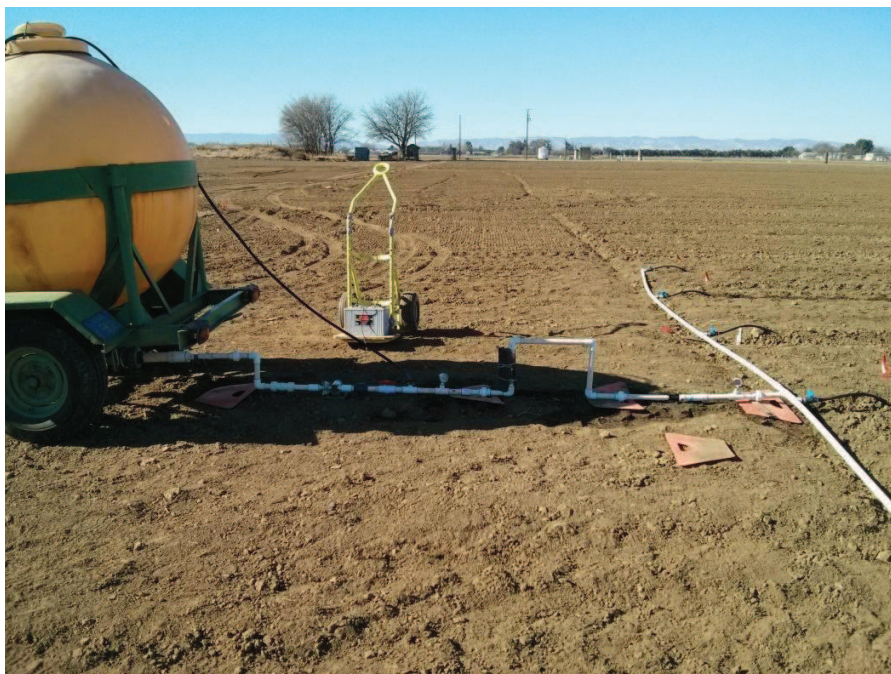


Figura 1 Vista lateral do sistema de irrigação

A linha principal era constituída por um reservatório móvel, uma bomba Jabsco, modelo 23.220-2012 alimentada por uma bateria 12 V, com sistema de filtração embutida na área de sucção. Após o sistema de bombeamento, havia um manômetro instalado e logo após este, um medidor de vazão Omega Engineering FL-46.302 com faixa de leitura entre 24 e 240 L h⁻¹ e precisão de $\pm 5\%$. Um regulador de pressão Senninger PRLG foi colocado antes da transição para a linha de derivação, com outro manômetro à jusante que indicou a regulação da pressão em 145 kPa. As linhas laterais foram enterradas utilizando um trator com um implemento especial acoplado para se instalar gotejadores subsuperficialmente.

As linhas de tubo gotejadores TalDrip e JardiLine possuíam 50 emissores, enquanto as linhas dos tubo gotejadores D5000 e Hydro PCND possuíam 20 e 23 emissores, respectivamente.

Quando terminada a irrigação em seis linhas laterais, o sistema de bombeamento era todo movido para as próximas seis linhas, até que foi realizada a irrigação das 24 linhas.

Em cada tratamento, a vazão foi medida logo após o início e logo antes do desligamento do bombeamento e também à 1/3, 1/2 e 2/3 do tempo de irrigação correspondente aos tratamentos, fazendo-se cinco repetições no tempo. A vazão obtida foi dividida pelo número de gotejadores na linha lateral, perfazendo assim a vazão média por gotejador. Foi calculada então a variação de vazão por gotejador, pela Equação 1.

$$\Delta Q = \frac{(Q_{\text{superficial}} - Q_{\text{subsuperficial}})}{Q_{\text{superficial}}} \quad (1)$$

em que:

ΔQ = variação entre a vazão superficial e subsuperficial, porcentagem;

$Q_{\text{subsuperficial}}$ = vazão média subsuperficial do emissor, L h⁻¹.

$Q_{\text{superficial}}$ = vazão superficial do emissor à pressão de entrada de 145 kPa, obtida a partir da equação característica de desempenho, apresentadas no Capítulo 2.

Para caracterização da textura do solo, foram formadas três amostras compostas de solo a partir de grupos de 10 amostras simples, retiradas no terço esquerdo da área experimental, terço direito e área central, além de duas profundidades, 0 - 0,30 m e 0,30 - 0,60 m.

O método utilizado para determinação da textura foi o do Hidrômetro. As amostras foram tratadas em solução de hexametáfosfato de sódio 0,02 M. O experimento foi realizado em sala com controle de temperatura a 20 °C no Laboratório de Hidrologia do Solo da Universidade da Califórnia em Davis.

Já os parâmetros do modelo de Genuchten (1980) da curva de retenção de água pelo solo foram obtidos pela técnica de redes neurais, usando o código Rosetta Live versão 1.1 (SCHAAP; LEIJ; GENUCHTEN, 2001), implementado dentro do *software* Hydrus 2D/3D.

Como dados de entrada, foram utilizadas as porcentagens de areia, silte e argila, bem como a densidade do solo, nas camadas de 0 – 0,30 m e 0,30 a 0,60 m da área experimental.

A condutividade hidráulica do solo saturado (k_0) foi determinada com um conjunto de permeômetros de carga constante, no Laboratório de Ensino de Física dos Solos da Universidade da Califórnia em Davis, em seis amostras retiradas da área experimental, sendo três da camada de 0 – 0,30 m e três da camada entre 0,30 – 0,60 m.

Os anéis utilizados eram de latão e possuíam 0,06 m de altura e 0,0828 m de diâmetro interno. As três amostras de cada camada formaram a condutividade hidráulica do solo saturado média da camada. Para a determinação, foi utilizada uma solução 0,01 M de cloreto de cálcio hidratado para evitar que a fração coloidal se dispersasse nos agregados de solo.

As características físico-hídricas e constantes do modelo da curva de retenção de água pelo solo de Genuchten (1980) estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Propriedades texturais e parâmetros hidráulicos do solo *Yolo Loam*

| Camada | 0 – 0,30 m | 0,30 – 0,60 m |
|--|------------|---------------|
| d_s (kg m ⁻³) | 1436 | 1407 |
| k_0 (cm h ⁻¹) | 1,78 | 0,55 |
| α (cm ⁻¹) | 0,0072 | 0,0064 |
| n | 1,5712 | 1,6020 |
| m | 0,364 | 0,376 |
| θ_s (m ³ m ⁻³) | 0,4030 | 0,4070 |
| θ_r (m ³ m ⁻³) | 0,0685 | 0,0683 |
| Areia (%) | 28,0 | 26,0 |
| Silte (%) | 49,0 | 52,0 |
| Argila (%) | 23,0 | 22,0 |

d_s – densidade do solo; k_0 - condutividade hidráulica do solo saturado; θ_s - umidade do solo saturado; θ_r - umidade residual do solo, m calculado pela restrição de Mualem ($m=1-1/n$).

O parâmetro de ajuste α_G do modelo de Gardner (1958) da condutividade hidráulica do solo não saturado foi estimado pelo equacionamento do potencial de Kirchhoff (GARDNER, 1958) dos modelos hidráulicos de Gardner e Mualem – van Genuchten (GENUCHTEN, 1980), utilizando-se a Equação 2, metodologia proposta por Gil et al. (2011).

$$\phi = \int_{-\infty}^0 k(h) dh \quad (2)$$

em que:

ϕ = potencial de Kirchhoff;

$k(h)$ = condutividade hidráulica não saturada dada pelo modelo de Mualem – van Genuchten, cm h⁻¹.

O modelo de condutividade hidráulica do solo não saturado em função da tensão da água no solo é dado pela Equação 3.

$$k(h) = k_0 \frac{\{1 - (|\alpha h|)^{n-1} [1 + (|\alpha h|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (|\alpha h|)^n]^{\frac{m}{2}}} \left(m = 1 - \frac{1}{n} \right) \quad (3)$$

em que:

$k(h)$ = condutividade hidráulica não saturada, $m s^{-1}$;

h = potencial matricial, dada em função do conteúdo de água adimensional (grau de saturação efetiva), kPa;

α e n = parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao solo.

Por substituição direta, α_G será obtido por (Equação 4):

$$\alpha_G = \frac{k_0}{\phi} \quad (4)$$

De posse dos valores de “ $Q_{\text{superficial}}$ ” de cada tratamento, “ α_G ”, “ k_0 ” e “ h_s ” e empregando a Equação 5, foram obtidos os valores do raio da cavidade esférica formada no ponto fonte de descarga dos emissores (r_0) para as combinações de emissores, profundidades e tempos de irrigação. A Equação 5 é a solução analítica de Philip (1992) para relacionar a pressão da cavidade do solo (h_s) com as propriedades físico-hídricas e a vazão q do emissor.

$$h_s = \left(\frac{2 - \alpha_G r_0}{8\pi k_0 r_0} \right) Q_{\text{superficial}} - \frac{1}{\alpha_G} \quad (5)$$

em que:

$Q_{\text{superficial}}$ = vazão do emissor em condição superficial, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

r_0 = raio da cavidade esférica formada, m;

k_0 = condutividade hidráulica do solo saturado, m s^{-1} ;

α_G = parâmetro de ajuste da equação de condutividade hidráulica insaturada de Gardner (1958).

O valor da contrapressão (h_s) foi estimado utilizando a Equação 2, apresentada no Capítulo 2, com os parâmetros “ $k_{\text{subsuperficial}}$ ” e “ $x_{\text{subsuperficial}}$ ” adequados para cada emissor avaliados em condição submersa. Isolando “ r_0 ” na Equação 5 obtém-se a Equação 6, usada para estimar os valores do raio das cavidades formadas ao redor dos pontos fontes nos tratamentos.

$$r_0 = \frac{2 Q_{\text{superficial}} \alpha_G}{8\pi k_0 (\alpha_G h_s + 1) + \alpha_G^2 Q_{\text{superficial}}} \quad (6)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância realizada para variação de vazão dos gotejadores e contrapressão em função da profundidade de instalação dos tubos gotejadores, tempo de irrigação e modelo de gotejador estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 ANOVA das avaliações variação entre vazão superficial e subsuperficial dos gotejadores (ΔQ) e contrapressão (hs) em função dos tratamentos

| Causas da variação | GL | Quadrado Médio e significância de F | |
|------------------------|----|-------------------------------------|---------------------------------|
| | | ΔQ | Contrapressão (h _s) |
| Profundidade (P) | 1 | 1,5623 ^{ns} | 26,5903 ^{ns} |
| Erro a | 8 | 5,0141 | 78,4802 |
| Gotejador (G) | 3 | 1294,0489* | 1832,1631* |
| P x G | 3 | 0,2066 ^{ns} | 0,4853 ^{ns} |
| Erro b | 24 | 2,5776 | 38,3193 |
| Tempo de irrigação (T) | 2 | 0,0773 ^{ns} | 2,3326 ^{ns} |
| T x G | 6 | 0,4659 ^{ns} | 9,8375 ^{ns} |
| T x P | 2 | 0,2492 ^{ns} | 3,5477 ^{ns} |
| T x P x G | 6 | 0,3453 ^{ns} | 5,1297 ^{ns} |
| Erro c | 64 | 0,7790 | 25,2173 |
| cv a | | 19,70 | 41,62 |
| cv b | | 14,12 | 29,08 |
| cv c | | 7,76 | 23,59 |

ns: não significativo. *: significativo ao teste F a 5% de probabilidade. cv: coeficiente de variação.

Tanto na avaliação da variação de vazão, quanto da contrapressão, houve significância a 5% de probabilidade estatística pelo teste F apenas para a fonte de variação “gotejador”. Assim, a profundidade de instalação do tubo gotejador em irrigação subsuperficial não influencia na variação da vazão em relação à aplicação superficial e contrapressão gerada. Há de se salientar que a área experimental foi arada até a profundidade de 0,3 m, sendo os emissores enterrados a 0,10 e 0,20 m. Portanto, espera-se uniformidade, ou menos

tendência à uniformidade, das características físico-hídricas do solo que regem o fenômeno da contrapressão e eventual variação de vazão.

Lazarovitch et al. (2006), em estudo que avaliou o efeito das características hidráulicas do solo sobre a uniformidade de descarga de unidades de gotejamento enterrado, alimentados por gravidade, concluíram que as propriedades hidráulicas do solo podem impactar a vazão de uma fonte subsuperficial porque a contrapressão no solo restringe a transmissão de água a partir do gotejador além de que, o grau de extensão da redução da vazão depende do tipo do solo, da vazão nominal do gotejador, das cavidades próximas à saída do emissor e das propriedades hidráulicas do sistema de irrigação, o que vai de encontro aos resultados obtidos por Gil et al. (2011) que encontraram diferenças na variação de vazão de emissores enterrados em solos arenosos e francos.

Acompanhando o resultado obtido para a fonte de variação “profundidade”, não houve também influência do tempo decorrido de irrigação na variação de vazão dos emissores e contrapressão gerada. Gil et al. (2011) afirmam que, assim que a água flui pelo emissor, a pressão do solo ao redor do ponto de descarga aumenta rapidamente nos primeiros minutos de funcionamento e depois estabiliza, como pode ser comprovado por esse estudo.

Rodríguez-Sinobas et al. (2009) caracterizaram hidráulicamente tubos gotejadores em irrigação subsuperficial e avaliaram que a vazão de entrada nas linhas laterais enterradas reduz rapidamente nos primeiros 600 a 800 segundos de irrigação (menos da metade do menor tempo de irrigação avaliado neste estudo, 1.800 segundos), e depois se estabiliza em um valor com o avanço do tempo, fato não observado pelos mesmos autores em laterais superficiais.

A Tabela 3 apresenta a variação entre a vazão superficial, determinada em laboratório, e a vazão subsuperficial obtida no solo *Yolo Loam* na pressão de entrada de 145 kPa nas linhas de gotejamento.

Tabela 3 Variação de vazão (ΔQ) dos emissores avaliados enterrados no solo *Yolo Loame* pressão de entrada no início da linha lateral de 145 kPa

| Emissor | Variação de vazão (decimal) |
|------------|-----------------------------|
| Hydro PCND | 0,0112a |
| D5000 | 0,0121a |
| TalDrip | 0,0552b |
| JardiLine | 0,1142c |

Letras diferentes na vertical indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade estatística.

Os diferentes tipos de gotejadores representam, em sua essência, diferentes vazões associadas à característica autocompensante ou não. O emissor JardiLine, que, em aplicação superficial apresentou a pressão de entrada de 145 kPa vazão de 4,37 L h⁻¹, foi o que sofreu maior variação de vazão(11,42%) enquanto o gotejador TalDrip (vazão de 1,91 L h⁻¹a145 kPa) a segunda maior (5,52%). Em contrapartida, os emissores D5000 e Hydro PCND que possuem vazões de 2,15 e 2,46 L h⁻¹a145 kPa, maiores que as do gotejador TalDrip, apresentaram variação de vazão estatisticamente igual entre sia 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott de 1,21% e 1,12%, respectivamente, enterrados no solo *Yolo Loam*. A menor variação entre a vazão superficial e subsuperficial (ΔQ) desses emissores em relação a um emissor que apresenta maior vazão deve-se ao fato destes serem autocompensantes. O resultado também implica que, estatisticamente, o valor do expoente de descarga dos emissores autocompensantes não influenciou na variação de vazão destes.

Estes resultados corroboram com os obtidos por Gil et al. (2011), que encontraram o mesmo comportamento em gotejadores autocompensantes e não autocompensantes enterrados em vasos com dois solos, um arenoso e outro franco. Esses autores encontraram para emissores não autocompensantes (vazão nominal de 2 L h⁻¹) em solo franco, variações de vazão entre 7% e 10%, enquanto para emissores autocompensantes em solos arenosos, variações abaixo de 1%, mesmo em emissores com vazão nominal de 24 L h⁻¹.

Mesmo não tendo sido encontradas diferenças significativas entre as interações duplas e triplas das fontes de variação (Tabela 3), na Tabela 4 são apresentadas as médias individuais da variação de vazão encontradas nos diversos tratamentos.

Tabela 4 Variação entre a vazão superficial e subsuperficial (ΔQ) para pressão de entrada no emissor de 145 kPa nos diversos tratamentos

| Emissor | Profundidade (m) | Tempo de irrigação (horas) | | |
|------------|------------------|----------------------------|--------|--------|
| | | 0,5 | 1,0 | 3,0 |
| TalDrip | 0,10 | 0,0522 | 0,0547 | 0,0554 |
| | 0,20 | 0,0541 | 0,0596 | 0,0550 |
| JardiLine | 0,10 | 0,1086 | 0,1157 | 0,1121 |
| | 0,20 | 0,1167 | 0,1146 | 0,1171 |
| D5000 | 0,10 | 0,0126 | 0,0098 | 0,0126 |
| | 0,20 | 0,0139 | 0,0122 | 0,0117 |
| Hydro PCND | 0,10 | 0,0113 | 0,0111 | 0,0109 |
| | 0,20 | 0,0110 | 0,0118 | 0,0110 |

Com a análise das médias individuais de variação de vazão por combinação entre tratamentos, podem-se perceber os valores semelhantes com a variação de profundidade de instalação e tempo de irrigação dentro de cada modelo de gotejador. Todos os valores de variação de vazão do gotejador Hydro PCND se mostraram semelhantes.

As contrapressões obtidas na irrigação subsuperficial no solo *Yolo Loam*, calculadas pela Equação 2, apresentada no Capítulo 2, utilizando os parâmetros dos modelos de relação vazão-pressão/contrapressão para os diferentes emissores estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Vazão superficial à pressão de entrada de 145 kPa e contrapressão calculada atuando sobre os emissores enterrados

| Emissor | Vazão superficial a 145 kPa (L h ⁻¹) | Contrapressão (kPa) |
|------------|--|---------------------|
| TalDrip | 1,91 | 14,99a |
| D5000 | 2,15 | 16,86a |
| Hydro PCND | 2,45 | 20,88b |
| JardiLine | 4,37 | 32,41c |

Letras diferentes na vertical indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade estatística.

Os resultados mostram que as diferentes vazões de cada emissor causaram diferentes valores de contrapressão, menos para os emissores TalDrip e D5000 que apresentaram valores de contrapressão iguais enterrados no solo *Yolo Loam* com pressão de entrada nos emissores de 145 kPa. O emissor JardiLine que possui vazão superficial de 4,37 L h⁻¹a145 kPa de pressão de entrada (h_0) foi o que teve maior contrapressão atuando sobre seu ponto de descarga, 32,41 kPa, enquanto os emissores TalDrip e D5000 (vazões superficiais de 1,91 e 2,15 L h⁻¹ com pressão de entrada no emissor de 145 kPa) provocaram as menores contrapressões no solo.

Gil et al. (2010) estudaram em seu experimento a evolução do raio cavidade esférica gerada ao redor de emissores em gotejamento subsuperficial e não obtiveram o mesmo resultado. Em seu trabalho, os autores verificaram que ao aumentar a vazão do emissor não houve aumento no valor final de contrapressão, que permaneceu por volta de 4,9 a 5,9 kPa mesmo com variações de vazão entre 3,05 e 9,40 L h⁻¹. Esses resultados corroboram também com os obtidos por Gil et al. (2007, 2008) no mesmo solo, todos esses experimentos feitos em vasos, entretanto, não estão de acordo com as observações deste trabalho nem com as realizadas por Shani et al. (1996), em trabalho em que se avaliou solos em campo e também por Gil et al. (2011) que realizou experimento em vasos em que houve aumento da contrapressão com o incremento da vazão.

No trabalho de Shani et al. (1996), as contrapressões variaram de valores próximos de 4,9 kPa a 78 kPa para vazões variando de um pouco menos de 0,5 L h⁻¹ a quase 18 L h⁻¹, enquanto no trabalho de Gil et al. (2011), obtiveram valores entre 1,47 kPa (vazão de 2 L h⁻¹ em solo arenoso) a 20,30 kPa (8 L h⁻¹ em solo franco). Essa discrepância de comportamento pode ser explicada por diferentes propriedades dos solos tanto em campo como em vasos.

As contrapressões médias calculadas em todas as combinações de entre tratamentos são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 Contrapressão (kPa) agindo sobre os emissores em condição subsuperficial para pressão de entrada de 145 kPa no solo *Yolo Loam* nos diversos tratamentos

| Emissor | Profundidade (m) | Tempo de irrigação (horas) | | |
|------------|------------------|----------------------------|-------|-------|
| | | 0,5 | 1,0 | 3,0 |
| TalDrip | 0,10 | 13,93 | 14,77 | 14,98 |
| | 0,20 | 14,64 | 16,61 | 14,99 |
| JardiLine | 0,10 | 30,72 | 32,87 | 31,78 |
| | 0,20 | 33,20 | 32,57 | 33,32 |
| D5000 | 0,10 | 17,23 | 14,56 | 17,23 |
| | 0,20 | 18,75 | 16,84 | 16,53 |
| Hydro PCND | 0,10 | 20,90 | 21,00 | 19,67 |
| | 0,20 | 20,11 | 23,26 | 20,25 |

Mesmo não havendo significância estatística, nota-se, ao analisar a Tabela 6, pequenas diferenças nos valores de contrapressão individuais calculados para os diversos tratamentos. Esses diferentes valores são associados às diferentes vazões subsuperficiais obtidas nos ensaios de campo. Há de se inferir que, mesmo em uma pequena área, com o solo recém-preparado e aparentemente uniforme, podem-se encontrar valores variantes das características físico-hídricas. Esta variabilidade espacial das características do solo, associada à variação intrínseca dos emissores, converge a essas diferenças na contrapressão e vazão subsuperficial.

Considerando os parâmetros da curva de retenção de água pelo solo para a camada de 0 – 0,30 m e a condutividade hidráulica saturada (Tabela 1), o valor do parâmetro alfa da Equação de Gardner foi $2,8 \text{ m}^{-1}$. Assim, de posse dos valores de contrapressão para cada tratamento (Tabela 6) e α_G , calculado pela Equação 4 a partir do valor de k_0 para camada de 0 – 0,30 m e do potencial de Kirchoff (ϕ) e vazão superficial dos emissores, os raios das cavidades esféricas formadas ao redor dos emissores foram calculados (Tabela 7).

Tabela 7 Raio da cavidade formada ao redor do ponto fonte, r_0 (m), nos diversos tratamentos no solo *Yolo Loam* para pressão de entrada de 145 kPa na linha lateral

| Emissor | Profundidade (m) | Tempo de irrigação (horas) | | |
|------------|------------------|----------------------------|----------|----------|
| | | 0,5 | 1,0 | 3,0 |
| TalDrip | 0,10 | 0,004908 | 0,004680 | 0,004627 |
| | 0,20 | 0,004716 | 0,004250 | 0,004625 |
| JardiLine | 0,10 | 0,005593 | 0,005260 | 0,005426 |
| | 0,20 | 0,005216 | 0,00531 | 0,005198 |
| D5000 | 0,10 | 0,004548 | 0,005220 | 0,004550 |
| | 0,20 | 0,004239 | 0,004636 | 0,004710 |
| Hydro PCND | 0,10 | 0,004415 | 0,004396 | 0,004650 |
| | 0,20 | 0,004563 | 0,004025 | 0,004530 |

Os resultados obtidos do raio da cavidade esférica ao redor dos emissores variaram entre 0,004025 m no emissor Hydro PCND enterrado a 0,20 m e tempo de irrigação de uma hora e 0,005593 m para o gotejador JardiLine em irrigação de 0,5 hora e enterrado a 0,10 m.

Os maiores valores de r_0 , no geral, foram obtidos para o emissor JardiLine, que possuía maior vazão superficial dentre os demais e também maior contrapressão atuante.

Gil et al. (2010) obtiveram em seus testes valores de r_0 que variaram entre 0,0025 m (vazão de $3,05 \text{ L h}^{-1}$) a 0,0070 m (vazão de $9,40 \text{ L h}^{-1}$) em um solo franco. Os autores afirmam que, em seu estudo, maiores valores de vazão

resultaram em maiores cavidades e que, no caso de baixas vazões, o aumento possui tendência linear.

4 CONCLUSÕES

A variação de vazão entre a aplicação superficial e subsuperficial no solo *Yolo Loam*, com pressão de entrada nas laterais de 145 kPa foi maior quanto maior a vazão do emissor. No caso de emissores autocompensantes, mesmo sobre a influência de contrapressão, esta não foi suficiente para anular o efeito autocompensante das vazões. A profundidade de instalação dos emissores bem como o tempo de irrigação não influenciaram a contrapressão e conseqüentemente a variação de vazão.

REFERÊNCIAS

GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, Baltimore, v. 85, p. 228-232, 1958.

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

GIL, M. et al. Efecto del suelo en el caudal del gotero enriego subsuperficial: determinación de caudales máximos. In: CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS, 1., 2007, Pamplona. **Anales...** Pamplona: Asociación Española de Riegos y Drenajes, 2007. p. 221-231.

GIL, M. et al. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 6, p. 451-458, Sept. 2008.

GIL, M. et al. Evolution of the spherical cavity radius generated around a subsurface drip emitter. **Biogeosciences**, Orono, v. 7, n. 6, p. 1935-1958, June 2010.

GIL, M. et al. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 137, n. 5, p. 287-294, 2011.

LAMM, F. R. et al. **Twenty years of progress with SDI in Kansas**. Saint Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. 23 p. (ASABE Paper, 95923). Disponível em:
<<http://www.ksre.ksu.edu/sdi/Reports/2009/FRL20Yr09.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2012.

LAZAROVITCH, N. et al. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 132, n. 6, p. 531-536, Nov./Dec. 2006.

LIMA, L. A. et al. Automação em irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 71-79, 2010.

PHILIP, J. R. What happens near a quasi-linear point source? **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 1, p. 47-52, Jan. 1992.

RODRÍGUEZ-SINOBAS, L. et al. Water distribution in laterals and units of subsurface drip irrigation: II., field evaluation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.135, n.6, p. 729-738, 2009.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; GENUCHTEN, M. T. van. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.251, n. 3, p.163-176, Mar. 2001.

SHANI, U. et al. Soil limiting from subsurface emitters: I., pressure measurements. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 5, p. 291-295, Oct. 1996.

SHANI, U.; OR, D. In situ method for estimating subsurface unsaturated hydraulic conductivity. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, n. 8, p. 1863-1870, 1995.

SOUZA, E. A.; COELHO, E. D.; PAZ, V. P. da S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1161-1166, jul./ago. 2007.

CAPÍTULO 4 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial, parte III: comprimento máximo de laterais

RESUMO

Para o correto dimensionamento da irrigação por gotejamento subsuperficial, devem-se conhecer as características hidráulicas dos emissores nesta situação bem como a vazão destes sob o efeito da contrapressão. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência da variação da vazão de quatro gotejadores, dois autocompensantes e dois não autocompensantes, enterrados em solo franco sobre o comprimento máximo das linhas laterais em diferentes situações de dimensionamento. Para tal, foi utilizada a metodologia de dimensionamento proposta por Anyoji e Wu (1987), que considera as variações de vazão por efeitos hidráulicos e construtivos dos emissores. No caso de emissores não autocompensantes, o comprimento máximo de linhas laterais é maior na aplicação subsuperficial. Porém, para emissores autocompensantes, a irrigação sob influência de contrapressão causa aumento no expoente de descarga e devido à baixa variação de vazão entre condição superficial e subsuperficial, as laterais superficiais podem ter comprimentos maiores que as subsuperficiais.

Palavras-chave: Expoente de descarga. Coeficiente de variação de fabricação. Dimensionamento.

ABSTRACT

For the optimal design of subsurface drip irrigation, we should be aware of the emitter's hydraulic characteristics in this situation as well as the flow rate of these are under the backpressure effect. Therefore, this study aimed to investigate the flow variation influence of four drippers, two pressure compensating and two non-pressure compensating, buried in a loam soil on the irrigation lateral maximum length in different design situations. To this end, the design methodology proposed by Anyoji and Wu (1987), which consider the emitter's flow variations by hydraulic and construction effects, was used. In the case of non-pressure compensating emitters, the maximum length of the lateral is greater in subsurface application. However, for pressure compensating emitters, irrigation under the influence of backpressure causes an increase in the discharge exponent and due to the low flow variations between surface and subsurface condition, the lateral length in surface condition can be larger than the in subsurface.

Keywords: Discharge exponent. Manufacturing coefficient of variation. Design.

1 INTRODUÇÃO

Essa é a terceira parte da pesquisa sobre a influência da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial. Na primeira parte do trabalho, foram mostrados os efeitos da contrapressão sobre a curva característica de quatro emissores, enquanto na segunda, pôde-se verificar a variação de vazão desses emissores em aplicação subsuperficial em um solo franco, em diferentes profundidades de instalação e tempos de irrigação, bem como a contrapressão gerada em cada situação. Nesta parte, o impacto no comportamento hidráulico dos emissores em instalação subsuperficial sobre o comprimento máximo permitido de linhas laterais, considerando critérios de uniformidade e topografia, é avaliado.

Há uma gama de métodos de dimensionamento de linhas laterais utilizados por engenheiros de irrigação. Na maioria dos casos, consideram-se apenas as variações de pressão ao longo da linha lateral, por efeito de perdas de carga adicionadas à diferença de nível. Anyoji e Wu (1987) desenvolveram uma técnica para o cálculo do comprimento máximo de linhas laterais, usando aproximação estatística, em que consideraram as variações de vazão por efeitos hidráulicos e construtivos dos emissores.

Segundo Frizzone et al. (1998), estes autores expressaram as variações de vazão do emissor como um coeficiente de variação de vazão que é a função do coeficiente de variação de fabricação (que denota variações de vazão graças aos efeitos construtivos) e do coeficiente de variação de pressão ao longo da linha lateral. Assim, ao se estabelecer um coeficiente de variação de vazão como critério de dimensionamento, o coeficiente de variação de pressão ao longo da linha lateral pode ser calculado e o seu comprimento máximo determinado. Neste método, o expoente de descarga do emissor e sua vazão, também são considerados.

Notadamente, alguns trabalhos como o de Gil et al. (2011) mostram que há uma variação entre a vazão encontrada no gotejamento subsuperficial comparada à obtida no superficial, ao se utilizar o mesmo emissor. Isso se dá, devido ao fenômeno da contrapressão, que ocorre quando a taxa de aplicação de água de emissores enterrados supera a capacidade de infiltração do solo. Diferenças nas características hidráulicas dos emissores também podem ser encontradas nas duas situações.

Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência da variação da vazão dos gotejadores enterrados em solo franco sobre o comprimento máximo das linhas laterais em diferentes situações de dimensionamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os emissores TalDrip, Jardiline, Hydro PCND e D5000 tiveram os seus parâmetros das equações vazão-pressão, superficiais e submersas, apresentados no Capítulo 2 do presente trabalho. Já a vazão subsuperficial dos emissores em solo franco com pressão de entrada nos emissores de 145 kPa, enterrados a 0,10 e 0,20 m em tempos de irrigação de 0,5; 1,0 e 3,0 horas foi mostrada no Capítulo 3. Assim, pôde-se calcular o comprimento máximo das linhas contendo esses emissores em gotejamento subsuperficial. Para tal, adaptou-se a técnica de dimensionamento de linhas laterais de irrigação localizada usando a aproximação estatística, desenvolvida por Anyoji e Wu (1987).

A análise foi desenvolvida tomando o valor médio de vazão subsuperficial em todos os tratamentos para cada emissor, considerando a pressão de entrada na linha de 145 kPa.

Foram realizadas simulações para três critérios de uniformidade de vazão, CV(q) desejados em projeto: 0,05; 0,10 e 0,20 além de se considerar situações de desnível da linha lateral:

- a) Aclive de 2% e 5%;
- b) Lateral em nível;
- c) Declive de 2% e 5%.

Pela metodologia de Anyoji e Wu (1987), o coeficiente de variação de vazão dos emissores pode ser expresso pela Equação 1.

$$CV(q) = \frac{\{[CV(k)]^2 + x^2[CV(H)]^2\}^{0,5}}{1 + \frac{1}{2} \times [CV(H)]^2(x - 1) x} \quad (1)$$

em que:

$CV(q)$ = coeficiente de variação de vazão, decimal;

$CV(H)$ = coeficiente de variação da carga de pressão ao longo da linha lateral, decimal;

$CV(k)$ = corresponde ao coeficiente de variação de fabricação CV_f , decimal, e

x = expoente de descarga do emissor na equação vazão-pressão considerada, superficial ou submersa, adimensional.

Para o uso da Equação 1, deve-se adotar um critério de uniformidade, $CV(q)$, e calcula-se a partir deste, o $CV(H)$.

A variância da carga de pressão ao longo da linha lateral pode ser obtida combinando-se a variância da carga de pressão decorrente da perda de carga, da variância da carga de pressão devido à diferença de nível e da variância da interação entre esses dois fatores. Assim, o coeficiente de variação da carga de pressão ao longo da linha lateral da Equação 2 foi obtido equacionando a razão entre a raiz quadrada da variância de variação da carga de pressão ao longo da linha lateral e a carga média de pressão na linha lateral:

$$CV(H) = \frac{\{8,2735 \times 10^{-2} h_{FF}^2 + 8,3335 \times 10^{-2} \Delta Z^2 + 15,439 \times 10^{-2} h_{FF} \Delta Z\}^{0,5}}{H - \frac{m+1}{m+2} h_{FF} - \frac{1}{2} \Delta Z} \quad (2)$$

em que:

h_{FF} = perda de carga distribuída na linha lateral corrigida pelo fator F de Christiansen, m.c.a.;

ΔZ = diferença de nível na lateral, negativo para declive, m;

H = pressão de serviço dos emissores, m.c.a., e

m = expoente da vazão na equação de perda de carga, adimensional.

A perda de carga na linha lateral foi calculada combinando-se a equação de perda de carga de Darcy–Weisbach (Equação 3). Bermuth (1990) cita que para tubos lisos e para valores do número de Reynolds entre 4.000 e 100.000, como verificado neste trabalho, o fator de atrito f pode ser estimado pela equação de Blasius (Equação 4). Considerou-se para o número de Reynolds (Rn , Equação 5) a viscosidade cinemática da água com o valor de $1,01 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ e utilizando o fator de redução da perda de carga de Christiansen (1942) (Equação 6).

$$h_F = f \frac{L}{d_i} \frac{V^2}{2 \times g} \quad (3)$$

$$f = 0,3164 Rn^{-0,25} \quad (4)$$

$$Rn = \frac{V d_i}{\psi} \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \quad (6)$$

em que:

L = comprimento da linha lateral, m;

d_i = diâmetro interno da tubulação, m;

V = velocidade de escoamento da água, m s^{-1} ;

g = aceleração da gravidade, m s^{-2} ;

ψ = viscosidade cinemática da água a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;

m = expoente da vazão na equação de perda de carga, considerado 1,75,

e

N = número de emissores na linha lateral.

Como o número de emissores na linha lateral foi maior que 20 em todos os casos, a Equação 6 foi aproximada para a Equação 7, e a perda de carga distribuída na linha lateral corrigida pelo fator F de Christiansen, h_{FF} , foi definida pela Equação 8.

$$F = \frac{1}{m+1} \quad (7)$$

$$h_{FF} = h_F F \quad (8)$$

Para a determinação do comprimento máximo permitido da lateral, ajustou-se numericamente o comprimento da linha lateral na Equação 3, para que as Equações 1 e 2 se tornassem iguais. Nesta avaliação a perda de carga localizada causada pelos emissores na linha lateral foi negligenciada.

Foi realizado um experimento para a obtenção do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (CHRISTIANSEN, 1942) e do Coeficiente de Variação de Fabricação (CVf). Para tal, uma linha contendo 15 gotejadores foi ensaiada em uma bancada e os volumes aplicados individualmente por cada emissor foram coletados por recipientes plásticos cilíndricos, que possuíam diâmetro de 80 mm e altura de 102 mm. Foram realizadas quatro repetições e o tempo de ensaio foi de dois minutos.

O CUC foi calculado pela Equação 9:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - V_m|}{nV_m} \right) \quad (9)$$

em que:

V_i = volume coletado em cada recipiente, L;

V_m = média dos volumes, considerando todos os coletores, L e

n = número de coletores utilizados.

O CVf foi calculado pela Equação 10:

$$CVf = 100 \left(\frac{S}{V_m} \right) \quad (10)$$

em que:

S = desvio padrão da amostra, L e

V_m = média dos volumes, considerando todos os coletores, L.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os valores de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Coeficiente de Variação de Fabricação dos emissores avaliados em quatro diferentes pressões, bem como a classificação dos valores obtidos, segundo Mantovani (2002) e American Society of Agricultural Engineers - ASAE (2003), para CUC e CVf, respectivamente.

Tabela 1 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen e Coeficiente de Variação de Fabricação e suas classificações nas pressões avaliadas para os diversos emissores

| Emissor | Pressão (kPa) | CUC (%) | Classificação Mantovani (2002) | CVf (%) | Classificação ASAE (2003) |
|------------|---------------|---------|--------------------------------|---------|---------------------------|
| TalDrip | 25 | 98,57 | Excelente | 1,89 | Excelente |
| | 50 | 98,55 | Excelente | 1,87 | Excelente |
| | 100 | 98,87 | Excelente | 1,42 | Excelente |
| | 150 | 99,00 | Excelente | 1,50 | Excelente |
| | Média | | 98,75 | | 1,67 |
| JardiLine | 25 | 97,79 | Excelente | 2,85 | Excelente |
| | 50 | 97,40 | Excelente | 3,39 | Excelente |
| | 100 | 97,59 | Excelente | 3,37 | Excelente |
| | 150 | 97,71 | Excelente | 3,08 | Excelente |
| | Média | | 97,62 | | 3,17 |
| D5000 | 25 | 99,13 | Excelente | 1,22 | Excelente |
| | 50 | 97,68 | Excelente | 3,21 | Excelente |
| | 100 | 97,67 | Excelente | 3,63 | Excelente |
| | 150 | 97,51 | Excelente | 3,07 | Excelente |
| | Média | | 98,00 | | 2,78 |
| Hydro PCND | 80 | 98,18 | Excelente | 2,42 | Excelente |
| | 100 | 98,41 | Excelente | 1,99 | Excelente |
| | 120 | 99,07 | Excelente | 1,26 | Excelente |
| | 150 | 98,23 | Excelente | 2,34 | Excelente |
| | Média | | 98,47 | | 2,00 |

Para todos os emissores e pressões avaliados, foram obtidos CUC e CVf classificados como “excelente” sendo que o emissor TalDrip apresentou o maior CUC e o menor CVf em média, 98,75% e 1,67%, respectivamente.

O CVf expressa o efeito dos fatores inerentes à fabricação sobre a variação da vazão, assim, o emissor Jardiline, dentre os avaliados, possui maior influência dos processos de fabricação em sua uniformidade, já que apresentou CVf de 3,17% acompanhado de um CUC de 97,62%. Este emissor apresentou melhor uniformidade operando à pressão de 25 kPa bem como o emissor D5000. A faixa de operação deste último informada pelo fabricante é de 50 a 350 kPa, faixa em que há a compensação da vazão com a variação da pressão, porém o emissor apresentou menor uniformidade e maior CVf nas pressões avaliadas dentro desta faixa.

Por apresentar característica “antidrenante”, o emissor Hydro PCND só pôde ser analisado dentro da faixa de pressão informada pelo fabricante, pois, em pressões menores que o limite inferior, não há aplicação de água. Este emissor, apresentou o segundo maior CUC e segundo menor CVf médios dentre os avaliados, sendo as melhores uniformidades obtidas nas pressões de 100 e 120 kPa.

Segundo Oliveira et al. (2000), a variabilidade existente entre gotejadores devida ao processo de fabricação, representada pelo CVf, deve ser considerada no dimensionamento de sistemas de irrigação localizada e que, como nesses sistemas as secções transversais de fluxo são em sua maioria de diâmetros reduzidos, a fabricação deverá ser precisa e bastante uniforme, já que pequenas variações poderão causar grande impacto na vazão, no caso de emissores não autocompensantes. Para Nakayama e Bucks (1981), as principais causas de variação de fabricação são a heterogeneidade do material utilizado e a concepção do próprio emissor.

Os comprimentos máximos simulados para diversos cenários, considerando a vazão superficial e subsuperficial com o tubo gotejador TalDrip enterrado no solo *Yolo Loam*, e pressão de entrada de 145 kPa, estão apresentados no Gráfico 1.

Há de se salientar que, como vazão subsuperficial, considerou-se a média obtida em todos os tratamentos do experimento que visou determinar a vazão dos emissores quando enterrados no solo *Yolo Loam*. Este experimento, apresentado no Capítulo 3, avaliou os emissores em duas profundidades (0,10 e 0,20 m) e em três tempos de irrigação (0,5; 1,0 e 3,0 horas). Não foram observadas variações significativas da vazão em todos os tratamentos (Tabela 2 do Capítulo 3) dentro de cada modelo de emissor.

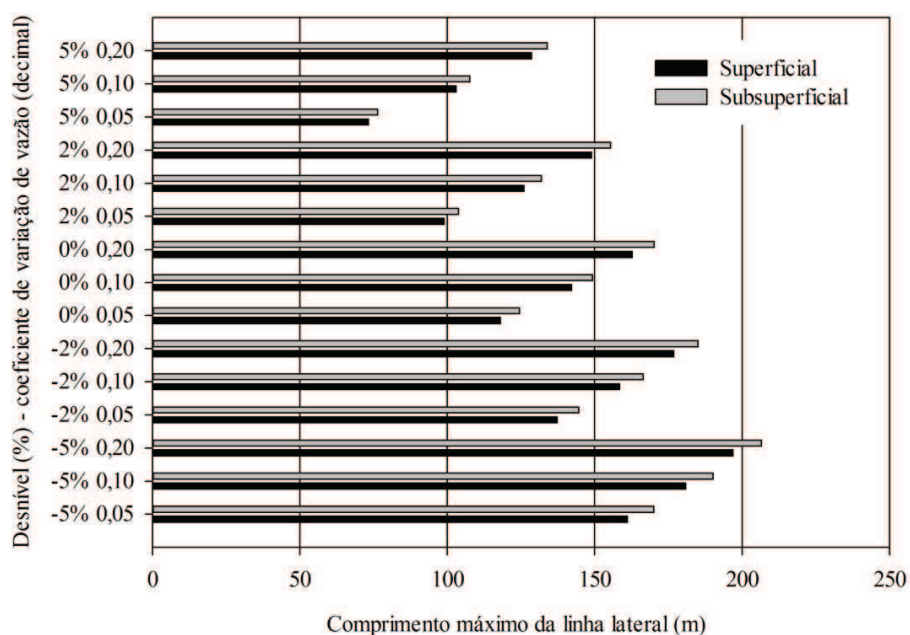


Gráfico 1 Comprimento máximo da lateral do tubogotejador TalDrip em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis

Para o tubo gotejador TalDrip, o maior comprimento de linha lateral simulado foi 206,52 m, no caso em que a linha lateral estiver com declive de 5% e um coeficiente de variação de vazão de 20% e em irrigação subsuperficial. Comparativamente, nessas mesmas condições com vazão superficial, o comprimento máximo calculado foi 196,94 m, ou seja, 9,58 m menor.

Pela análise dos resultados, os menores comprimentos de linha lateral foram obtidos para coeficiente de variação de vazão de 5% e condição de aclive de 5% (76,38 m para subsuperficial e 73,17 m para subsuperficial). Neste cenário também, foi menor a diferença entre o comprimento máximo entre vazão superficial e subsuperficial de 3,21 m. Nesse caso, o aumento do coeficiente de variação de vazão ($CV(q)$) permitido, eleva a diferença entre os comprimentos máximos, já que, uma menor vazão na lateral acarreta na menor perda de carga e variação da carga de pressão, que, associada ao maior declive, faz a diferença entre comprimentos máximos aumentar para diferentes vazões na linha lateral. A situação oposta denota menores comprimentos e menores diferenças entre a vazão superficial e subsuperficial, no caso de aclive de 5% e coeficiente de variação de vazão de 5%.

Os comprimentos máximos de linhas laterais do tubo gotejador JardiLine em aplicação superficial e subsuperficial, com pressão de serviço de 145 kPa, simulado para diversos coeficientes de variação de vazão e desníveis são mostrados no Gráfico 2.

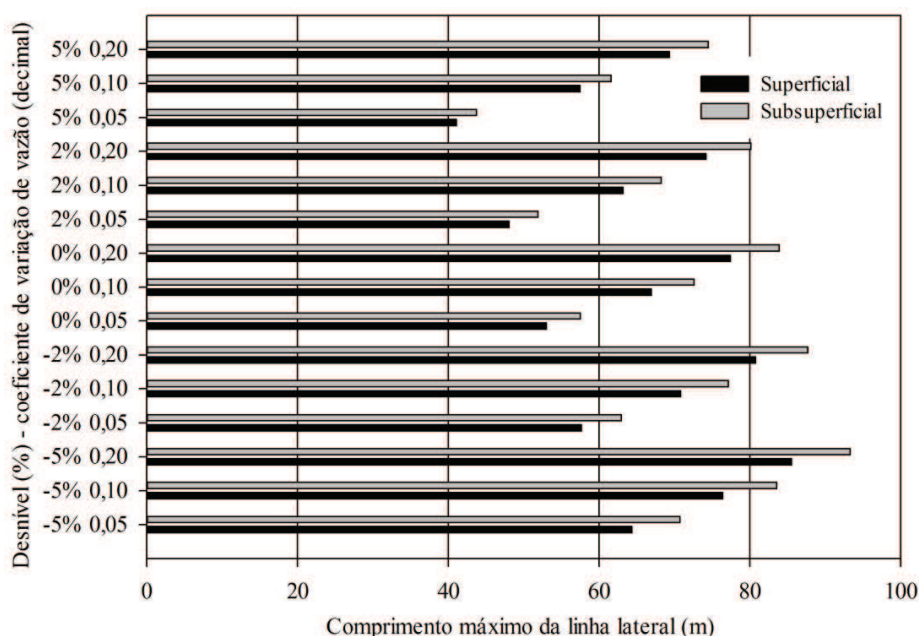


Gráfico 2 Comprimento máximo da lateral do tubo gotejador JardimLine em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis

Comparativamente às linhas laterais de irrigação com emissores TalDrip, os comprimentos máximos obtidos ao se usar o tubo gotejador JardimLine foram menores, pois, a vazão individual dos emissores em aplicação superficial e subsuperficial são maiores. Para este tubo gotejador, o maior comprimento de lateral permitido foi de 93,33 m (declive de 5% e $cv(q)$ de 0,20 em aplicação subsuperficial) e o menor 41,06 m (5% de variação de pressão permitida associada a um acive de 5% em aplicação superficial), seguindo a mesma tendência apresentada pelo tubo gotejador TalDrip.

Além da influência da diferença entre as vazões, as diferentes constantes de proporcionalidade e expoentes de descarga entre as condições superficial e subsuperficial, também proporcionam efeitos sobre o comprimento máximo das laterais de gotejamento. Quanto maior o expoente de descarga, menor o

comprimento máximo de lateral permitido, fixando o desnível, $CV(q)$, vazão na linha lateral e diâmetro da tubulação. O expoente x é uma indicação do regime de escoamento e tipo de emissor, que mede indiretamente a sensibilidade da variação de vazão com a pressão. Os valores de x tipicamente variam entre 0 e 1, em que, um baixo valor indica uma baixa sensibilidade da variação de vazão com a pressão (MANGRIO et al., 2013). O expoente de descarga destes dois emissores diminuiu em condição subsuperficial (Gráficos 1, 2, 4 e 5 do Capítulo 2), fato que, aliado a menores vazões subsuperficiais, permitem maior comprimento de linhas laterais enterradas.

No caso do emissor *JardiLine*, a maior diferença entre linhas laterais superficial e subsuperficial foi 7,78 m (declive de 5% e variação de pressão admissível de 20%). Em primeira análise, esperava-se uma maior diferença entre comprimentos máximos da linha lateral quanto maior a diferença entre as vazões superficial e subsuperficial (Tabela 3 do Capítulo 3), porém, como citado anteriormente, isto não é função apenas da vazão na linha lateral. O expoente de descarga do emissor *JardiLine* é maior que do emissor *TalDrip* em ambas as situações de aplicação.

Os comprimentos máximos simulados de linhas laterais do tubo gotejador D5000 irrigando em condição superficial e subsuperficial, com pressão de entrada de 145 kPa em diversas situações de desnível e variação de vazão permitida, estão apresentados no Gráfico 3.

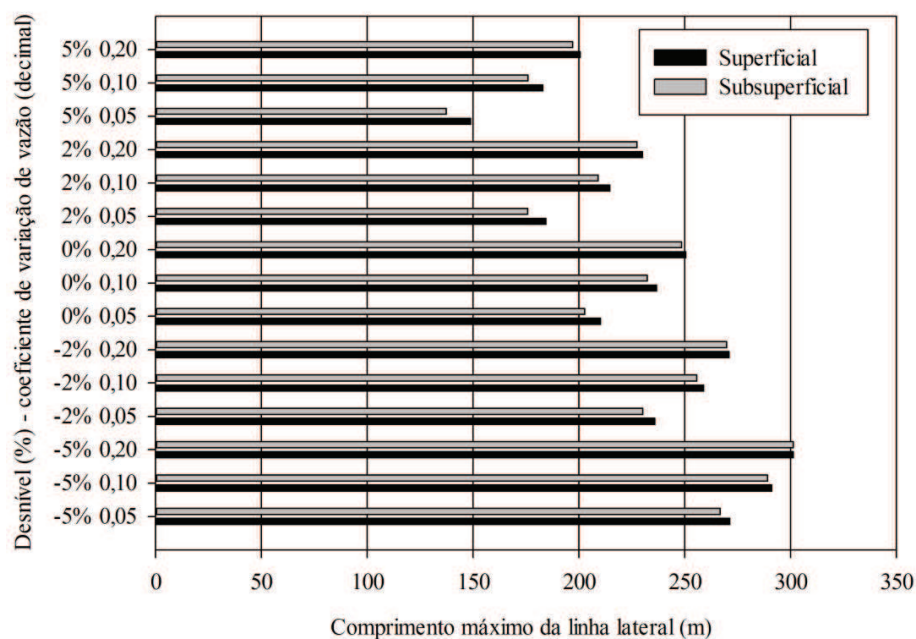


Gráfico 3 Comprimento máximo da lateral do tubogotejador D5000 em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis

Diferentemente do ocorrido para os emissores não autocompensantes, no caso do gotejador D5000, autocompensante, os comprimentos máximos de linha lateral em aplicação subsuperficial são menores. Isso se deve pela combinação da baixa variação entre vazões superficial e subsuperficial, mostradas na Tabela 3, do Capítulo 3, com o aumento do expoente de descarga deste emissor quando em aplicação subsuperficial de 0,1053 para 0,1320, tornando-o menos compensante.

Para um declive de 5% e variação de vazão de 20% e aplicação superficial, obteve-se o maior comprimento de linha lateral, 301,29 m. Na mesma situação de simulação, obteve-se a menor diferença entre comprimentos ao se comparar a vazão subsuperficial com a superficial, apenas 0,07 m.

A maior diferença entre comprimentos foi obtida para aclive de 5% e coeficiente de variação de vazão de 5%, 11,56 m (137,30 m subsuperficial e 148,86 m superficial), situação oposta ao caso dos emissores não autocompensantes TalDrip e JardiLine. Isso se deve à pequena influência da variação da carga de pressão e diferença de nível, sobre a vazão em emissores autocompensantes.

Os comprimentos máximos das linhas laterais do tubo gotejador Hydro PCND em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis estão apresentados no Gráfico 4.

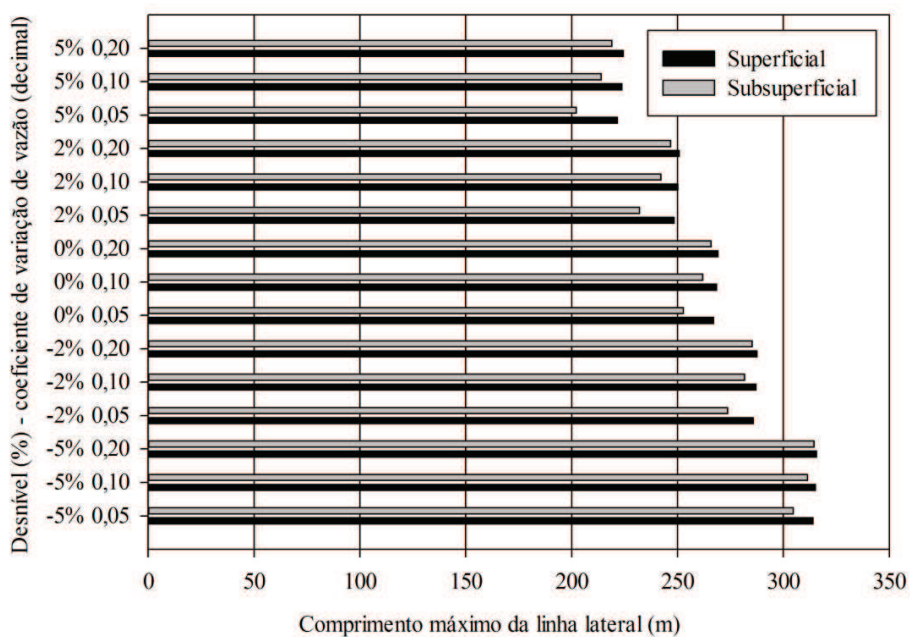


Gráfico 4 Comprimento máximo da lateral do tubo gotejador Hydro PCND em aplicação superficial e subsuperficial com pressão de serviço de 145 kPa para diferentes coeficientes de variação de vazão e desníveis

Assim como ocorrido com o emissor D5000, os maiores valores de comprimento máximo da lateral, nas condições de simulação, foram para o tubo gotejador Hydro PCND, obtidos para a condição superficial.

No caso de irrigação superficial, o comprimento máximo variou de 315,66 m (declive de 5% e variação de vazão permitida de 20%) a 221,72 m (aclive de 5% e variação de vazão permitida de 5%). Já na irrigação subsuperficial, os comprimentos máximos variaram entre 202,16 m e 314,44 m para aclive de 5% e $cv(q)$ de 5% e declive de 5% e $cv(q)$ de 20%, respectivamente.

A menor diferença de comprimentos entre as condições de aplicação fixando os parâmetros de simulação (desnível e coeficiente de variação de vazão) foi 1,22 m, com 5% de declive e variação de vazão de 20%. Em contrapartida, a maior diferença de comprimento foi de 19,56 m, para 5% de aclive e $cv(q)$ de 5%.

4 CONCLUSÕES

No caso de emissores não autocompensantes, o comprimento máximo de linhas laterais é maior na aplicação subsuperficial. Porém, para emissores autocompensantes, a irrigação sob influência de contrapressão causa aumento no expoente de descarga e devido à baixa variação de vazão entre condição superficial e subsuperficial, as laterais superficiais podem ter comprimentos maiores que as subsuperficiais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Design and installation of microirrigation systems**. Saint Joseph, 2003.5 p. (Standards Engineering Practices Data, EP 405.1).

ANYOJI, H.; WU, I. P. Statistical approach for drip lateral design. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.30, n.1, p. 187-192, 1987.

BERNUTH, R. D. von. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 116, n. 2, p. 94-298, 1990.

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

FRIZZONE, J. A. et al. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.278-283, 1998.

GIL, M. et al. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 137, n. 5, p. 287-294, 2011.

MANGRIO, A. G. et al. Hydraulic performance evaluation of pressure compensating (pc) emitters and micro-tubing for drip irrigation system. **Science Technology and Development**, Islamabad, v.32, n.4, p.290-298, 2013.

MANTOVANI, E.C. **AVALIA**: manual do usuário. Viçosa, MG: DEA/UFV; PNP&D/Café/EMBRAPA, 2002.100 p.

NAKAYMA, F. S.; BUCKS, D. A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 24, n.1, p. 77-80, 1981.

OLIVEIRA, A. M. S. et al. Caracterização hidráulica do tubo gotejador Hidrodrip II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.483-486, 2000.

CAPÍTULO 5 Efeito da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial, parte IV: movimento e simulação da frente de umedecimento

RESUMO

Com o intuito de usar a água disponível para irrigação mais eficientemente, a irrigação por gotejamento subsuperficial vem sendo mais utilizada. Deve-se então conhecer precisamente a distribuição de água ao redor dos emissores. Porém, com a possível redução da vazão dos emissores quando em condição subsuperficial, essa tarefa se torna mais difícil. O objetivo deste trabalho foi simular, usando o modelo Hydrus 2D/3D, o comportamento da frente de umedecimento em função da profundidade de instalação do tubo gotejador TalDrip, bem como de sua vazão, sem considerar o fenômeno da contrapressão e o considerando, em três tempos de irrigação, comparando-as com valores reais obtidos em campo. Os cenários apresentavam duas profundidades de instalação dos emissores (0,10 e 0,20 m) e três tempos de irrigação (0,5; 1,0 e 3,0 horas). A simulação utilizando a condição de contorno especial da função característica do gotejamento subsuperficial do *software* Hydrus 2D/3D, que considera a influência da contrapressão sobre a vazão, mostrou-se mais precisa que a condição em que a vazão sem influência da contrapressão a partir do tubo gotejador TalDrip foi considerada.

Palavras-chave: HYDRUS 2D/3D. Modelagem. Irrigação localizada.

ABSTRACT

To use the available irrigation water more efficiently, the subsurface drip irrigation has been widely used. It's needed to know precisely the distribution of water around the emitters. However, with the possible emitter's flow reduction when in subsurface condition, this task becomes more difficult. Thus, the objective of this study was to simulate, using the Hydrus 2D / 3D, the wetting front behavior as a function of the depth of the TalDrip dripline installation as well as its flow, without considering the phenomenon of backpressure and considering it, three times irrigation, comparing them to actual values obtained in field tests. The simulation scenarios presented two emitters installation depths (0.10 and 0.20 m) and three times of irrigation (0.5, 1.0 and 3.0 hours). The simulation using the special boundary condition of the dripper's subsurface characteristic function of Hydrus 2D / 3D, which considers the influence of the backpressure on the flow rate, proved more accurate than the condition in which the flow without influence of backpressure from TalDrip dripline was considered.

Keywords: HYDRUS 2D/3D. Modelling. Trickle irrigation.

1 INTRODUÇÃO

Essa é a quarta parte da pesquisa sobre a influência da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial. Na primeira parte do trabalho, foram mostrados os efeitos da contrapressão sobre a curva característica de quatro emissores, enquanto na segunda, pôde-se verificar a variação de vazão desses emissores em aplicação subsuperficial em um solo franco, em diferentes profundidades de instalação e tempos de irrigação, bem como a contrapressão gerada em cada situação. Já na terceira parte, o impacto no comportamento hidráulico dos emissores em instalação subsuperficial sobre o comprimento máximo permitido de linhas laterais, considerando critérios de uniformidade e topografia, foi avaliado. Agora, é estudada a modelagem e simulação do movimento de água a partir dos emissores subsuperficiais, considerando e não considerando o efeito da contrapressão, em diferentes profundidades de instalação e tempos de irrigação dos quatro tubos gotejadores já avaliados.

A irrigação por gotejamento subsuperficial está se tornando cada vez mais popular por fornecer água, fertilizantes e pesticidas mais eficientemente. Assim, tem sido utilizada em várias culturas (SINGH et al., 2006). O aumento da eficiência de irrigação bem como da eficiência de uso da água é de suma importância, dada a competição por este bem pelas atividades agrícolas, industriais e o uso destinado à população.

Segundo Skaggs et al. (2004), para se ter o potencial completo da tecnologia do gotejamento, require-se a otimização dos parâmetros operacionais disponíveis aos irrigantes, como a frequência e duração da irrigação, a vazão e espaçamento e o local correto de instalação dos tubos gotejadores.

O dimensionamento e manejo correto de sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial requerem o conhecimento preciso da distribuição de

água ao redor dos emissores, ou seja, na zona radicular das plantas, sem molhar a superfície do solo e sem que haja percolação para o lençol subterrâneo (KANDELOUS et al., 2011). Adicionalmente, há de se ter o conhecimento do comportamento da vazão dos emissores, quando enterrados, graças ao fenômeno da contrapressão.

Assim, a simulação numérica pode ser utilizada para se obter as melhores práticas de manejo do gotejamento, tanto no superficial quanto no subsuperficial (COTE et al., 2003).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi simular, usando o modelo Hydrus 2D/3D, o comportamento da frente de umedecimento em função da profundidade de instalação do emissor TalDrip, bem como de sua vazão, sem considerar o fenômeno da contrapressão e o considerando, em três tempos de irrigação, comparando-as com valores reais obtidos em campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Ao final das irrigações realizadas no experimento para determinação da vazão subsuperficial dos emissores, descrito no Capítulo 3, três trincheiras foram abertas ao longo das linhas laterais, apenas do tubo gotejador TalDrip, para medição da distribuição do conteúdo de água no solo a partir dos emissores. As leituras foram tomadas em um formato em grade de 0,05 por 0,05 m (direções X e Y), utilizando um sensor TDR modelo 5TE da Decagon Devices ligada a um leitor em tempo real e *data logger* ProCheck, também da Decagon Devices. As coordenadas do *grid* variaram em X de -0,15 a 0,15 m e em Y de 0 a -0,10 m, sendo a origem no centro do gotejador.

As leituras de umidade volumétrica utilizando a TDR foram realizadas colocando a mesma no solo até que estivesse totalmente coberta, e era aguardado até que o valor mostrado no *data logger* estivesse estável.

A calibração do sensor TDR foi realizada tomando amostras indeformadas em 25 pontos amostrais por toda a área experimental, na camada de 0 – 0,30 m e determinando a umidade gravimétrica das mesmas, bem como suas massas específicas, a fim de se determinar suas umidades volumétricas.

Na escolha de pontos para retirada das amostras para calibração da TDR, buscou-se amostrar partes do solo com diferentes umidades, englobando a faixa que ia do solo seco até o solo úmido, identificados visualmente. Assim, as leituras do conteúdo de água realizadas com a TDR foram corrigidas.

As umidades iniciais (antes da irrigação) em cada tratamento e suas repetições foram tomadas em três pontos não atingidos pela frente de molhamento no perfil aberto, na mesma profundidade em que estavam instaladas as linhas de gotejadores em cada tratamento.

O projeto experimental é mostrado na Figura 7. Nesta figura, estão indicados apenas os tratamentos constituídos pelo tubo gotejador TalDrip, no

qual foram feitas as avaliações do movimento de água a partir do emissor. A distância entre os gotejadores foi de dois metros e as repetições foram representadas pelas áreas de amostragem, onde as trincheiras foram abertas, designadas por retângulos vermelhos na Figura 1.

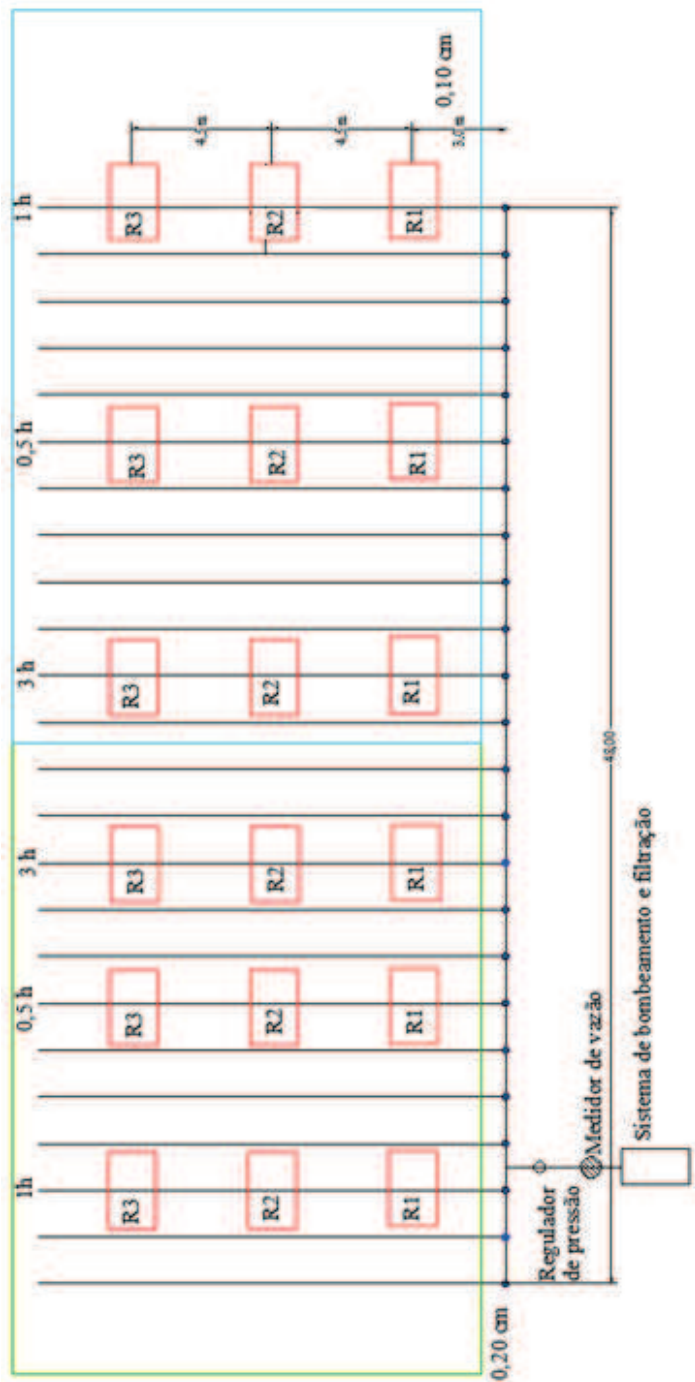


Figura 1 Projeto experimental

Para a simulação do movimento de água a partir dos emissores foram consideradas duas situações: na primeira, foi negligenciado o fenômeno da contrapressão e no segundo caso o mesmo foi considerado. Para tal, o modelo HYDRUS2D/3D foi calibrado utilizando as propriedades físico-hídricas do solo *Yolo Loam* (Tabela 1) obtidas pelo código ROSETTA (SCHAAP; LEIJ; GENUCHTEN, 2001) a partir da análise textural e densidade do solo nas camadas de 0 a 0,30 m e 0,30 a 0,60 m. Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (k_0) informados pelo código ROSETTA para as duas camadas avaliadas foram substituídos pelos valores medidos nas amostras da área, com o objetivo de aumentar a precisão das simulações. O procedimento experimental para obtenção da textura, densidade do solo e condutividade hidráulica do solo saturado, foram apresentados no Capítulo 3. Skaggs et al. (2004) citam que, se uma caracterização detalhada das propriedades hidráulicas é desejada, recomenda-se o foco em medidas da umidade e condutividade hidráulica do solo saturado e que, para a maioria das situações, o código ROSETTA fornece estimativas bastante precisas de umidade residual do solo e dos parâmetros n e α do modelo de Genuchten (1980) da curva de retenção de água pelo solo.

As características físico-hídricas e constantes do modelo da curva de retenção de água pelo solo de Genuchten (1980) estão apresentadas na Tabela 1 do Capítulo 3.

Foi tomada uma geometria “2D geral” em um domínio vertical, já que, durante a irrigação com o tubo gotejador TalDrip, formou-se faixa molhada, portando, um problema de “linha fonte”. Foi considerado apenas o lado direito do perfil, presumindo simetria entre os dois lados. Os elementos da malha de elementos finitos possuíam formato triangular e foi refinada próximo ao ponto em que foram colocados os gotejadores, representados como semicírculo de diâmetro correspondente ao diâmetro externo do tubo gotejador e curvado para o

interior da malha de elementos finitos. Os mesmos foram dispostos a 0,10 e 0,20 m de profundidade, de acordo com os tratamentos.

Nas simulações que foram consideradas a vazão superficial do gotejador, ou seja, sem considerar a influência da contrapressão sobre a vazão, o fluxo de água a partir da fonte linear foi obtido utilizando-se o modelo vazão-pressão com pressão de entrada de 145 kPa.

Durante a aplicação de água, o contorno do tubo gotejador possuía uma condição de contorno de “fluxo variável com o tempo”, calculado em função da taxa de aplicação em um metro de tubulação e a área superficial de um fragmento de tubo de um metro de comprimento (Equação 1).

$$q_{\text{simulação}} = \frac{q_{\text{superficial}}}{2\pi de \text{ 1 m}} \quad (1)$$

em que:

$q_{\text{simulação}}$ = fluxo na área superficial do gotejador em uma seção de um metro de comprimento, m h^{-1} ;

$q_{\text{superficial}}$ = taxa de aplicação em um metro de tubulação, superficial ou subsuperficial, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-1}$;

de = diâmetro externo, m.

Além da condição de contorno de vazão variável na superfície dos gotejadores, foram também assumidas como condições de contorno a drenagem livre na parte inferior do perfil e a condição de fluxo zero nos demais contornos.

No segundo caso, em que foi considerado o fenômeno da contrapressão, utilizou-se a condição de contorno especial, implementada no Hydrus 2D/3D sobre a equação característica de gotejadores subsuperficiais desenvolvida por Lazarovitch, Simunek e Shani (2005), apresentada na Equação 2.

$$q_{\text{subsuperficial}} = q_{\text{ótimo}} (h_0 - h_s)^x \quad (2)$$

em que:

$q_{\text{subsuperficial}}$ = fluxo subsuperficial afetado pelos efeitos da contrapressão, m h^{-1} ;

$q_{\text{ótimo}}$ = fluxo em função da equação vazão-pressão do emissor em aplicação superficial, m h^{-1} ;

h_0 = pressão de entrada da água no emissor, m.c.a.;

h_s = contrapressão, m.c.a., e

x = expoente de descarga do emissor.

Para o uso desta condição de contorno especial, deve-se especificar uma condição de contorno de “fluxo variável com o tempo” ao longo do contorno do tubo gotejador e a pressão de entrada, h_0 , como condição de contorno de “pressão variável com o tempo”. Uma pressão positiva indica período de irrigação, enquanto uma pressão negativa indica período não irrigado.

Os tempos de simulação considerados em ambas as situações foram uma soma do tempo de irrigação do experimento de campo (0,5; 1,0 e 3,0 horas) e metade do tempo que se levou para tomar as leituras de umidade nos três perfis abertos ao longo da tubulação, porém no fim dos tempos de irrigação, os gotejadores receberam condição de contorno de fluxo zero, justificando-se assim a condição de contorno de fluxo variável com o tempo.

Um exemplo de região de simulação criada pode ser vista na Figura 2.

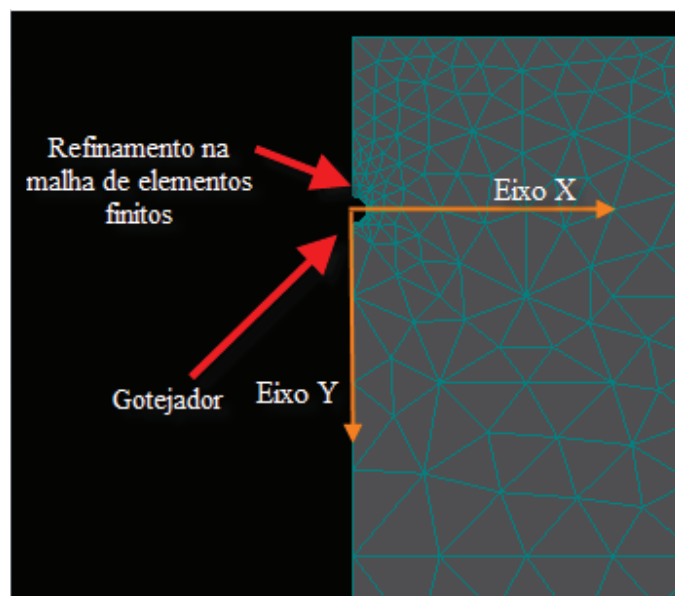


Figura 2 Detalhes na malha retangular de elementos finitos gerada no Hydrus 2D/3D para as simulações do movimento de água a partir de gotejadores enterrados

A diferença entre os valores de umidade observados e simulados foi avaliada pela da Raiz Quadrada Média dos Erros (RQME), calculada pela Equação 3.

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{n}} \quad (3)$$

em que,

$X_{obs,i}$ = valor de umidade volumétrica observada em n igual a i;

$X_{sim,i}$ = valor de umidade volumétrica simulada em n igual a i;

n = número total de pares de dados.

A umidade inicial do solo foi considerada constante em cada cenário de simulação, sendo tomada a média de três umidades volumétricas verificadas nos perfis de solo abertos nas linhas de tubos gotejadores TalDrip, em áreas não atingidas pela frente de umedecimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Raiz Quadrada Média dos Erros (RQME) para umidades volumétricas simuladas e observadas fornece uma medida quantitativa de quão bom foi o ajuste entre os dados de campo e a simulação. A RQME entre os valores de umidade volumétrica observadas e simuladas com vazão considerando a contrapressão e sem considerar a contrapressão, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 Raiz quadrada média dos erros entre a umidade volumétrica observada e as simuladas pelo modelo Hydrus 2D/3D considerando a vazão Considerando a contrapressão e sem considerar a contrapressão do emissor TalDrip

| Profundidade de instalação | Tempo de irrigação | RQME | |
|----------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | | Vazão | |
| | | Considerando a contrapressão | Sem considerar a contrapressão |
| 0,10 m | 0,5 hora | 0,01115 | 0,02629 |
| 0,10 m | 1,0 hora | 0,00921 | 0,03802 |
| 0,10 m | 3,0 horas | 0,00858 | 0,01960 |
| 0,20 m | 0,5 hora | 0,01218 | 0,07047 |
| 0,20 m | 1,0 hora | 0,01270 | 0,05014 |
| 0,20 m | 3,0 horas | 0,01514 | 0,02948 |

Raiz quadrada média do erro foi avaliada para umidade do solo em unidades volumétricas ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Os valores de RQME, na irrigação com vazão considerando a contrapressão em todos os tratamentos, foram inferiores aos obtidos nos tratamentos compostos pela irrigação com vazão sem considerar a contrapressão, o que mostra maior aderência entre os valores observados e os simulados, utilizando a condição de contorno especial do *software* Hydrus 2D/3D para simular esta situação (vazão sob o efeito da contrapressão). Para o caso em que foi negligenciado o efeito da contrapressão, os valores variaram entre 0,01960 a

0,07047, enquanto que para as condições de simulação em que a vazão foi influenciada pela contrapressão, os valores de RQME variaram entre 0,00858 a 0,01514.

Os Gráficos de 1 a 6 apresentam as distribuições de umidade medidas e simuladas para as duas condições de vazão (considerando a contrapressão e sem considerar a contrapressão), em todos os tratamentos aplicados ao emissor TalDrip. Cada gráfico contém contornos preenchidos com códigos de cores que representam as faixas de umidade. O tubo gotejador estaria localizado na coordenada 0 m para X e -0,10 m para Y no caso do tubo gotejador enterrado a 0,10 m e na coordenada 0 m para X e -0,20 m para Y no caso do tubo gotejador enterrado a 0,20 m.

No Gráfico 1, tem-se os contornos gerados pelas observações de umidade volumétrica no tratamento constituído pelo emissor TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 0,5 hora, bem como suas simulações.

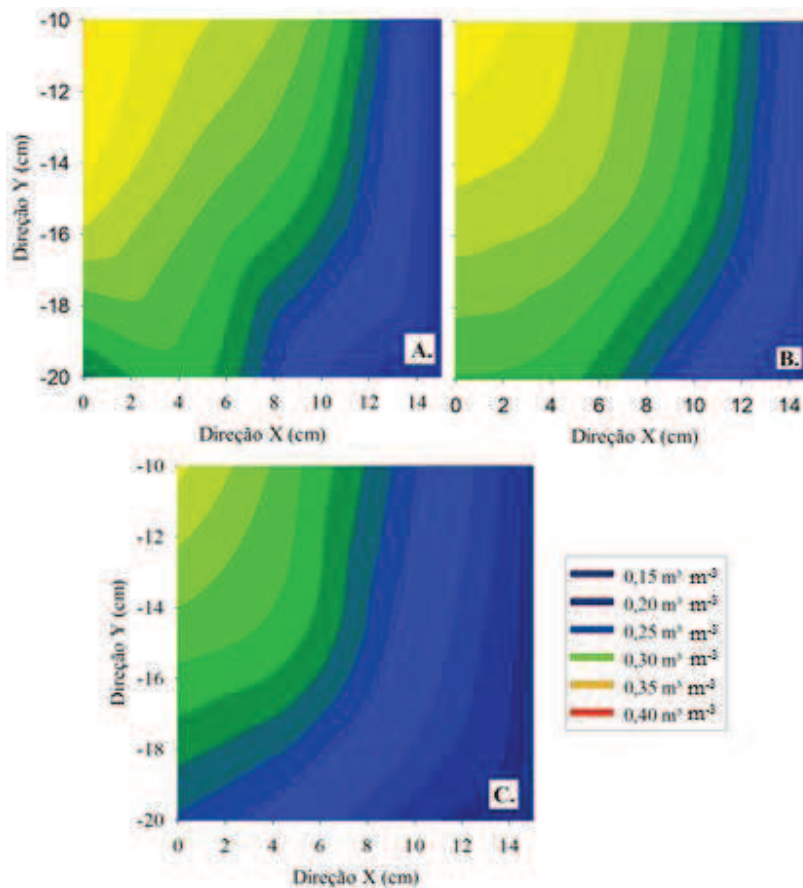


Gráfico 1 Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 0,5 hora

Os valores de RQME para as simulações deste tratamento foram 0,01115 e 0,02629 para condição subsuperficial e superficial, respectivamente. O contorno observado (Gráfico 1A) apresentou uma distribuição mais vertical e assimétrica. Pode-se notar no Gráfico 1C uma menor faixa com maior umidade volumétrica próxima ao emissor (coordenada 0, -10 cm), mesmo ao se esperar

um maior fluxo nesta simulação, já que a vazão sem considerar a contrapressão é maior que a vazão que a considera.

Os perfis de umidade volumétrica observada e simulada em condição subsuperficial e superficial são apresentados no Gráfico 2 para o tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m irrigando durante uma hora.

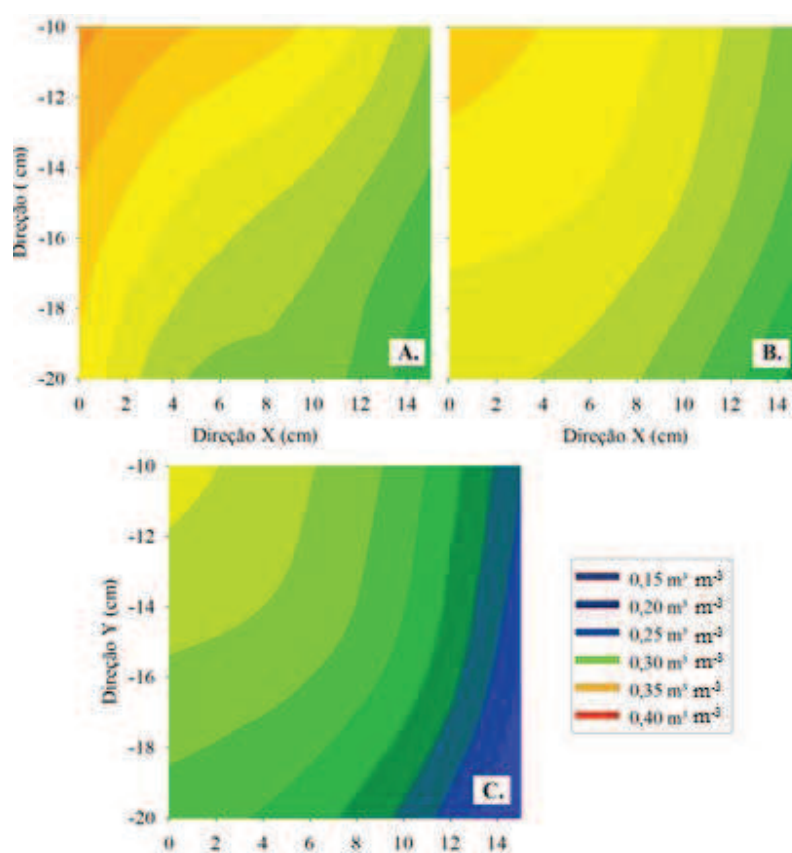


Gráfico 2 Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 1 hora

Os Gráficos 2A e 2B apresentam maior umidade no perfil e menos faixas de umidade comparativamente ao que foi obtido para a simulação superficial (Gráfico 2C), o que mostra maior aderência dos valores observados aos simulados com condição subsuperficial, o que é confirmado pelos valores de RQME obtidos, 0,00921 e 0,03802.

Os contornos gerados pelas observações de umidade volumétrica no tratamento constituído pelo emissor TalDrip enterrado a 0,10 cm e tempo de irrigação de 3 horas, bem como suas simulações são mostrados no Gráfico 3.

Neste tratamento, foi obtido o menor valor de RQME dentre todos os tratamentos, 0,00858, na simulação da condição subsuperficial, e também a menor RQME dentre os tratamentos em que se considerou a condição superficial.

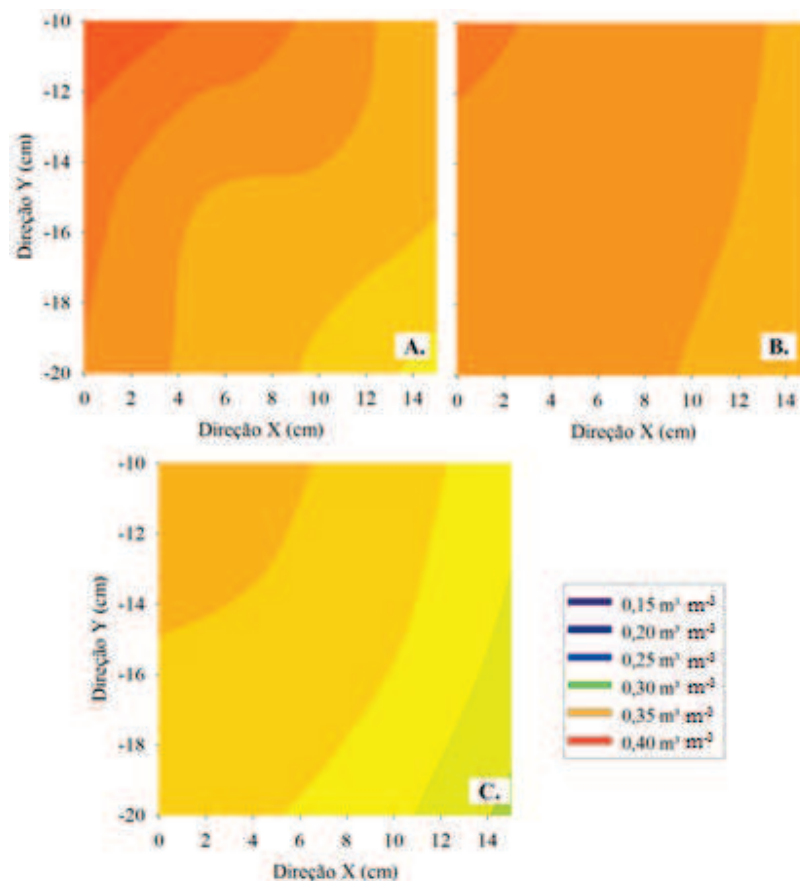


Gráfico 3 Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 3 horas

Em todos os perfis presentes no Gráfico 3, tem-se a predominância de umidades acima de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, em função do tempo de irrigação considerado ser o de três horas consecutivas, porém, no Gráfico 3C tem-se o perfil menos úmido dentre os três. O perfil do Gráfico 3B apresentou o menor número de faixas, 3, enquanto o perfil observado (Gráfico 3A) foi o mais segmentado.

No Gráfico 4, tem-se o perfil de umidade volumétrica observada e os perfis simulados em condições subsuperficial e superficial após 0,5 hora de irrigação do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,20 m no solo Yolo Loam.

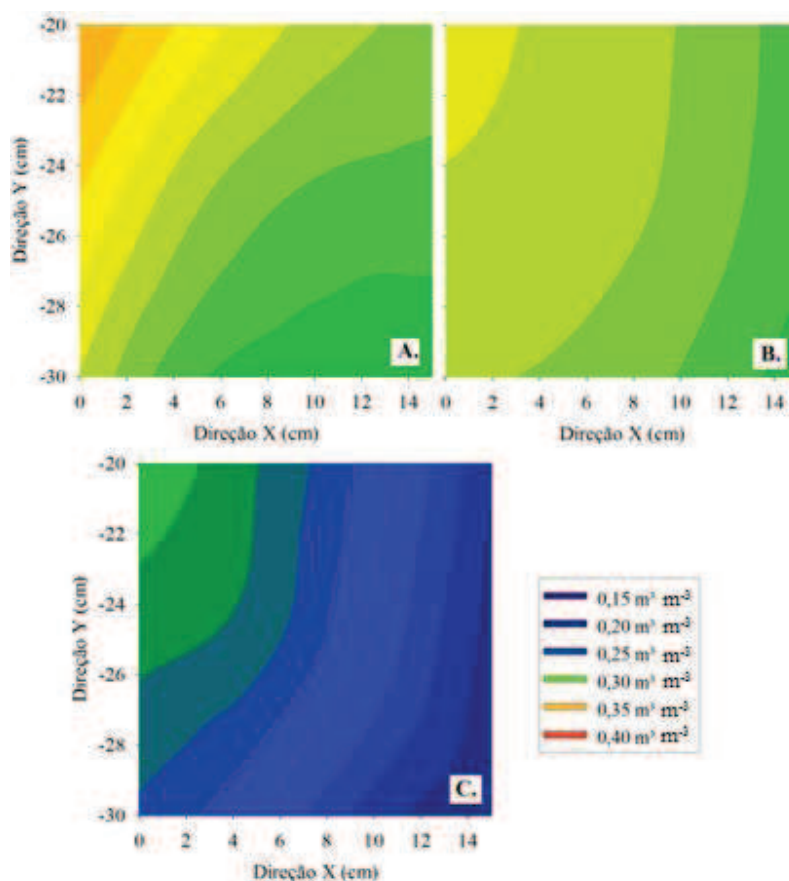


Gráfico 4 Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,20 m e tempo de irrigação de 0,5 hora

A pior aderência entre simulação em condição superficial e os dados observados ocorreu para este tratamento (RQME igual a 0,07047). Os Gráficos

4A e 4B mostram perfis muito mais úmidos ao simulado mostrado no Gráfico 4C. O perfil observado apresenta-se mais segmentado em faixas de diferentes umidades que o perfil simulado em condição subsuperficial, Gráfico 4B, também mais simétrico, característica essa inerente aos dados simulados, pois estes consideraram um solo com características uniformes. Os dados observados têm influência direta da variabilidade espacial do solo.

No Gráfico 5, estão representados os perfis de umidade formados a partir do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,20 m ao irrigar uma hora.

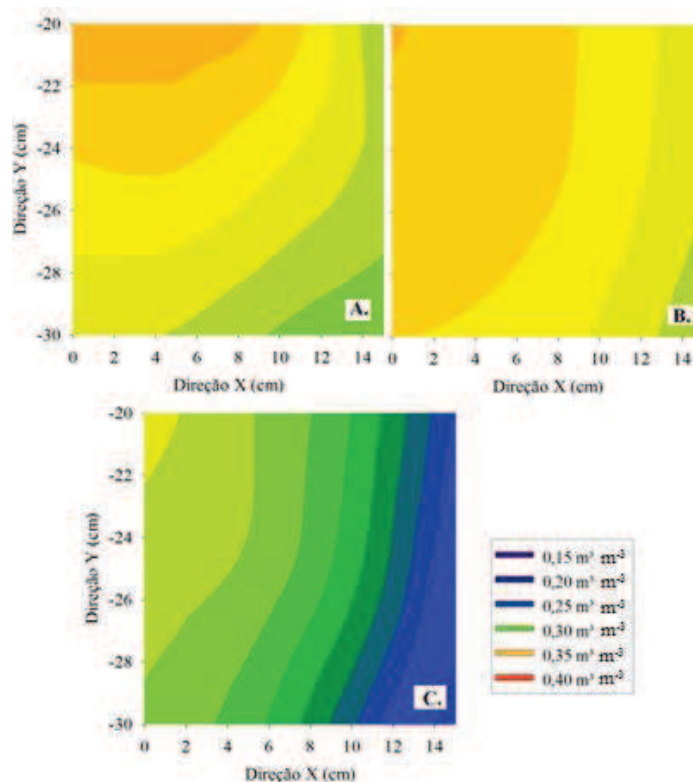


Gráfico 5 Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,20 m e tempo de irrigação de 1 hora

A RQME entre os dados observados e simulados em condição subsuperficial foi 0,01270, enquanto para o caso de simulação em condição superficial foi 0,05014, quase quatro vezes maior. Mais uma vez, nos Gráficos 5A e 5B têm-se perfis mais úmidos que no Gráfico 5C, este, mais segmentado pela maior redução de umidade.

O Gráfico 6 mostra os perfis de umidade simulados e observados para o tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,20 m e irrigando três horas.

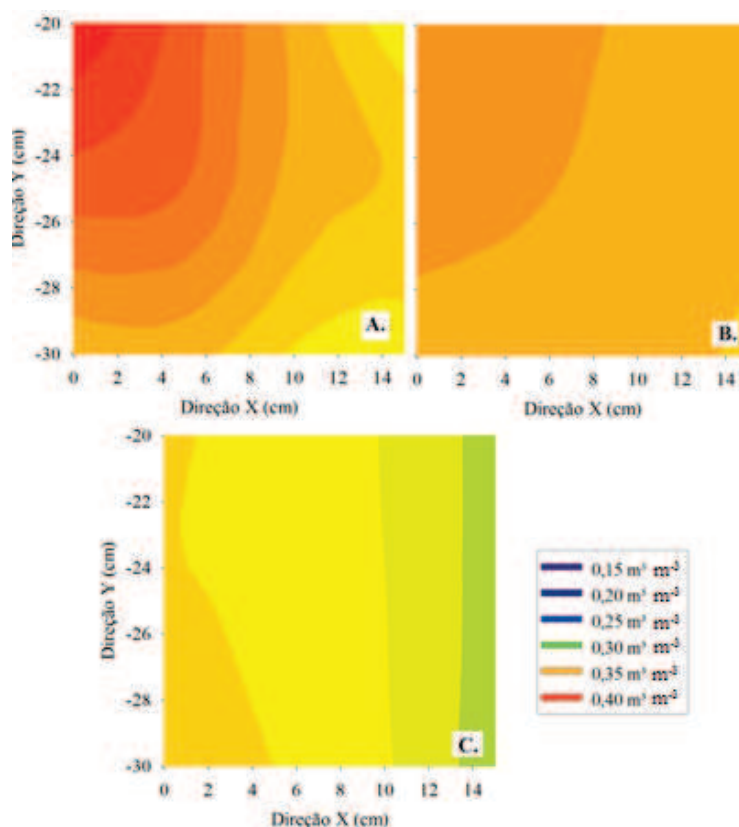


Gráfico 6 Umidade volumétrica observada (A) e simulada com vazão considerando a contrapressão (B) e sem considerar a contrapressão (C) do tubo gotejador TalDrip enterrado a 0,10 m e tempo de irrigação de 3 horas

As RQME calculadas para este tratamento foram 0,01514 e 0,02948, respectivamente para condição subsuperficial e superficial, menor diferença entre tratamentos enterrados a 0,20 m, porém ainda se obteve perfis mais úmidos nos perfis observados e simulados à condição subsuperficial.

No geral, obtiveram-se menores umidades volumétricas nas simulações realizadas com vazão superficial. Isso pode ser explicado pelo fato de que em solos com baixa condutividade hidráulica ou em simulações com altas taxas de aplicação, uma pressão positiva substancial pode aparecer em volta do tubo gotejador com a saturação, assim, o fluxo de água diminui, ao invés de permanecer constante (Skaggs et al., 2004). Ao se utilizar a condição de contorno especial, essa dinâmica é tratada com melhor precisão pelo software, gerando assim, resultados mais comparáveis aos valores observados.

Kandelous e Simunek (2010) estudaram soluções numéricas do movimento de água em um sistema de gotejamento subsuperficial em condição de laboratório e campo usando o Hydrus 2D em um solo franco argiloso e em sua avaliação de umidade volumétrica simulada, obtiveram RQME que variaram entre 0,011 e 0,045 para condição de campo, e 0,012 e 0,035 para o experimento em laboratório, valores próximos aos obtidos neste experimento. Os autores concluíram que o Hydrus 2D teve boa performance ao predizer o movimento de água em seu experimento.

4 CONCLUSÕES

A simulação utilizando a condição de contorno especial da função característica do gotejamento subsuperficial do *software* Hydrus 2D/3D, que considera a influência da contrapressão sobre a vazão, mostrou-se mais precisa que a condição em que a vazão sem influência da contrapressão a partir do tubo gotejador TalDrip foi considerada.

REFERÊNCIAS

COTE, C. M. et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. **Irrigation Science**, New York, v. 22, n. 3/4, p. 143-156, 2003.

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

KANDELOUS, M. M. et al. 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.

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, n. 7, p.1070-1076, July 2010.

LAZAROVITCH, N.; SIMUNEK, J.; SHANI, U. System-dependent boundary conditions for water flow from a subsurface source. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 69, n. 1, p. 46-50, Jan. 2005.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; GENUCHTEN, M. T. van. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 251, n. 3, p. 163-176, Mar. 2001.

SINGH, D.K. et al. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 83, n. 1/2, p.130-134, May 2006.

SKAGGS, T. H. et al. 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.