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

**Protótipos e avaliação de emissores para irrigação localizada
subsuperficial**

Wanderley de Jesus Souza

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

**Piracicaba
2012**

Wanderley de Jesus Souza
Engenheiro Agrícola

**Protótipos e avaliação de emissores para irrigação localizada
subsuperficial**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

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

**Piracicaba
2012**

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

Souza, Wanderley de Jesus

Protótipos e avaliação de emissores para irrigação localizada subsuperficial / Wanderley de Jesus Souza. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
100 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Inovações tecnológicas 2. Intrusão 3. Irrigação localizada 4. Irrigação por gotejamento
5. Sistema radicular I. Título

CDD 631.7
S729p

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

A meus queridos pais JOSÉ LEOCÁDIO & MARIA DORES, quem tanto amo, pelo carinho, apoio e educação a mim concedidos.

Às pessoas que em mim depositaram confiança para realização desta obra.

A todos que tentam cada vez mais edificar um mundo melhor.

Aos futuros Engenheiros que desejam se ingressar na Ciência de inovação.

(DEDICO)

A meu filho IGOR, que tanto amo sem restrições.

(OFEREÇO)

AGRADECIMENTOS

A Deus que se faz onisciente e onipresente em toda minha vida.

Aos professores Tarlei Arriel Botrel e Rubens Duarte Coelho pela orientação seguida de sugestões, dedicação, ensinamentos, e, acima de tudo, pela grande amizade que construímos.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” / USP, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro.

Aos Professores Dr. José Antônio Frizzzone, Dr. Marcus Vinícius Folegatti, Dr. Rubens Coelho, Dr. Sérgio Nascimento Duarte, Dr. Tarlei Arriel Botrel, pelos ensinamentos, que sempre serviram como valiosas ferramentas de auxílio para desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Leonor Rodrigues Sinobas, Raul Sánchez e María Gil, pelas valiosas contribuições em parte desta pesquisa, desenvolvida na Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos/Universidad Politécnica de Madrid.

A todos meus amigos pelos valiosos momentos em comum.

Aos funcionários e professores da ESALQ/USP, pela dedicação e presteza.

A todos que ficaram no anonimato e que contribuíram direta ou indiretamente para meu crescimento técnico, científico e pessoal.

BIOGRAFIA

Wanderley de Jesus Souza, nascido em 26 de Junho de 1983 na cidade de Sabinópolis - MG. Filho de José Leocádio de Souza e Maria Dores de Jesus Souza. Ainda no ensino médio, escreveu os hinos da Escola Estadual Raimundo Deco, e da Escola Municipal Jucelina Sá, ambas situadas na cidade de Materlândia – MG. Aos 15 anos ingressou na Escola Agrotécnica Federal de São João Evangelista – MG, onde obteve o título de Técnico Agrícola em Dezembro de 2001. Em Maio de 2002, aos 18 anos, iniciou o curso de Graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ. Iniciou a carreira científica com projetos de pesquisa na área de manejo e conservação do solo e da água, desenvolvidos durante a graduação. Realizou estágio na EMBRAPA AGROBIOLOGIA na área de Geoprocessamento. Participou de congressos na área de Ciências Agrárias, com apresentação de trabalhos científicos. Foi professor de Química no colégio Alcance de pré- vestibular na cidade de Nova Iguaçu-RJ. Em Março de 2007, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, concluindo-o em Março de 2009. Em Março de 2009, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, realizando parte da pesquisa na Universidade Politécnica de Madri, Madrid-Espanha, concluindo-o em Março de 2012.

Os objetivos em nossa vida não são alcançados por eventualidade, afinal, toda conquista é fruto de um árduo trabalho, conjugado com fé, empenho e perseverança, pela qual se tem um custo, cuja recompensa é sempre justa e proporcional ao que se paga!

Quantas noites foram mal adormecidas, saudades afogadas, dias difíceis! Mas o tempo passou, as dificuldades foram afrontadas; os problemas resolvidos; e, os objetivos alcançados. Agora posso dizer: Muito obrigado DEUS, fonte de todas as virtudes e senhor de minha história!

Deus criou todas as coisas e colocou os Engenheiros para procurar a inovação; esta é a chave que abre as portas da Ciência! A solução final do problema vem em seguida!

O Autor

SUMÁRIO

RESUMO	15
ABSTRACT	17
LISTA DE FIGURAS	19
LISTA DE TABELAS	21
ABREVIATURAS e SÍMBOLOS	23
1 INTRODUÇÃO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Irrigação localizada e por gotejamento	27
2.2 Aplicações do método de irrigação localizada	27
2.3 Emissor	28
2.4 Aspectos Hidráulicos e de fabricação dos emissores	28
2.5 Teoria para estudo de pressões em tubos cilíndricos	30
2.6 Tensões nas paredes de um tubo cilíndrico	31
2.7 Entupimento em emissores	31
2.8 Irrigação subsuperficial por gotejamento	32
2.9 Vantagens da irrigação subsuperficial por gotejamento	34
2.10 Limitações e soluções para irrigação subsuperficial por gotejamento	35
2.11 Intrusão radicular em irrigação por gotejamento subsuperficial	36
2.11.1 Distribuição radicular da cana-de-açúcar	36
2.11.2 Intrusão radicular e uso de produtos químicos	37
2.11.3 Prevenção da intrusão radicular em irrigação por gotejamento subsuperficial	38
2.12 Entupimento de emissores por partículas sólidas	40
2.13 Qualidade da água para irrigação por gotejamento	40
2.14 Testes hidráulicos e uniformidade de aplicação de água	41
2.15 Manejo da irrigação subsuperficial por gotejamento	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Localização e etapas da pesquisa	45

3.2	Concepção dos protótipos de gotejador	45
3.2.1	Modelo com êmbolo “A”	45
3.2.2	Modelo com oclusão elástica “B”	47
3.2.2.1	Mecanismos de ação	47
3.2.2.2	Descrição detalhada do modelo “B”	47
3.2.3	Modelo com oclusão elástica e sistema protetor “C”	49
3.2.4	Modelo protetor do emissor “D”	51
3.2.4.1	Concepção do sistema com protetor	51
3.2.4.2	Descrição detalhada do sistema protetor	52
3.2.5	Gotejador comercial avaliado “E”	53
3.3	Análise teórica do emissor modelo “C”	53
3.4	Testes e análises dos dados de laboratório	55
3.5	Testes de campo	56
3.5.1	Curva de retenção de água no solo	56
3.5.2	Qualidade da água de irrigação	57
3.5.3	Instalação dos emissores e manejo da irrigação	57
3.5.4	Coleta e análise dos dados de vazão	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Análise teórica do emissor modelo “C”	61
4.1.1	Tensões na parede da membrana	61
4.1.2	Equações de Lamé aplicadas à membrana sob pressão	61
4.1.6	Análise do sistema composto por membrana, tubo e protetor	69
4.1.7	Pressão radial entre as partes constituintes do emissor	72
4.2	Resultados de laboratório	73
4.2.1	Relação vazão versus pressão	73
4.2.2	Uniformidade das vazões e variação na fabricação dos emissores	74
4.2.3	Pressão para funcionamento dos emissores e variação no diâmetro da membrana	76

	13
4.3 Resultados de campo	79
4.3.1 Curva de retenção de água no solo	79
4.3.2 Qualidade da água utilizada	80
4.3.3 Análise temporal das vazões nos emissores ao longo da linha lateral	81
4.3.4 Intrusão de raiz e partículas de solo nos emissores	89
5 CONCLUSÕES	93
6 CONSIDERAÇÕES	95
REFERÊNCIAS	97

RESUMO

Protótipos e avaliação de emissores para irrigação localizada subsuperficial

A intrusão de raiz e partículas de solo em gotejadores instalados na subsuperfície do solo, conduz à redução da uniformidade de emissão de água e compromete as condições ideais de operação e a vida útil do sistema de irrigação. Estes fatos motivaram a realização desta pesquisa, sendo propostos protótipos de emissores, cujas características físicas e funcionais impeçam a entrada de raízes e partículas de solo por sucção dentro dos mesmos, e possibilite a vazão de projeto. Desenvolveram-se quatro modelos de emissores sendo: modelo “A” que utiliza êmbolo; modelo “B” constituído por uma membrana com módulo de Young (MY) de 1000 kPa; modelo “C” constituído por uma membrana com MY de 1000 kPa e protetor da membrana; e, sistema protetor (tubo) do emissor (modelo “D”) no qual se utilizou um gotejador comercial para controlar a vazão. Uma vez que o modelo “A” não apresentou desempenho satisfatório, estudos posteriores com o mesmo foram interrompidos. Em fase de campo instalaram-se os modelos “B”, “C”, “D”, e um gotejador comercial, modelo “E”. Os emissores foram avaliados em laboratório em relação ao coeficiente de variação de fabricação (CVF), coeficiente de uniformidade de emissão da água (CUE) e à curva vazão versus pressão; e, instalados em vasos com cana-de-açúcar e sem cultura, para avaliação periódica quanto à capacidade em obstar a entrada de raiz e partículas de solo, sendo analisados a vazão relativa (QR), o coeficiente de variação da vazão relativa (CVQR), CUE e distúrbio de vazão (DQ). Para o emissor modelo “C” desenvolveram-se Equações que descrevem o comportamento da membrana que o compõe. Os resultados obtidos com a Equação de estimativa da pressão mínima foram próximos dos dados medidos em laboratório. Os emissores “B” e “C” apresentaram altos valores de CVF e CVQR, e baixos valores de CUE. Após o terceiro período de avaliação, notou-se redução na QR do modelo “E”, devido a entupimento por raiz. Dos emissores construídos em laboratório, o modelo “C” apresentou melhor desempenho quanto à variação dos dados de vazão na linha lateral, ao longo do tempo, tendo valores agrupados entre primeiro e terceiro quartil. Após 3 meses (modelo “E”) e 18 meses (modelos “D”) de funcionamento em campo, houve presença de solo e raiz, enquanto os modelos “B” e “C” apresentaram os melhores resultados quanto ao impedimento da entrada de raiz e solo dentro do emissor, sendo este último indicado para estudos mais detalhados em relação à membrana a ser utilizada. O emissor que utiliza membrana e protetor foi adequado para evitar entrada de raiz e solo dentro do mesmo, sendo necessário estudos a respeito da membrana e de um sistema para controlar a vazão. Com as Equações propostas para o modelo “C” serão possíveis futuros estudos que busquem aperfeiçoar o protótipo, podendo ser utilizadas para estimativa da pressão mínima de funcionamento, variação do diâmetro da membrana, e vazão do emissor.

Palavras-chave: Irrigação por gotejamento; Irrigação subsuperficial; Intrusão radicular; Inovação tecnológica; Protótipo de emissores

ABSTRACT

Prototypes and evaluation of emitters for subsurface drip irrigation

Roots and soil particles intrusion in drippers installed in the subsurface soil leads to reduction of the water emission uniformity, and compromise the ideal conditions of operation and the lifetime of irrigation system. These facts motivated this research, being proposed prototypes of emitters whose physical and functional characteristics prevent the entry of roots and soil particles by suction into them, and allow the design flow. Four emitter's models were developed: (i) "A" model that uses piston; (ii) "B" model composed by a membrane with Young's modulus (YM) of 1000 kPa; (iii) "C" model composed by a membrane with YM of 1000 kPa plus a membrane protector; (iv) protector (tube) emitter system ("D" model) in which was used a commercial dripper to flow control. The "A" model study was stopped since it did not present a good performance. In the field stage models "B", "C", "D" and a commercial dripper "E" were installed. In the laboratory stage, emitters were evaluated in relation to the manufacturing coefficient of variation (CVF), the emission uniformity coefficient of water (EUC) and the flow rate versus pressure curve. After that, the emitters were installed in pots with and without sugar cane for periodic evaluation considering the potential to prevent the entry of roots and soil particles into the emitter. Relative flow (QR), variation coefficient of relative flow (CVQR), EUC and flow disturbance (DQ) were analyzed. Equations that describe the behavior of "C" model emitter's membrane were developed. The results obtained with the Equation to estimating the minimum pressure were close to the measured data in laboratory. "B" and "C" emitter's model showed the higher values of CVF and CVQR, and the lower values of EUC. After third evaluation period, reduction in QR for "E" model was observed due to clogging by root. Among the emitters built in the laboratory, "C" model showed better performance in relation to variation of data flow in lateral line, with values grouped between the first and third quartile. After 3 months ("E" model) and 18 months ("D" model) of operation in the field, the presence of soil and roots was observed, while "B" and "C" models showed the best results to avoid the entry of root and soil into the emitter. "C" model was recommended for detailed studies in relation to the membrane which can be used. The emitter that uses membrane plus protector was suitable to prevent entry of root and soil into them needing to studies about it membrane and a system which it's possible to control the flow rate. The Equations proposed for "C" model can be used in: studies to improve the prototype; estimation of the minimum operation pressure; changing in the membrane diameter; and, to estimate the emitter flow.

Keywords: Drip irrigation; Subsurface irrigation; Root intrusion; Technological Innovation; Prototype of emitters

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubo de parede delgada (A), tensões em um elemento da parede (B, D) e tubo de parede espessa (C)	31
Figura 2 - Curva de retenção de água em diferentes solos	44
Figura 3 - Vistas em três dimensões do protótipo modelo "A".	46
Figura 4 - Partes constituintes e funcionamento do emissor modelo "B"	47
Figura 5 - Processo de abertura (sistema ligado) e fechamento do orifício (sistema desligado) pela membrana elástica	48
Figura 6 - Emissor "B" pronto para ser testado em laboratório e campo	49
Figura 7 - Partes constituintes do protótipo modelo "C"	49
Figura 8 - Processo de abertura (sistema ligado) e fechamento do orifício (sistema desligado), pela membrana	51
Figura 9 - Emissor "C" pronto para ser instalado em campo	51
Figura 10 - Partes constituintes do emissor com proteção	52
Figura 11 - Modelo "D" pronto para ser avaliado em campo	53
Figura 12 - Sistema de irrigação em ambiente protegido, com emissores instalados em vasos com e sem cultura	57
Figura 13 - Medidor de vazão: conversor de sinal (A) e sensor magnético (B)	59
Figura 14 - Distância de atuação da tensão (A), tubo de parede grossa (B), e, elemento da parede submetido às tensões σ_a , σ_t e σ_r (C)	61
Figura 15 - Esquema ilustrativo de parâmetros para cálculos das tensões e deformações na membrana	62
Figura 16 - Porção da parede submetida às tensões σ_a , σ_t e σ_r	63
Figura 17 - Parte da membrana para análise das tensões (σ_t) e (σ_r)	64
Figura 18 - Corte transversal da membrana sob pressão	68
Figura 19 - Diâmetros (A) e montagem entre tubo, membrana e protetor (B)	70
Figura 20 - Secção transversal de um tubo interno sob tensão externa	71
Figura 21 - Secção transversal da membrana sob tensão interna	71
Figura 22 - Relação vazão versus pressão para os emissores ("B"), ("C"), ("D"), e ("E")	74
Figura 23 - Relação entre pressão estimada (e_i) e medida (o_i), e vazão dos emissores	78

Figura 24 - Variação do diâmetro interno (Δd_i) da membrana, pressão interna (Δh_i) e velocidade do fluxo (Δv_i) ao longo do comprimento da membrana	79
Figura 25 - Curva de retenção da água no solo utilizado na pesquisa	80
Figura 26 - Vazão nos emissores do sistema “B” com cultura (SBC) e com solo (SBS)	82
Figura 27 - Vazão nos emissores do sistema “C” com cultura (SCC)	83
Figura 28 - Vazão nos emissores do sistema “D” com cultura (SDC) e com solo (SDS)	84
Figura 29 - Vazão nos emissores do sistema E com cultura (SEC) e com solo (SES)	85
Figura 30 – Distúrbio de vazão médio obtido em cada emissor do sistema com solo e cana	89
Figura 31 - Aspectos finais dos emissores em relação à entrada de partículas de solo e raiz, para os emissores do sistema “B” com cana (SBC) e com solo (SBS), sistema “C” com cana (SCC), sistema “D” com cana (SDC) e com solo (SDS), sistema “E” com cana (SEC) e com solo (SES)	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da água para irrigação localizada _____	41
Tabela 2 - Classificações para os coeficientes de variação de fabricação (CVF) pela ABNT (1986) e por Solomon (1984) _____	42
Tabela 3 - Intervalo de coeficiente de uniformidade de emissão (CUE) recomendado segundo topografia local e número de emissores existentes por planta	42
Tabela 4 - Critérios para interpretação do coeficiente “c” de Camargo e Sentelhas	55
Tabela 5 - Resultados das avaliações do coeficiente de variação de fabricação (CVF) e coeficiente de uniformidade de emissão (CUE) com os emissores utilizados na pesquisa _____	76
Tabela 6 - Pressão mínima para funcionamento e características físicas de alguns emissores _____	77
Tabela 7 - Resultados analíticos da qualidade da água utilizada na irrigação _____	80
Tabela 8 - Vazões relativas médias ($QR_{média}$) na linha lateral, coeficiente de variação da vazão relativa (CVQR) e coeficiente _____	87
Tabela 9 - Avaliação visual quanto ao processo de intrusão de raiz e partículas de solo dentro de cada emissor na linha lateral de irrigação para os emissores do sistema “B” com cana (SBC) e com solo (SBS), sistema “C” com cana (SCC), sistema “D” com cana (SDC) e com solo (SDS), sistema “E” com cana (SEC) e com solo (SES) _____	92

ABREVIATURAS e SÍMBOLOS

PVC	-	Poli Cloreto de Vinila
CVF	-	Coeficiente de Variação de Fabricação
CUE	-	Coeficiente de uniformidade de emissão
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IGS	-	Irrigação por gotejamento subsuperficial
kPa	-	Kilopascal
Q	-	Vazão
k	-	Coeficiente de descarga do emissor (adimensional)
π	-	Constante numérica
x	-	Expoente de descarga do emissor
g	-	Aceleração da gravidade
L	-	Comprimento
t	-	Espessura de parede
d_i	-	Diâmetro interno
d_o	-	Diâmetro externo
r	-	Raio da membrana
$\ln$	-	Logaritmo natural
σ	-	Desvio padrão de uma amostra
σ_a	-	Tensão axial
(σ_t)	-	Tensão tangencial
(σ_r)	-	Tensão radial
E	-	Módulo de Young
ν	-	Coeficiente de Poisson
Δa	-	Deformação total na direção axial
Δd	-	Deformação unitária
Δd_i	-	Variação do diâmetro interno
Δd_o	-	Variação do diâmetro externo
d_c	-	Diâmetro entre as partes do emissor no ponto c
p_c	-	Pressão de equilíbrio no ponto c
Θ	-	Ângulo de aplicação da pressão
NMP	-	Número mais provável

q_{min}	-	Média de 25% das menores vazões dos emissores
q_m	-	Vazão média de uma amostra de emissores
DQ	-	Distúrbio de vazão de emissores
QR	-	Vazão relativa
Q_1	-	Vazão obtida no primeiro período de testes
Q_2	-	Vazão obtida no segundo período de testes
p_i	-	Pressão interna
p_0	-	Pressão externa
A_i	-	Área interna
A_e	-	Área externa
F_i	-	Força aplicada internamente
F_e	-	Força aplicada externamente

1 INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento é reconhecidamente uma técnica com diversas vantagens, tais como maior eficiência no uso da água e fertilizantes, necessita menos mão-de-obra; possibilidade de automação do sistema; e, menor incidência de ervas daninhas entre as linhas de cultivo. Por outro lado, além de outros problemas, o entupimento dos emissores é um fator operacional fundamental na escolha e implantação do método.

A irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS) deriva do sistema de gotejamento superficial, sendo constituída por emissores instalados abaixo da superfície do solo, com aplicação da água diretamente na zona radicular da cultura. Este sistema tem acrescentadas as vantagens de utilizar menor quantidade de água, devido à menor taxa evaporativa no início do ciclo da cultura; segurança do sistema de irrigação, com redução dos danos mecânicos causados por animais e máquinas; e, possibilidade de utilizar o mesmo sistema para diferentes culturas (RAJPUT; PATEL, 2009). O entupimento dos gotejadores por raiz e sucção de partículas de solo são os principais problemas operacionais que devem ser confrontados, uma vez que sólidos suspensos na água de irrigação podem ser evitados com um bom sistema de filtragem; partículas biológicas como algas e lodo de bactéria podem ser eliminadas através de injeção de cloro (RESENDE, 2003); e, precipitação química pode ser evitada pela aplicação de ácidos e controle do pH.

O problema de sucção de partículas sólidas vem sendo estudado em algumas instituições brasileiras dentre outras, UNICAMP, UNESP e ESALQ, sendo sugeridas duas formas de evitá-lo: uso de válvulas anti-vácuo nas tubulações; e, gotejadores com dispositivo anti-sucção.

O principal problema encontrado no gotejamento subsuperficial é o entupimento por intrusão radicular nos emissores e na tubulação, o que constitui uma ameaça para o sucesso dos sistemas de médio a longo prazo. Tal problema pode ser ainda mais agravante quando se utiliza a irrigação subsuperficial em culturas de raízes fibrosas (SUAREZ-REY et al., 2006). A prevenção da intrusão de raízes pode ser realizada com emissores impregnados com o herbicida Trifluralina e pela utilização de emissores projetados para oferecer uma barreira física à intrusão. O primeiro caso já existe comercialmente e deve ser avaliado em diversas culturas em longo tempo, e pesquisado formas de reduzir o custo de aquisição, uma vez que

o uso de produtos químicos eleva o custo consideravelmente. Além disso, diversos países, principalmente na Europa, estão optando por não utilizar a Trifluralina aplicada na água de irrigação, devido a problemas ambientais que podem ser causados por tal produto químico. O uso de barreira física também vem sendo avaliado por alguns autores (HERNANDEZ, 2010; MOSCA et al., 2005), sendo ainda um fator que merece alto grau de estudo. Neste caso o desenvolvimento de protótipos de gotejadores deve ser incentivado nas universidades, buscando baixo custo de aquisição, que seja ambientalmente seguro, e que tenha eficácia na ação de obstar a entrada de raiz e partículas sólidas dentro dos emissores.

A motivação desta pesquisa se deu pelo fato de a obstrução de gotejadores enterrados serem de caráter problemático e irreversível. Desta forma, o objetivo foi desenvolver protótipos de emissores cujas características físicas e funcionais possam impedir a entrada de raízes e partículas de solo dentro dos mesmos, e possibilitar a vazão de projeto em sistemas de irrigação subsuperficial localizada. O desenvolvimento do trabalho foi baseado nas seguintes hipóteses:

Um sistema de proteção por tubo pode oferecer uma barreira suficiente para obstar a entrada de raiz em gotejadores, não havendo água, solo e nutrientes dentro do protetor; e, um mecanismo mecânico-hidráulico para abertura e fechamento da saída de água do gotejador pode evitar a entrada de raiz e partículas de solo dentro do mesmo, sendo o mecanismo hidráulico realizado pelo acionamento e desligamento do sistema de irrigação, e o mecânico por uma membrana elástica cilíndrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação localizada e por gotejamento

A irrigação localizada caracteriza-se, basicamente, pela aplicação da água numa fração do volume do solo explorado pelas raízes, através de gotejadores, tubo poroso ou microaspersores, geralmente com distribuição da vazão pressurizada em curtos intervalos de rega. Tal sistema tem apresentado um crescimento significativo nos últimos anos, ocupando um maior espaço dentro das áreas irrigadas, e se despontado como uma atividade promissora para o desenvolvimento da fruticultura irrigada no Brasil, além de culturas como café e cana-de-açúcar.

No caso da irrigação por gotejamento, a grande vantagem é que a água aplicada na superfície do solo, não molha a folhagem ou o colmo das plantas, além disso, apresenta condições de inspeção do sistema, limpeza, reposição e possibilidade de medição da vazão de emissores e avaliação da área molhada com maior facilidade. As maiores desvantagens são custos iniciais, entupimentos requerendo excelente filtragem da água, e a interferência nas práticas culturais quando as laterais não são enterradas. Portanto, estudos que visem minimizar estes problemas bem como oferecer uma tecnologia de baixo custo devem ser explorados, tendo em vista a necessidade de pesquisas sobre tal assunto no Brasil.

2.2 Aplicações do método de irrigação localizada

Os sistemas de irrigação localizada se apresentam de forma eficiente no fornecimento de água às culturas, conforme nos traz a literatura. Com o mesmo, é possível aplicação de produtos químicos e fertilizantes, e automação do sistema. Por outro lado, suas principais limitações são os riscos de obstrução parcial ou total dos emissores, principalmente quando se trata de gotejamento, e o elevado custo inicial, (SAAD, 1993). Inicialmente a aplicação deste método se deu para culturas altamente produtivas e em pomares implantados em regiões de escassez hídrica. Entretanto, atualmente a utilização deste sistema pode ser encontrada para várias culturas mesmo em regiões onde a água não é escassa (HOLZAPFEL et al., 1990).

A expansão da irrigação localizada se deve às vantagens que são oferecidas em relação a outros sistemas como é o caso da maior produtividade por volume de

água consumido, possibilidade do uso de água salina, redução de mão-de-obra e custos com energia. Os sistemas estão cada vez mais, voltados para o mercado exigente que requer menores custos de implantação e manutenção, e que satisfaçam as condições de projeto. Para tanto, estudos sobre novos modelos de emissores, buscando reduzir as limitações do método devem ser conduzidos.

2.3 Emissor

O emissor é um dos principais componentes em um sistema de irrigação, responsável pela liberação da água em quantidades pré-determinadas pelo projetista, para atender as necessidades da cultura. De acordo com Schmidt (1995), os emissores utilizados em irrigação por gotejamento podem ser classificados em função do princípio de funcionamento tendo-se os gotejadores com câmara de vórtice simples; gotejadores de longo percurso que é o caso dos labirintos e microtubos e os gotejadores com orifício de saída (orifício simples, saída dupla, membrana com orifícios). Em relação à forma de conexão com a tubulação lateral, existe o tipo “in line”, que são extrudados, ou seja, inseridos no tubo de polietileno durante o processo de fabricação, e “on line” que são inseridos em tubos de polietileno, após perfuração do mesmo, alocados em diferentes distâncias, ficando a escolha de vazão de projeto e espaçamento por conta do projetista. Ambos podem ser normais ou auto-reguláveis pela compensação de pressão.

2.4 Aspectos Hidráulicos e de fabricação dos emissores

Vermeiren e Jobling (1997) relatam que os emissores se caracterizam do ponto de vista hidráulico, pela pressão de serviço, variação desta pressão e vazão nominal. Sistemas de irrigação por gotejamento que operam com pressões mais elevadas, em cujo gotejador ocorre alta perda de carga, oferece maior uniformidade de vazão (MAYERS; BUCKS, 1972).

A uniformidade de aplicação da lâmina em sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial é afetada pelos seguintes fatores: variação de fabricação dos emissores, variabilidade hidráulica de declive na unidade de irrigação e perda de carga na tubulação, sensibilidade do emissor a pressão e variação da temperatura, e entupimento dos emissores (RODRIGUEZ-SINOBAS et al., 1999). Em estudos de

distribuição da água em unidades de irrigação normalmente não consideram os dois primeiros fatores mencionados, conseqüentemente, a variabilidade final de aplicação da água dependerá tanto da variabilidade de fabricação quanto da variabilidade hidráulica (GIL et al., 2008). A variabilidade de fabricação dos emissores é tanto maior quanto menos tecnificado for o processo construtivo; a variabilidade hidráulica pode ser reduzida utilizando emissores com baixa sensibilidade de variação de vazão com a variação da pressão.

De acordo com Keller e Karmeli (1975), a relação potencial entre perda de carga e vazão em orifícios, pode ser aplicada em irrigação localizada para obtenção da vazão dos emissores, em que a variação da vazão é obtida pela variação da pressão, conforme eq. (1).

$$Q=k.H^x \quad (1)$$

em que: Q - vazão do emissor ($L\ h^{-1}$); k - coeficiente de descarga do emissor (adimensional); H - pressão de serviço na entrada do emissor (kPa); e, x - expoente de descarga do emissor.

Os valores de k, H, e x, bem como a distribuição da vazão nas linhas de irrigação são afetados pelas variáveis já comentadas neste item, principalmente pela variação na fabricação dos emissores e sensibilidade de variação de vazão em função da mudança de pressão na rede hidráulica, quando se negligencia entupimento e o fator temperatura.

X é variável, e caracteriza o emissor quanto à sensibilidade de variação da vazão em função da variação de pressão, possibilitando determinar o regime de fluxo no emissor, sendo:

- emissores com regime de escoamento laminar: x varia entre 0,8 e 1,0;
- com regime de escoamento turbulento: x varia entre 0,5 e 0,8; e,
- emissores autocompensantes: x tende a zero;

No caso dos autocompensantes, a vazão não modifica com a pressão, ou apresenta uma variação pequena para uma variação de pressão considerável. À medida em que o valor de x diminui a variação da vazão é menos influenciada pela variação da pressão. Emissores com x maior que 0,2 são considerados não autocompensantes. Nos emissores convencionais, x normalmente varia entre 0 e 1, entretanto, pode ocorrer valores maiores que a unidade em emissores com sistema

de membrana elástica utilizada para regular a passagem da água. Neste caso o expoente x é influenciado pela característica física do material.

Importante atenção deve ser tomada, considerando-se a forma física dos emissores. Aqueles autocompensantes possuem uma membrana interna que possibilita dissipação de energia, mecanismo este que possibilita menor variação da vazão. Entretanto, os emissores comuns não apresentam tal mecanismo, portanto, a variação de pressão nestes, torna-se um fator considerável. Em ambos os modelos de gotejador, a variação de vazão em função de entupimentos é um fator limitado pela qualidade da água utilizada, tendo em vista que o diâmetro de saída é pequeno, mas, que pode ser evitado com um bom sistema de filtragem. Em se tratando de gotejamento subsuperficial, o entupimento pela entrada de raiz e sucção de partículas sólidas não deve ocorrer, uma vez que o controle é dificultado técnica e economicamente, por se tratar de linhas laterais enterradas, sendo indispensável emissores com dispositivos que evitem tais problemas.

2.5 Teoria para estudo de pressões em tubos cilíndricos

A forma cilíndrica é uma das mais variadas que existem dentre os tipos de recipientes. Os cilindros podem ser fechados, para serem utilizados, por exemplo, para armazenamento de fluido; e, abertos utilizados para conduzir fluidos, como no caso das tubulações, composto por diâmetro adequado, rugosidade e determinada resistência a pressão. Este último fator pode ser estendido para o caso de estudos com membrana elástica e tubos de polietileno.

Além de outros fatores, como corrosão e abrasão, os tubos podem estar expostos a variação de pressão interna e externa, portanto, para que se utilize o material adequado com dimensão correta, em fase de projeto, devem-se considerar também, os esforços mecânicos solicitados, incluindo-se nestes, os efeitos da pressurização do fluido no comportamento dimensional da espessura das paredes do tubo.

Os tubos podem ser de parede delgada ou grossa, considerando-se o primeiro caso quando o quociente entre a espessura (t) da parede e o diâmetro interno (d_i) do tubo for $\leq 1/15$ conforme eq. (2), e para o segundo caso, quando a mesma relação entre diâmetro e espessura for $> 1/15$. Sendo realizadas tais considerações, o possível erro no dimensionamento é $\cong \leq$ a 5% (HEARN, 1997).

$$\frac{t}{d_i} \leq \frac{1}{15} \quad (2)$$

2.6 Tensões nas paredes de um tubo cilíndrico

As teorias de deformação estão diretamente relacionadas a disciplinas da área de Engenharia, interligando a mecânica dos materiais e a Engenharia de irrigação, podendo ser aplicadas em projetos de gotejadores compostos por membrana e tubo. Pela Figura 1 pode ser visualizado um tubo de parede delgada com comprimento L , diâmetro interno d_i e externo d_0 e espessura t . Observa-se também um tubo de parede espessa, e as tensões normais na parede dos respectivos tubos.

Figura 1 - Tubo de parede delgada (A), tensões em um elemento da parede (B, D) e tubo de parede espessa (C)

Fonte: Adaptado de Recipientes [...]

Uma vez que o tubo esteja submetido a uma pressão interna p_i , e externa p_0 , as paredes suportam esforços, os quais podem ser caracterizados em um sistema de três tensões normais entre si, conforme Figura 1B, onde se concebeu um elemento A da parede do tubo, sendo estas a tensão axial (σ_a), tensão tangencial ou circunferencial (σ_t) e tensão radial (σ_r).

Em estudos que envolvem tubos de paredes delgadas, considera-se atuação de σ_t e σ_a , uma vez que σ_r é desprezível, enquanto em tubos de paredes grossas, se considera atuação das três tensões em conjunto (HEARN, 1997). Neste caso, o tubo pode estar submetido à pressão interna p_i , ou externa p_0 , ou ambas ao mesmo tempo.

2.7 Entupimento em emissores

Em sistemas de gotejamento, um grande desafio à ciência, é erradicar o problema de entupimento dos emissores, isso se torna ainda mais complexo quando se trabalha com sistemas subsuperficiais. Para tanto, na tentativa de garantia de uniformidade de aplicação da água, geralmente se utiliza tratamentos químicos por meio de cloração e produtos que inibem o crescimento radicular no interior do emissor, e físicos com a utilização de filtros. O potencial de entupimento para emissores superficiais é dependente de fatores como: qualidade da água, velocidade do fluxo, características físicas de obstrução do emissor e diâmetro mínimo que comporte a passagem da água (FARIA, 2002), estando este último na faixa de 0,30 mm a 1,00 mm e maior que 2,00 mm para emissores de baixa e alta vazão, respectivamente. Para emissores que operam na subsuperfície, além dos fatores mencionados, a susceptibilidades ao entupimento está relacionada aos aspectos construtivos que o os mesmos apresentem para evitar o intrusionamento de raiz e partículas de solo.

De acordo com Bralts et al. (1987), existem cinco situações de entupimentos dos emissores: parcial que afeta uma porção de emissores igualmente; parcial que afeta todos igualmente; completo afetando uma porção específica; completo afetando todos igualmente; parcial e completo. Em pesquisas realizadas com entupimentos decorrentes de partículas sólidas na malha hidráulica por Coelho et al. (2007), os autores observaram que a obstrução total foi predominante em relação à parcial. O entupimento por partículas e /ou algas e bactérias, geralmente ocorre nas extremidades da linha lateral, sendo a limpeza no final da linha recomendada para este caso. Isso é válido para sujeiras provenientes da água de irrigação, por problemas de filtragens e /ou crescimento de algas, o que não deve ocorrer. Por outro lado, entupimentos causados por intrusão radicular, podem ocorrer de maneira geral, comprometendo todo o sistema de irrigação.

2.8 Irrigação subsuperficial por gotejamento

A irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS) pode ser definida como o sistema em que da água geralmente é aplicada diretamente na região de maior concentração radicular da cultura, através de emissores com baixa intensidade de aplicação. O sistema possibilita provimento de água às culturas pela aplicação de

um baixo volume diretamente na zona radicular, reduzindo perdas de água nos sistemas de cultivo (PARKES et al., 2010), enquanto uma porção superficial do solo é mantido relativamente seca. Este é o método de irrigação mais recente, no qual deve ser considerado a estrutura e textura do solo e o desenvolvimento do sistema radicular da cultura (RAJPUT; PATEL, 2009). A utilização de sistemas de irrigação por gotejamento, tanto superficial quanto subsuperficial exige uso de cabeçal de controle contendo, inclusive, válvulas reguladoras de pressão e anti-vácuo. Em uma avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento realizada por Souza et al. (2006), os autores concluíram que a presença de reguladores de pressão no início das linhas de derivação afetou, de maneira positiva, a uniformidade de distribuição de água nos sistemas avaliados.

Em IGS se aplica água com ou sem produto químico por meio de determinado emissor, a uma determinada profundidade no solo, geralmente sob alta frequência de aplicação. Tal sistema representa uma evolução no processo de aplicação de água às culturas, pensando nisso, diz-se que há uma tendência de aumento do interesse na implantação desta técnica, em função da possibilidade do aumento de produção, redução dos danos mecânicos ao sistema, bem como otimização no uso de nutrientes e da água.

A primeira instalação de sistema de irrigação subsuperficial ocorreu na década de 60, em Israel (MARQUES et al., 2006), e vem sendo estudada e utilizada nos Estados Unidos nos últimos 40 anos, sendo adequada para a maioria das culturas, em particular para frutas e vegetais de alto valor, bem como para paisagismo (SUAREZ-REY et al., 2006). A maior difusão deste sistema tem ocorrido nas regiões em que o balanço hídrico no solo apresenta saldo negativo, e também em locais sob condições climáticas determinantes de grande evapotranspiração, como o oeste dos EUA e Israel. Em locais onde se tem alto consumo de água pelas culturas, e o aumento da quantidade de água aplicada pela irrigação é necessário, como em regiões áridas e semi-áridas, recomenda-se o uso de IGS (TABATABAEI; NAJAFI, 2007).

No Brasil o uso de IGS pode ser viável em algumas regiões onde se tem alta taxa evaporativa, neste caso, além da aplicação da água natural, torna-se importante estudos que busquem novas tecnologias para uso de água residuária respeitando o meio ambiente, no sentido de aproveitamento de águas com qualidades inferiores. No processo de colheita mecanizada de culturas como cana-

de-açúcar, por exemplo, quando se utiliza irrigação por gotejamento pelo método superficial, é necessário remover o sistema para entrar com máquinas na área, enquanto com uso de IGS, esta tarefa não é necessária, tendo-se aí, mais uma justificativa para estudos a respeito da utilização deste último método.

2.9 Vantagens da irrigação subsuperficial por gotejamento

A utilização de IGS facilita os tráfegos e os tratos culturais. Com este sistema a água pode ser aplicada uniformemente com alta frequência, comparado com irrigação por aspersão e sulco, entretanto, este potencial não é apenas tecnológico, uma vez que depende também do projeto, instalação, operação e manutenção (MAY; HANSON, 2007). De acordo com Singh et al. (2006), pesquisas vêm sendo desenvolvidas, comparando IGS com outros sistemas, para diferentes tipos de culturas, sendo encontrados produção sempre igual ou superior quando se utiliza o gotejamento subsuperficial.

Além dos benefícios verificados no sistema de irrigação por gotejamento superficial, se tem no IGS outros que possibilitam despertar grande interesse para seu estudo e utilização. As grandes vantagens de IGS são mencionadas por alguns autores (RAJPUT; PATEL, 2009). Estas correspondem à possibilidade de maior eficiência no uso dos nutrientes aplicados de forma localizada diretamente na zona radicular da cultura, e da água, devido à menor taxa evaporativa; controle de ervas daninha nos espaços entre linhas de cultivo; segurança do sistema de irrigação, com redução dos danos mecânicos causados por animais e máquinas; possibilidade de utilizar o mesmo sistema para diferentes culturas; redução do total de água requerida, pela sua aplicação na região de maior massa radicular das plantas; menor interferência no sistema pelos tratos culturais (capinas, pulverizações etc.) e pela colheita das culturas; percolações desprezíveis de água e sais solúveis abaixo da zona radicular; sistema radicular mais profundo e menores perdas de nitrato abaixo da zona radicular; eliminação do problema de crostas superficiais impermeabilizantes do terreno; aumento da uniformidade de infiltração; e, menor incidência de doenças por evitar o contato da água com as folhas.

IGS pode ser utilizada em diversas culturas, tais como cana-de-açúcar, algodão, melão, batata e numerosas hortaliças, comprovando-se que aumenta a

produção e a qualidade, diminui os custos de produção e se adapta bem a uma ampla variedade de climas e solos (JUAN, 2000).

2.10 Limitações e soluções para irrigação subsuperficial por gotejamento

IGS tem como fator inerente o umedecimento do perfil sem molhar a superfície do solo, dessa forma, a germinação de sementes pode ser comprometida no estabelecimento inicial de algumas culturas, com plantio a determinada profundidade, necessitando em alguns casos, de um sistema alternativo de irrigação como aspersão, na fase inicial. Um dos aspectos mais comumente discutidos em IGS é a profundidade de instalação, em que deve ser considerado: textura e estrutura do solo; e, desenvolvimento e profundidade do sistema radicular da cultura. No sistema de gotejamento subsuperficial é importante estudar a interferência da distribuição da umidade nas propriedades hidráulicas do solo não saturado; a distribuição da água é fortemente afetada pelas propriedades hidráulicas do solo, espaçamento e profundidade das laterais e emissores, e a vazão do emissor (SIMUNEK; KANDELOUS, 2010). O entupimento de emissores, seja de ori

m química, física ou biológica, é o maior problema operacional do sistema de irrigação localizada superficial e subsuperficial, podendo causar redução na vazão e na uniformidade de distribuição da água; em gotejadores enterrados, a sucção de partículas sólidas do solo e intrusão de raízes no gotejador, podem piorar a situação (COELHO et al., 2007).

Quando o pH da água for muito alto, ocorrerá precipitação de substâncias químicas como ferro e carbonato de cálcio. O método que vem sendo utilizado para impedir as obstruções provocadas pela precipitação de CaCO_3 se baseia no controle do pH da água e limpeza periódica do sistema, com ácido clorídrico ou ácido sulfúrico. Já as partículas biológicas como algas e biofilmes bacterianos são eliminadas através de injeção de cloro (RESENDE et al., 2004).

Em uma pesquisa realizada por Souza et al. (2006), com aplicação de hipoclorito de sódio para recuperação de gotejadores entupidos em irrigação com água ferruginosa, os autores concluíram que a vazão média dos gotejadores decresceu gradativamente em todas as doses aplicadas, com o aumento do número de aplicações; e que os melhores resultados foram obtidos com a dose de 150 mg L^{-1} de hipoclorito de sódio em 4 aplicações. O tratamento com 25 mg L^{-1} de

hipoclorito de sódio tem apresentado a melhor relação benefício/custo, sendo o mais econômico e o segundo melhor quanto à uniformidade de irrigação do sistema, o que o torna mais indicado para limpeza de sistemas de irrigação por gotejamento; o tratamento com impacto mecânico constitui uma alternativa para recuperação de sistemas de irrigação por gotejamento em geral.

Uma das diferenças principais entre irrigação localizada superficial e subsuperficial é que no segundo caso, a taxa de vazão do emissor pode ser afetada pelas propriedades do solo (GIL, 2008), além da possibilidade de entupimento por partículas sólidas e raízes. A intrusão de raízes constitui-se em fonte adicional de entupimento, portanto, devem ser estudados emissores com características físicas que impeçam tal problema, possibilitando instalação em culturas como cana-de-açúcar, que apresenta sistema radicular agressivo aos emissores.

2.11 Intrusão radicular em irrigação por gotejamento subsuperficial

2.11.1 Distribuição radicular da cana-de-açúcar

Quando se trata de pesquisas que visam testar emissores quanto à intrusão radicular, estudar a distribuição espacial e temporal das raízes da cultura é importante, pois, as condições de maior risco à entrada de raiz nos emissores possivelmente ocorrerão na região do solo que contenha maior quantidade de raiz.

Dilewijn (1952) relata sobre três tipos básicos de raízes da cana-de-açúcar: raízes superficiais, ramificadas e absorventes; raízes de fixação, mais profundas; e, raízes cordão, que podem atingir até seis metros de profundidade, sendo os dois primeiros mais importantes no que se refere ao intrusionamento ocasionado em emissores de sistema de irrigação. As raízes de cana soca são mais superficiais que as da cana planta, pelo fato de os perfilhos da primeira brotar mais próximos à superfície. Desta forma, quanto maior o número de cortes, mais superficial torna-se o sistema radicular das soqueiras (BACCHI, 1983).

Ao longo do perfil do solo, vários trabalhos foram desenvolvidos abordando a distribuição radicular da cana-de-açúcar. Lee (1926) verificou que a maioria das raízes se encontrava nos primeiros 20 cm do solo, e que 85% se localizavam até 60 cm de profundidade. Jensen (1951) verificou que as variedades diferem pouco na distribuição das raízes, e que todas emitem grandes quantidades próximas à

superfície do solo. Em todos os casos estudados pelo autor, mais de 50% das raízes da planta madura foram encontradas nos primeiros 20 cm do solo.

Em relação à distribuição do sistema radicular ao longo do ciclo da cultura, Inforzato e Alvarez (1957) verificaram que 6 meses após o plantio o sistema radicular ultrapassava 2,10 m. Aos 6 meses foi encontrada a maioria das raízes (63%) até a profundidade de 70 cm, contendo 41% nos primeiros 30 cm. Aos 12 meses as plantas apresentaram grande aumento na massa de raízes em relação aos 6 meses, principalmente nas camadas superiores do solo, sendo encontrados 71% das raízes nos primeiros 30 cm, sendo 61% nos primeiros 20 cm. Aos 18 meses, nos primeiros 30 cm a massa do sistema radicular correspondeu a 66% do total.

2.11.2 Intrusão radicular e uso de produtos químicos

De uma maneira sucinta, pode-se dizer que a raiz procura no solo basicamente água, nutrientes, espaço para crescimento e oxigênio. A intrusão radicular em emissores constitui uma ameaça para o sucesso do IGS a longo prazo, especialmente em culturas de raízes fibrosas (SUAREZ-REY et al., 2006), com penetração da raiz dentro dos gotejadores, local onde se desenvolve ocupando o espaço diametral designado para passagem da água. Este é um sério problema de entupimento, visto que o manejo é mais complicado, comparado ao sistema com linhas de gotejadores instaladas na superfície do solo.

Poucas são as informações científicas disponíveis sobre a suscetibilidade à intrusão radicular em gotejadores enterrados, menos ainda existem, a respeito de gotejadores que possuam mecanismos físicos com a função de obstar a entrada da raiz nos mesmos, portanto, geralmente os irrigantes utilizam produtos químicos com tal finalidade.

Dentre os produtos químicos comumente referidos para criação desta barreira, o herbicida Trifluralina (α , α , α -trifluro-2,6-dinitro-N-N-dipropil-p-toluidina), se apresenta como o de maior referência pela indústria de equipamentos de irrigação, voltada especificamente para irrigação subsuperficial. A Trifluralina incorporada em filtro (BOTÍA et al., 2006) e emissores, nem sempre é economicamente viável em função do alto custo de aquisição, por outro lado, fatores como variedade plantada, manejo da irrigação e características físicas do emissor utilizado, podem determinar

o potencial de ocorrência de intrusão, nos emissores. De acordo com Pizarro (1996), a dose Trifluralina a ser aplicada no sistema de gotejamento subsuperficial para prevenir a obstrução do emissor pelas radículas varia de 0,20 a 0,25 cm³ por emissor, com uma frequência de injeção de 5 a 6 meses. Para Mead (2010), as doses ínfimas do produto comercial a ser aplicadas por ano devem ser de 3,71 kg ha⁻¹. As recomendações citadas na literatura de Trifluralina em massa ou volume do princípio ativo para gotejamento subsuperficial variam de 0,05 g a 0,5 g por gotejador, com periodicidade de 2 a 6 meses variando em função da umidade do solo (DALRI, 2004). Recomenda-se aplicação de Trifluralina por gotejamento subsuperficial com o solo sob baixa umidade, mantendo-se de 1 a 2 dias de turno de rega, devido à sua facilidade de penetração nos poros do solo e adsorção nos sítios de troca de colóides. Em âmbito nacional ainda não existem normas técnicas e/ou comerciais que definem as dosagens e o modo de injeção da Trifluralina em sistema de irrigação subsuperficial, devendo estas ser formuladas.

2.11.3 Prevenção da intrusão radicular em irrigação por gotejamento subsuperficial

A obstrução de emissores por problemas físicos, químicos e biológicos vem sendo estudada e documentada. A penetração de raiz em emissores é um mecanismo de entupimento de origem biológica e ação física (raiz). Existem vários métodos para prevenção da intrusão radicular em irrigação subsuperficial por gotejamento, incluindo a forma de disposição dos tubos gotejadores no campo, manejo da água, tratamento químico e projeto de emissores com dispositivos capazes de inibir a entrada de raiz. Entretanto, poucas pesquisas são conduzidas com avaliação dos métodos em longo prazo. Atualmente, os métodos de tratamento incluem aplicação de um herbicida ou um ácido diluído, ou irrigação com alta frequência.

Tem sido sugerida a injeção de Trifluralina para prevenção da intrusão radicular no emissor (SUAREZ-REY et al., 2006); estes autores, estudando o efeito dos produtos químicos na intrusão da raiz da grama *Bermuda* em emissores subsuperficiais durante dois anos, concluíram no segundo ano que os emissores ficaram livres de raiz quando da aplicação de Thiazopyr (herbicida, produto químico da família das Piridinas, o qual, embora atue de modo muito semelhante às

dinitroanilinas, existem evidências de que este herbicida não se liga à mesma proteína (tubulina) em alta concentração, e o uso de emissores impregnados com Trifluralina. Uma gestão cuidadosa do sistema de irrigação e da dosagem do herbicida é necessária para evitar efeitos indesejáveis, tais como acúmulo excessivo de herbicida próximo ao emissor ou de sua lixiviação pela água.

A irrigação com maior frequência tem como base a hipótese de que as raízes não irão procurar os orifícios dos emissores, mantendo o solo saturado, entretanto, a intrusão pode ocorrer quando o sistema estiver desligado, e esta técnica pode não ser efetiva para culturas que prosperam em vários níveis de umidade do solo (UNIVERSIDADE DE CALIFÓRNIA, 2008). Pesquisas desenvolvidas com cana-de-açúcar não apresentaram diferença de intrusão radicular em emissores instalados sob solo saturado e com déficit hídrico, quando se analisou a vazão relativa (RESENDE et al., 2004). Coelho et al. (2006) estudando intrusão radicular em citros, concluíram que a hipótese de que o sistema radicular sob estresse hídrico seria mais agressivo ao gotejamento enterrado não se confirmou de maneira conclusiva.

De acordo com UNIVERSIDADE DE CALIFÓRNIA (2008), alguns produtores aplicam ácido na água de irrigação mantendo o pH abaixo de 4,0, injetando semanalmente, infelizmente esta prática pode danificar os emissores; outros produtores têm injetado cloro em alta concentração (100 a 400 ppm) após a colheita ou periodicamente, tendo-se alguma redução no problema da intrusão verificada no cultivo de noz, quando da aplicação de ácido na concentração de 100 ppm a cada duas semanas; outros têm utilizado ácido sulfúrico, ou ácido fosfórico a 15 ppm; o cobre que também vem sendo avaliado em IGS com culturas arbóreas, de forma a possibilitar no solo, uma zona impregnada com cobre em volta do emissor, tem sido testado em forma de placa de cobre, com liberação lenta da substância.

Na prática, cloro e ácidos podem ser utilizados como preventivos; os ácidos possibilitam queimar raízes próximas aos emissores, entretanto, necessitam ser aplicados a altas taxas, apresentam custo elevado e não são totalmente confiáveis. Em um campo experimental no Sul do Arizona Cloi e Suarez-Rey (2004) encontraram intrusão radicular em alguns emissores após um ano de pesquisa com “grama” *Bermuda*, onde se injetou ácido sulfúrico em água sob pH abaixo de 6,5.

2.12 Entupimento de emissores por partículas sólidas

Quando o sistema de irrigação não é ventilado adequadamente, as partículas de solo próximas à saída do emissor podem ser carregadas junto com água e ar para dentro deste, pelo efeito do vácuo, ficando presas e entupindo-o efetivamente.

O problema de sucção de partícula sólida é mais crítico no gotejamento subsuperficial que no superficial. Alguns modelos de emissor apresentam um segundo orifício de saída da água, funcionando como orifício de admissão de ar, quando da ocorrência de vácuo; na condição de enterrio estes orifícios podem não ser efetivos. Visando minorar o efeito do vácuo em gotejadores enterrados, algumas empresas vêm investindo no uso de válvulas anti-vácuo e desenvolvendo emissores com característica anti-drenante e anti-sucção de partículas sólidas do solo.

Coelho et al. (2007) simularam a entrada de partículas sólidas na linha de gotejadores, com solos franco-arenoso e franco-argiloso, e avaliaram o impacto na vazão em cinco modelos de gotejadores utilizando gotejadores voltados para cima e para baixo. Os resultados mostraram que a posição de instalação do emissor foi de maior preponderância em relação ao fator textura do solo, e que as diferenças observadas entre modelos relacionava-se com a altura do corpo do gotejador em relação à parede do tubo de polietileno. Os mesmos autores observaram que a obstrução total foi predominante em relação à parcial.

Estudos mostram que o entupimento causado por partículas de solo e/ou algas e bactérias, geralmente ocorre nas extremidades da linha lateral, sendo que a técnica mais recomendada para este caso é a limpeza no final da linha; isso é válido também para sujeiras provenientes da água de irrigação, por problemas de filtragens e/ou crescimento de algas, entretanto, entupimentos por intrusão radicular, podem ocorrer de maneira geral, comprometendo todo o sistema de irrigação.

2.13 Qualidade da água para irrigação por gotejamento

Além do problema de intrusão radicular e sucção de partículas de solo, a qualidade da água deve ser avaliada, uma vez que os emissores utilizados em irrigação por gotejamento são sensíveis a entupimentos de natureza química, relacionado à precipitação de elementos como ferro e manganês; natureza física, como partículas de areia, silte, argila, restos de material plástico e pequenos animais

(formigas, aranhas, ovos de lesmas, etc.); e de natureza biológica, relacionada a bactérias e algas. Embora informações quanto aos fatores que causam o entupimento estejam disponíveis, o controle por medidas preventivas nem sempre tem êxito (CARARO et al., 2006). Manejo e sistemas de filtragem adequados são dentre outras, medidas importantes a serem utilizadas na prevenção de entupimento de naturezas supracitadas. A avaliação metódica do sistema de irrigação e o monitoramento da qualidade da água são essenciais para prevenir o entupimento (NAKAYAMA; BUCKS, 1991).

Para a classificação da água utilizada em sistema de irrigação localizada, em relação a problemas de entupimento devido a parâmetros físicos, químicos e biológicos, podem ser observados os níveis de risco contidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da água para irrigação localizada

Fator de entupimento	Níveis de risco		
	Baixo	Moderado	Severo
Parâmetro físico*			
Sólidos em suspensão	< 50	50-100	> 100
Parâmetro químico*			
Sólidos dissolvidos	< 500	500-2000	> 2000
Ferro total	< 0,2	0,2-1,5	> 1,5
Manganês	< 0,1	0,1-1,5	> 1,5
pH	< 7,0	7,0-8,0	> 8,0
Sulfeto de hidrogênio	< 0,2	0,2-2,0	> 2,0
Parâmetro biológico*			
Pop. bact. (NMP mL ⁻¹)	< 10000	10000-50000	> 50000

Fonte: Nakayama e Bucks (1991)

*Unidade de parâmetros físicos e químicos estão em mg L⁻¹

2.14 Testes hidráulicos e uniformidade de aplicação de água

Ensaio hidráulicos com sistemas de irrigação localizada em laboratório e em nível de campo consistem na determinação das características hidráulicas e análises de seu desempenho (DANTAS NETO et al., 1997), em função dos objetivos da pesquisa. Estas análises podem ser realizadas em uma avaliação temporal, por meio da determinação da vazão relativa (QR) e do distúrbio de vazão (DQ) dos emissores, em função da vazão de projeto; e, espacial pelo coeficiente de uniformidade (CUE) proposto por Karmeli e Keller (1974), coeficiente de variação de fabricação (CVF), e coeficiente de variação da vazão (CVQ) dos emissores.

A boa uniformidade de aplicação da água pelos gotejadores é fundamental no sucesso de um projeto de irrigação, estando intimamente relacionada com a vazão nos emissores, pressão aplicada e dissipada, bem como possíveis entupimentos. O distúrbio de vazão é um parâmetro para avaliação temporal do percentual de vazão que é alterado na saída dos emissores, podendo ocorrer, no caso do emissor subsuperficial, por motivos da presença de raiz, partículas sólidas ou outro fator.

Quanto ao CVF, na Tabela 2 apresentam-se as classificações pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) e por Solomon (1984).

Tabela 2 - Classificações para os coeficientes de variação de fabricação (CVF) pela ABNT (1986) e por Solomon (1984)

Valor do CVF (%)	Classificação da uniformidade
ABN (1986)	
Até 10%	boa
Entre 10% e 20%	média
Entre 20% e 30%	marginal
Acima de 30%	inaceitável
Solomon (1984)	
Até 3%	excelente
Entre 4% e 7%	média
Entre 8% e 10%	marginal
Entre 11% e 14%	ruim
CVF acima de 15%	inaceitável

Quanto ao CUE, na Tabela 3 apresentam-se as classificações com as recomendações pela ASAE (1993).

Tabela 3 - Intervalo de coeficiente de uniformidade de emissão (CUE) recomendado segundo topografia local e número de emissores existentes por planta

Tipo de emissor	Emissor /planta	Topografia	CUE (%)
Pontual	≥ 3	Uniforme ¹	90-95
	< 3	Uniforme	85-90
	≥ 3	Ondulada ²	85-90
	< 3	Ondulada	80-90
Spray	Todos	Uniforme	90-95
	Todos	Ondulada	85-90
Faixa contínua	Todos	Uniforme	80-90
	Todos	Ondulada	70-85

1 Uniforme: declividade < 2%; 2 Ondulado: declividade > 2%.

Fonte: ASAE EP- 405.1 (1993)

2.15 Manejo da irrigação subsuperficial por gotejamento

A etapa de manejo é aquela que vem pós-projeto, constituindo item fundamental para o sucesso na operação de sistemas de irrigação, e não deve ser ignorada, não obstante em muitos casos isto ocorra devido, principalmente, ao baixo custo da água, o que incorre muitas vezes, em excesso de aplicação desta, e alto consumo de energia. Não se pode analisar a agricultura irrigada apenas como aplicação de água no sistema de produção, é importante visar incremento de lucro.

O manejo de IGS pode ser realizado de forma semelhante ao gotejamento superficial, utilizando o meio clima, planta, solo, ou uma combinação dos três.

Via clima pode ser realizado pela reposição da água no solo, consumida pela cultura em determinado turno de rega, ou ainda, por meio do balanço hídrico, considerando todos os fluxos de água que entram e saem do volume de solo explorado pelas raízes. Neste caso, as perdas por percolação profunda, escoamento superficial e consumo de água pelas plantas são componentes de saída, enquanto a irrigação, a precipitação e a ascensão capilar são componentes de entrada.

Via planta pode ser realizado por avaliações do estado hídrico da cultura, utilizando métodos que avaliam: potencial de água nas folhas, temperatura foliar, resistência estomática, grau de turgescência das plantas, fluxo de seiva, dentre outros. Estes métodos são promissores, entretanto, devido à complexidade envolvida e também a falta de informações mais específicas, eles ainda não tem sido usados em grande escala (MARTINS et al., 2007).

Via solo o manejo deve considerar a umidade do solo na região com maior concentração radicular (80% das raízes). Este pode ser efetuado utilizando-se de métodos como sensores eletrométricos e por dissipação térmica, sonda de nêutrons, TDR (reflectometria no domínio do tempo), tomografia computadorizada, atenuação de raios gama, e tensiometria, sendo este último o mais utilizado, talvez devido ao baixo custo e à praticidade no manejo. Em IGS, pode-se adotar o monitoramento na profundidade do emissor. Na instalação em campo, de tensiômetros, ou qualquer outro instrumento de medição ou estimativa da umidade do solo, deve-se escolher um local representativo, uma vez que esses aparelhos refletem medidas pontuais. Quando se utiliza estufa com alocação de tais instrumentos em vasos, estes devem ser distribuídos ao longo da lateral de irrigação, obtendo-se um valor médio de

umidade, uma vez que tais valores são variáveis dependendo da localização de instalação da cultura dentro da casa de vegetação.

Com base na curva de retenção é possível manejar o sistema de irrigação, monitorando a tensão de retenção da água utilizando-se de tensiômetros, e aplicando a lâmina necessária para elevar o solo ao teor de umidade desejado. O momento de irrigar é determinado por um ponto de tensão na curva denominado ponto “crítico” da tensão, cuja umidade se encontra entre a capacidade de campo e ponto de murcha, normalmente na metade entre os dois pontos, quando se trabalha com irrigação por gotejamento. A relação sucção versus umidade do solo geralmente apresenta-se em forma sigmoidal, desde que não se altere o arranjo poroso e a geometria do sistema. Por outro lado, solos desestruturados para cultivos em vasos apresentam curvas diferenciadas quanto à tensão de sucção para determinadas umidades do solo. Na Figura 2 apresentam-se três curvas de retenção típicas para solos sem modificação porosa.

Figura 2 - Curva de retenção de água em diferentes solos

Fonte: Adaptado de: Ward e Trimble (2004)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e etapas da pesquisa

Esta pesquisa foi conduzida no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, e teve uma parte teórica desenvolvida juntamente com pesquisadores da Universidade Politécnica de Madrid-Espanha. Os trabalhos foram divididos em quatro etapas: concepção de protótipos de gotejador; análise teórica sobre um dos modelos de emissor proposto; avaliação hidráulica dos emissores; e, implantação e avaliação de um sistema de irrigação subsuperficial na cultura da cana-de-açúcar.

3.2 Concepção dos protótipos de gotejador

Durante o primeiro e segundo ano de pesquisa foram desenvolvidos alguns modelos de emissores para irrigação localizada subsuperficial, com objetivo de obstar a entrada de raízes, conforme apresentados nas Figuras de 3 a 11. Os protótipos desenvolvidos consistiram de um modelo com êmbolo (A), com mecanismo de ação para obstar a entrada de raiz realizado pelo movimento do êmbolo; modelo com membrana elástica (B), capaz de realizar um mecanismo hidráulico mecânico para inibir a entrada de raiz; modelo com membrana elástica e sistema de proteção da membrana (C); e, um sistema protetor do emissor (D), utilizado para proteger o gotejador da entrada de raiz e solo no emissor. Além dos protótipos desenvolvidos, se utilizou o modelo (E), emissor comercial indicado para irrigação por gotejamento subsuperficial.

3.2.1 Modelo com êmbolo “A”

Na Figura 3 apresenta-se uma visão em três dimensões do modelo “A” com as partes constituintes (tampa vedante, corpo externo e êmbolo).

Este modelo tem o seguinte princípio de funcionamento: a água chega até o emissor através de um microtubo que é conectado em um orifício com diâmetro de aproximadamente 2,0 mm, realizado na tampa vedante. Após passar pela tampa, a água segue por um orifício de 1,0 mm de diâmetro, realizado no sentido longitudinal,

no centro do êmbolo. Em função de uma pressão externa (bombeamento da água), o êmbolo é empurrado juntamente com o diafragma para dentro de uma câmara interna construída no corpo externo. Quando o orifício com diâmetro de 0,5 mm (que foi realizado em sentido transversal no êmbolo) coincide com o orifício do corpo externo, a água sai do emissor umedecendo o solo. Quando a pressão pelo bombeamento é aliviada o êmbolo volta à posição normal em função da elasticidade do diafragma, de forma que a parte maciça do corpo do êmbolo impeça a entrada de raiz.

Figura 3 - Vistas em três dimensões do protótipo modelo "A".

Utilizando-se este modelo, notou-se que a água não estava fluindo por dentro do êmbolo, por ser mais fácil sua passagem por fora deste, entre o êmbolo e o orifício, não ocorrendo o movimento esperado. Além disso, ocorreu formação de vácuo dentro da câmara, impedindo o diafragma de voltar à posição normal, juntamente com o êmbolo. Tais problemas levaram à decisão de optar pelo desenvolvimento de outros modelos de emissores com funcionamento mais adequado, não sendo este utilizado nas avaliações seguintes.

3.2.2 Modelo com oclusão elástica “B”

3.2.2.1 Mecanismos de ação

Na Figura 4 apresenta-se o segundo modelo de emissor desenvolvido, com base em um mecanismo hidráulico-mecânico contendo membrana elástica.

Figura 4 - Partes constituintes e funcionamento do emissor modelo “B”

O emissor apresentado se baseia em um método de ação hidráulico-mecânica que visa obstar a entrada de raízes. A passagem da água da mangueira de polietileno para o solo ocorre através de orifícios realizados na mangueira ao longo de seu comprimento. Estes orifícios são protegidos por uma membrana elástica capaz de esticar e encolher com o aumento e redução da pressão de operação. A membrana envolve a mangueira gotejadora de polietileno nos orifícios realizados na segunda. Com o acionamento do conjunto moto-bomba, aumenta-se a pressão, e a membrana expande, possibilitando a saída da água. Quando o sistema é desligado a mesma volta ao estado inicial, vetando a entrada de raiz no tubo gotejador.

3.2.2.2 Descrição detalhada do modelo “B”

O emissor é composto por duas partes principais: a mangueira de irrigação de polietileno (módulo de Young de 900000 kPa), e uma membrana elástica com

módulo de Young de 1000 kPa, constituída por material de silicone. Para construção utilizou-se uma membrana elástica de silicone para expansão e contração, entretanto, poderia também ser utilizado outro material com tais características. A mangueira de polietileno contém orifícios com 2 mm de diâmetro, por onde a água sai para umedecer o solo em cada planta. A membrana foi dividida em tamanhos predeterminados (para este trabalho utilizou-se comprimentos de 30 mm), diâmetro interno e externo de aproximadamente 7 mm e 13 mm, respectivamente.

Com o acionamento do conjunto moto-bomba, atingindo uma pressão mínima de funcionamento, a membrana se expande, permitindo o fluxo da água para o solo. Quanto maior for o comprimento da membrana, maior a pressão para obter determinada vazão, devido à perda de carga. Quando se desliga o conjunto moto-bomba a membrana contrai, voltando à condição inicial, vetando o orifício da mangueira de polietileno de forma a impedir a penetração de raiz dentro da mesma. Na Figura 5 ilustra-se o processo de expansão e contração da membrana elástica, permitindo a passagem da água com o sistema em funcionamento para um emissor.

Figura 5 - Processo de abertura (sistema ligado) e fechamento do orifício (sistema desligado) pela membrana elástica

Na Figura 6 apresenta-se o emissor “B” pronto para ser testado em laboratório e campo. Este emissor apresenta a membrana exposta, sendo esta uma

característica indesejável para irrigação por gotejamento subsuperficial, que foi corrigida conforme será visto no modelo “C”.

Figura 6 - Emissor “B” pronto para ser testado em laboratório e campo

3.2.3 Modelo com oclusão elástica e sistema protetor “C”

O emissor modelo “C” apresenta o mesmo princípio de funcionamento do modelo “B”, com algumas modificações devido à diferença entre ambos quanto ao aspecto construtivo. Um esquema deste modelo de emissor pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Partes constituintes do protótipo modelo “C”

O processo de construção em torno mecânico é simples, entretanto, difícil de ser mantida a uniformidade na fabricação. Assim, a construção utilizando prototipagem rápida seria indicada. Utilizou-se um tubo de polietileno semelhante ao que se utiliza em sistemas de irrigação localizada e uma membrana elástica de silicone, conforme para o modelo “B”; e, um sistema para proteger a membrana do solo, construído com material de PVC com módulo de Young de 2800000 kPa.

No tubo de polietileno realizaram-se dois furos com 2,0 mm de diâmetro, por onde a água sai para irrigar o solo em cada planta. Tal tubo apresentou diâmetro interno e externo de 5,0 e 7,5 mm, respectivamente.

A membrana foi fixada em um de seus lados na mangueira de irrigação, sobre os orifícios, para evitar que deslize com a pressurização pelo conjunto Moto-bomba. Para este trabalho utilizou-se membranas com 30,0 mm de comprimento, diâmetro interno e externo de 7,0 mm e 13,0 mm, respectivamente.

O protetor foi construído com material de PVC em comprimento de 30 mm, diâmetro interno de 12,0 mm, e externo de 30,0 mm. Para tanto, utilizando um torno mecânico, cortou-se os tarugos perfurou o diâmetro para possibilitar a inserção da membrana sem folga. Conforme pode ser visualizado na Figura 7, no diâmetro interno do protetor realizou-se um rebaixamento de 2,5 mm, deixando um dos lados com 3,0 mm, evitando o deslize da membrana, por estar mais pressionada no tubo, e possibilitando a condução do fluxo para apenas um dos lados do emissor. Não seria necessário um sistema de proteção com diâmetro externo tão grande, entretanto, maiores diâmetros facilitaram o trabalho no torno mecânico.

Verifica-se na Figura 7 que o diâmetro interno da membrana é menor que o externo do tubo, e que o diâmetro externo da membrana é maior que o interno do protetor. Isto foi realizado na intenção de produzir uma pressão de contato entre os três materiais (tubo, membrana e protetor), de forma a evitar a entrada de raiz.

Com o acionamento do conjunto moto-bomba a membrana se expande, pela variação do diâmetro da mesma, permitindo o fluxo da água para o solo. Quanto maior a variação do diâmetro para uma mesma membrana, maior será a vazão do emissor. Quando se desliga o conjunto moto-bomba, a pressão cai para zero e a membrana contrai, voltando à condição inicial, vetando o orifício da mangueira de polietileno de forma a impedir a penetração de raiz dentro da mesma. Na Figura 8 ilustra-se o processo de expansão e contração da membrana elástica, permitindo a passagem da água com o sistema em funcionamento para um emissor.

Figura 8 - Processo de abertura (sistema ligado) e fechamento do orifício (sistema desligado), pela membrana

Na Figura 9 apresenta-se o emissor modelo “C” pronto para ser utilizado em testes de laboratório e campo.

Figura 9 - Emissor “C” pronto para ser instalado em campo

3.2.4 Modelo protetor do emissor “D”

3.2.4.1 Concepção do sistema com protetor

Utilizou-se um tubo de polietileno como estrutura de proteção do orifício de saída de água do emissor (gotejador). A água é aplicada no solo através do emissor,

conectado em um microtubo, que faz a ligação entre o gotejador inserido na linha lateral e o tubo, cortado em comprimento suficiente para manter a extremidade do microtubo livre de solo e água.

A água infiltra no solo com baixa taxa de aplicação, sendo absorvida pelas raízes que permanecem no exterior do tubo, desde que dentro do mesmo não exista solo, nutrientes e água, condições estas, favoráveis para o desenvolvimento de raízes. Isso constitui uma barreira que impede a penetração de raiz e sucção de partículas sólidas para dentro do emissor. Caso o interior do tubo contenha solo, ocorrerá entrada de raízes e/ou partículas de solo no tubo e no microtubo, podendo haver entupimento, o que pode ser analisado medindo-se a vazão e/ou desenterrando o sistema.

Na Figura 10 apresenta-se um esquema do sistema “D” com protetor do emissor. Neste caso poderia ser utilizado apenas um microtubo de pequeno diâmetro como emissor para controle da vazão a aplicar, sendo mais vantajoso em termos de custo, com possibilidade de aplicar vazão uniforme ao longo da linha lateral, a ser controlada em função da variação no comprimento dos microtubos. Entretanto, nesta pesquisa optou-se por utilizar um gotejador autocompensante comercial, inserido na linha lateral para controlar a vazão de saída no tubo protetor, em função da praticidade para avaliação em campo.

Figura 10 - Partes constituintes do emissor com proteção

3.2.4.2 Descrição detalhada do sistema protetor

O sistema é composto por um microtubo de polietileno, com 4 mm de diâmetro interno e comprimento dependente da profundidade do sistema radicular da cultura, conectado a um gotejador de $2,0 \text{ L h}^{-1}$ para controlar a vazão, instalado sobre a

linha lateral, fazendo a ligação entre esta e o microtubo; e, pelo tubo protetor (Figura 10 e 11) de 10 cm de comprimento, podendo ser de comprimento maior. O tubo é vedado em uma das extremidades onde é furado para inserção do microtubo, e colocado na vertical dentro do solo (Figura 11).

Na Figura 11 apresenta-se o modelo “D” pronto para ser instalado em campo.

Figura 11 - Modelo “D” pronto para ser avaliado em campo

3.2.5 Gotejador comercial avaliado “E”

As avaliações de intrusão radicular e sucção de partículas sólidas também foram realizadas utilizando-se um gotejador comercial autocompensante empregado em irrigação subsuperficial, com vazão de $2,0 \text{ L h}^{-1}$. Utilizando-se uma mangueira gotejadora de 13 mm de diâmetro, cortaram-se partes de 20 cm de comprimento, contendo um orifício gotejador em cada, sendo tais partes, vedadas nas extremidades e furados para inserção de um microtubo de 4 mm de diâmetro interno, cuja função é de interligar os emissores enterrados à linha lateral que se encontra sobre o solo

3.3 Análise teórica do emissor modelo “C”

Esta etapa da pesquisa foi desenvolvida no Departamento de Ingeniería Rural de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid-Espanha, e no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” / USP.

Equações que descrevem o comportamento da membrana utilizada no emissor modelo “C” (constituído por sistema de proteção e oclusão elástica) foram propostas, sendo neste caso analisadas as pressões internas exercidas pela água para funcionamento do emissor e a variação do diâmetro da membrana para obter

determinada vazão. Para tanto, verificou-se a relação entre espessura e diâmetro interno da membrana, considerando-a como um tubo cilíndrico elástico de parede grossa. Aplicaram-se as teorias de Lamé para tensões axial, radial e tangencial, as teorias de Clavarino e de Birnie, baseando-se em Timoshenko (1975) e Hearn (1997), para estudo da distribuição de tensões e deformações em tubos de parede com determinada espessura. Utilizando-se das equações propostas, foi possível estimar a variação do diâmetro interno da membrana ao longo de seu comprimento, e a pressão para funcionamento.

A pressão mínima de funcionamento foi estimada pela Equação proposta, e analisada para cinco emissores escolhidos aleatoriamente, adotando-se 0,10 L h⁻¹ como vazão mínima. Além da pressão mínima, estimaram-se outras para vazões correspondentes àquelas medidas em laboratório, para pressões entre 90 e 250 kPa. Na metodologia proposta para estimar as pressões, utilizou-se da Equação que descreve a variação do diâmetro da membrana, e a Equação universal de perda de carga (eq.3). A variação do diâmetro da membrana ao longo do comprimento da mesma foi estimada considerando o fluxo gradualmente variado, com maior variação no centro da membrana, e menor na saída da mesma, onde a perda de carga também é menor. Desta forma, foi possível estimar as perdas de carga (H) ao longo do comprimento (L) da membrana a cada 0,125 mm, considerando-se o fator de atrito (f) e o raio hidráulico (R_h), e tendo-se a perda na saída da membrana proporcional ao quadrado da vazão (q) dividida pela aceleração da gravidade (g).

$$H = \frac{f.L.q^2}{128.\pi^2 g.R_h^5} \quad (3)$$

A precisão das Equações utilizadas foi quantificada pelo coeficiente de correlação de Pearson (r) e interpretada de acordo com Santos (2007); a exatidão foi avaliada pelo índice de concordância (d) de Willmott, Robeson e Matsuura (2011), o qual varia a partir de zero para resultados sem concordância, à unidade, para concordância perfeita, de acordo com eqs. (4) e (5), respectivamente; e, o desempenho do método foi avaliado pelo coeficiente (c) de Camargo e Sentelhas (1997) que sintetiza de forma conjunta o produto dos índices “d” e “r”, interpretado conforme Tabela 4. O valor de “r” indica o grau de dispersão dos pontos em relação à média (erro aleatório), e o valor de “d” indica o grau de afastamento dos dados estimados em relação aos observados.

$$r = \frac{\left(n \sum_{i=1}^n E_i O_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n E_i \right) \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)}{\left\{ \left[\left(n \sum_{i=1}^n (E_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n E_i \right)^2 \right] \left[\left(n \sum_{i=1}^n (O_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right] \right\}^{0.5}} \quad (4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (5)$$

em que: E_i e O_i - valores estimados e observados, respectivamente; n - número de repetições; e , $\bar{E}$ e $\bar{O}$ - valores médios correspondentes.

Tabela 4 - Critérios para interpretação do coeficiente “c” de Camargo e Sentelhas

Valor de “c”	Desempenho	Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo	0,51 a 0,60	Sofrível
0,76 a 0,85	Muito bom	0,41 a 0,50	Mal
0,66 a 0,75	Bom	≤ 0,40	Péssimo
0,61 a 0,65	Mediano	-	-

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

3.4 Testes e análises dos dados de laboratório

No laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biossistemas foram testadas vazões e pressões para caracterização do funcionamento hidráulico dos modelos “B” “C”, D” e “E”, uma vez que o modelo “A” teve seu prosseguimento abortado, conforme já comentado. A coleta de vazão foi realizada com pressões que variaram de 90 a 200 kPa, considerando-se a menor pressão como sendo a mínima para funcionamento do emissor. A vazão foi determinada pelo método volumétrico, com coletas em tempos superiores a três minutos. Os resultados foram plotados em um gráfico de vazão versus pressão.

Para avaliação do coeficiente de uniformidade (CUE) proposto por Karmeli e Keller (1974) e coeficiente de variação de fabricação (CVF) montou-se uma bancada contendo dez emissores de cada modelo. Os emissores utilizados nesta avaliação foram: emissor utilizando membrana com módulo de Young de 1000 kPa sem sistema protetor do solo (modelo “B”); emissor utilizando membrana de com módulo

de Young de 1000 kPa com protetor do solo (modelo “C”); emissor modelo “D”; e, gotejador comercial (modelo “E”).

Devido à dificuldade de construção em larga escala (processo realizado por torno mecânico), a avaliação do CVF foi realizada apenas em 10 emissores de cada modelo. Tanto para o CUE quanto CVF, os dados de vazão foram coletados em todos os emissores instalados na linha lateral, a uma pressão de 165 kPa. O CUE e CVF são representados pelas eqs. (6) e (7), respectivamente.

$$CUE = 100 \left(1 - 1,27 \frac{CVF}{\sqrt{n}} \right) \frac{q_{\min}}{q_m} \quad (6)$$

$$CVF = \frac{\sigma}{q_m} \quad (7)$$

em que: CUE - coeficiente de uniformidade de emissão (%); $q_{\min}$ - vazão mínima ($L h^{-1}$); q_m - média das vazões ($L h^{-1}$); n - número de gotejadores; CVF - coeficiente de variação de fabricação; e, σ - desvio padrão das vazões.

3.5 Testes de campo

3.5.1 Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção foi construída simulando uma condição real de irrigação e evaporação em casa de vegetação. Utilizaram-se 3 vasos com capacidade de 12 L, com orifícios na parte inferior, contendo uma camada com 1 cm de brita nº 1, coberta com manta geotêxtil (BIDIM OP-30) e preenchidos com solo em camadas a cada 5 cm com massa e volume conhecidos, a fim de se obter um solo com densidade conhecida. Nos vasos instalaram-se tensiômetros a 0,15m de profundidade. Os vasos foram imersos em água até metade da altura, para saturação lenta do solo, por ascensão capilar da água. Após a saturação, os vasos foram cobertos com filme plástico; colocados para drenar naturalmente até finalizar o escoamento; e, em seguida determinou-se a capacidade máxima de retenção. Durante o processo de perda de água foram realizadas pesagens e leituras de tensão concomitantemente, até quando se verificou uma tensão de 100 kPa. A eq. de umidade média do solo foi obtida pela curva de tensão versus umidade, sendo utilizada no manejo da irrigação.

3.5.2 Qualidade da água de irrigação

Para avaliar a qualidade da água, coletou-se três amostras de um litro, da água utilizada para irrigação com todos os emissores estudados. As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos com tampa, e encaminhadas ao laboratório de Ecologia Agrícola Aplicada da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, para determinação de pH, Sólidos em suspensão, Sólidos dissolvidos, Ferro total e Manganês. A classificação da água para o sistema de irrigação localizada em relação a problemas de entupimento devido a fatores avaliados seguiu recomendações de Nakayama e Bucks (1991).

3.5.3 Instalação dos emissores e manejo da irrigação

A fase de campo foi realizada com implantação de um sistema de irrigação subsuperficial em ambiente protegido, na cultura da cana de açúcar, para avaliação das vazões nos emissores e do entupimento destes. Para tanto, utilizou-se os emissores modelo “B”, “C”, “D” e “E” instalados em vasos.

Os emissores B “D” e “E” foram instalados na data de 7 de julho de 2010 em vasos com a cultura da cana-de-açúcar e somente com solo, para avaliação de entupimento causado por intrusão radicular e sucção de partículas de solo; e, o emissor “C”, foi instalado em 7 de outubro de 2010 em vasos com cana.

Na Figura 12 apresenta-se o experimento instalado em ambiente protegido com os diferentes emissores, em vasos com cana-de-açúcar e somente com solo.

Figura 12 - Sistema de irrigação em ambiente protegido, com emissores instalados em vasos com e sem cultura

O experimento foi montado utilizando linhas laterais com dez emissores de cada modelo, instalados dentro do solo a 20 cm de profundidade, em vasos com dimensões de 32 cm de profundidade x 30 cm de diâmetro.

A variedade da cana-de-açúcar escolhida para avaliação do processo de intrusão radicular foi a RB867515, mais cultivada no Estado de São Paulo. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, textura franco argilosa, denominado Série Sertãozinho.

Os vasos sem cana passaram por tratos culturais, sendo monitorados de forma a não conter erva daninha, eliminando-se dessa forma a possibilidade da existência de raízes dentro do vaso sem cultura.

O manejo de irrigação foi realizado com base na umidade do solo estimada pela curva de retenção de água, utilizando-se três tensiômetros em cada linha lateral (em três vasos distribuídos espaçadamente na linha lateral), mantendo-se o solo sempre com umidade próxima à capacidade de campo. Os tensiômetros foram distribuídos na lateral de forma que o primeiro foi instalado no segundo vaso, o segundo, no vaso situado no meio da linha lateral, e o terceiro no penúltimo vaso.

3.5.4 Coleta e análise dos dados de vazão

Cada emissor foi monitorado periodicamente em relação às vazões apresentadas em vasos com e sem cultura. As vazões foram determinadas utilizando-se um aparelho eletrônico (medidor de vazão) magnético indutivo, modelo IFC-090-F, fabricado pela empresa Krohne/Conaut, capaz de determinar vazões na faixa de 0 a 10 L h⁻¹ (Figura 13 A e 13 B), com precisão de 99,97%, que possibilita a medição das vazões em emissores enterrados, individualmente. Como pode ser observado, na Figura 12 (anterior), os emissores foram enterrados, mantendo-se conectados a um microtubo inserido na linha lateral de irrigação. Uma vez que a determinação da vazão de cada emissor acontece de forma individual, foi possível determiná-la desconectando o microtubo de abastecimento de cada gotejador e conectando-o ao medidor de vazão.

As análises dos resultados desta pesquisa estiveram relacionadas às vazões dos emissores, tendo-se como base a vazão inicial, quando se implantou a cultura

da cana de açúcar e enterrou os emissores; e, aos aspectos dos mesmos quanto a entupimento por raiz e partículas de solo, avaliados no final do experimento.

Figura 13 - Medidor de vazão: conversor de sinal (A) e sensor magnético (B)

A determinação das vazões foi realizada trimestralmente, após a implantação do sistema de irrigação em 7 de julho de 2010, exceto a última avaliação que foi semestral em janeiro de 2012. Os valores obtidos foram utilizados para o cálculo da vazão relativa (QR), como sendo o quanto a vazão do último período de análise representa sobre aquela medida no período anterior, e do distúrbio de vazão dos emissores (DQ) como um indicativo do percentual de variação da vazão que pode ser ocasionado por entupimento ou outro fator, e do CUE descrito anteriormente.

A vazão relativa foi medida pela média de dez emissores na linha lateral. Os valores de média da última leitura foram divididos pela média da primeira leitura. O DQ e QR são apresentados pelas eqs. (8) e (9), respectivamente.

$$DQ = 100 \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \quad (8)$$

$$QR = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (9)$$

em que: DQ – Distúrbio de vazão dos emissores (%); Q_1 - Vazão obtida no primeiro período de testes ($L \ h^{-1}$); Q_2 - Vazão obtida no ultimo período de testes ($L \ h^{-1}$); e, QR - Vazão relativa ($L \ h^{-1}$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise teórica do emissor modelo “C”

4.1.1 Tensões na parede da membrana

A relação entre espessura da parede e diâmetro interno da membrana foi de $4/10 > 1/15$, considerando-se a membrana como de parede grossa, conforme Hearn (1997). Portanto, a tensão ao longo da espessura não se aplica de forma constante, mas, dependente da distância de atuação até o eixo central da membrana, conforme se pode ver na Figura 14 A, sendo máximas no raio interno e mínima no exterior para pressões (p_i) internas maiores que as externas. Na Figura 14 B se apresenta o esquema da membrana e um elemento da parede limitado pelos planos axiais $mm'l'l'$ e $nn'k'k'$, pelas superfícies cilíndricas mnl e $m'n'k'l'$, e pelos planos transversais $mm'n'$ e $klk'l'$, o qual se encontra ampliada na Figura 14 C. Tal elemento está

submetido a tensões radial (σ_r) axial (σ_a) e tangencial (σ_t), normais às superfícies,

não havendo tensões de cisalhamento.

Figura 14 - Distância de atuação da tensão (A), tubo de parede grossa (B), e, elemento da parede submetido às tensões σ_a , σ_t e σ_r (C)

4.1.2 Equações de Lamé aplicadas à membrana sob pressão

Seja considerado o esquema da Figura 15, com diâmetro interno d_i e externo d_0 , espessura t , e comprimento L , e atuação de uma pressão interna p_i , e externa p_0 .

Figura 15 - Esquema ilustrativo de parâmetros para cálculos das tensões e deformações na membrana

Em uma secção da membrana normal ao seu eixo se supõe um anel de raio r e espessura d_r , conforme Figura 15, considera-se uniforme a tensão axial σ_a agindo no material através da espessura d_r , e que, além disso, se produz as tensões radial (σ_r) e tangencial ou circunferencial (σ_t). Sendo ν a relação do módulo de Poisson de deformação transversal, e E o módulo de elasticidade do material por tração ou compressão, podem ser obtidas as relações que apresentam os valores das tensões em função dos parâmetros mencionados, conforme será descrito a seguir.

Tensão axial (σ_a)

O valor resultante da tensão axial para as forças interna F_i e externa F_e que são geradas devido às pressões internas p_i e externas p_0 , respectivamente é obtido pela eq. (10).

$$\sigma_a = \frac{F_i - F_e}{A} \quad (10)$$

As áreas A_i e A_e em que atuam p_i e p_0 , respectivamente, são calculadas conforme eq. (11), resultando as forças conforme eq. (12). A área A em que atua $F_i - F_e$ é dada pela eq. (13).

$$A_i = \frac{\pi d_i^2}{4} \dots \dots \dots A_e = \frac{\pi d_0^2}{4} \quad (11)$$

$$F_i = \frac{\pi d_i^2}{4} p_i \dots \dots F_e = \frac{\pi d_0^2}{4} p_0 \quad (12)$$

$$A = A_e - A_i \rightarrow A = \frac{\pi d_0^2}{4} - \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (13)$$

Substituindo 12 e 13 em 10 se obtém o valor de σ_a pela eq. (14).

$$\sigma_a = \frac{\frac{\pi d_i^2}{4} p_i - \frac{\pi d_0^2}{4} p_0}{\frac{\pi d_0^2}{4} - \frac{\pi d_i^2}{4}} \therefore \sigma_a = \frac{p_i \cdot d_i^2 - p_0 \cdot d_0^2}{d_0^2 - d_i^2} \quad (14)$$

Tensão tangencial ou circunferencial (σ_t) e radial (σ_r)

Para determinar σ_t e σ_r , se considera uma pequena porção do material contido na parede da membrana, de comprimento axial unitário, espessura radial dr e ângulo circunferencial $r \cdot d\theta$, conforme se indica na Figura 16. Este elemento se mantém sob ação das tensões σ_a , σ_t e σ_r , tolerando, devido às mesmas, uma deformação total Δ_a na direção axial (alargamento), que de acordo com a teoria das deformações (Equações de Lamé), pode ser expressa pela eq. (15).

Figura 16 - Porção da parede submetida às tensões σ_a , σ_t e σ_r

$$\Delta_a = \frac{\sigma_a + \nu \sigma_r - \nu \sigma_t}{E} \quad (15)$$

Para determinado material tensionado dentro do limite elástico, submetido a uma determinada pressão, Δ_a , σ_a , ν e E se mantêm constantes. Assim, pelas eqs. 15 e 16 se obtém uma constante c com a eq. (17).

$$\sigma_r - \sigma_t = \frac{\Delta_a \cdot E - \sigma_a}{\nu} = \text{constante} = c$$

ou, ainda

(16)

$$\sigma_t - \sigma_r = \frac{\sigma_a - E \cdot \Delta_a}{\nu} = c$$

$$c = \sigma_t - \sigma_r$$
(17)

Considera-se uma parte da membrana (Figura 17) de raio r , espessura dr e comprimento L com atuação da σ_r como pressão interna sobre a superfície $2r.L$, e $\sigma_r + d\sigma_r$ como pressão externa sobre a superfície $2(r+dr).L$. Sendo a resistência do material das paredes σ_t que atua sobre a superfície $2 dr.L$, pela Figura 17 se pode descrever as eq. (18) a (21).

Figura 17 - Parte da membrana para análise das tensões (σ_t) e (σ_r)

$$F_1 = 2 \cdot r \cdot L \cdot \sigma_r$$
(18)

$$F_2 = 2(r + dr)L(\sigma_r + d\sigma_r)$$
(19)

$$F_3 = 2 \cdot dr \cdot L \cdot \sigma_t$$
(20)

$$F_3 = F_1 - F_2$$

$$2 \cdot dr \cdot L \cdot \sigma_t = 2 \cdot r \cdot L \cdot \sigma_r - 2(r + dr)L(\sigma_r + d\sigma_r)$$
(21)

Multiplicando-se, simplificando e agrupando as incógnitas, e desprezando as diferenciais de segunda ordem ($dr \cdot d\sigma_r$) sem importância significativa, se obtém a eq. (22) para cálculo da tensão tangencial (σ_t).

$$\sigma_t = -\sigma_r - \frac{r \sigma_r}{dr}$$
(22)

Substituindo (17) em (22) se tem (23). Integrando (23) se obtém a eq. (24).

$$c = -\sigma_r - \sigma_r - \frac{rd\sigma_r}{dr} \rightarrow \frac{d\sigma_r}{\sigma_r + \frac{c}{2}} = -\frac{2dr}{r} \quad (23)$$

$$\ln\left(\sigma_r + \frac{c}{2}\right) = -\ln r^2 + C_1 \quad (24)$$

Fazendo $b = \text{antilog } C_1$, aplicando antilogaritmo na eq. (24) e considerando-se $c = 2a$, se pode descrever as expressões 25 e 26 para σ_r .

$$\sigma_r + \frac{c}{2} = \frac{b}{r^2} \rightarrow \sigma_r = \frac{b}{r^2} - \frac{c}{2} \quad (25)$$

$$\frac{c}{2} = a \rightarrow c = 2a$$

$$\sigma_r = -a + \frac{b}{r^2} \quad (26)$$

Substituindo em (26) o valor de c obtido em (17) se obtém (27) para σ_t .

$$\sigma_t = a + \frac{b}{r^2} \quad (27)$$

Para se obter as constantes a e b implícitas em (26) e (27), considera-se os valores que podem ser obtidos com a tensão radial σ_r nos limites das paredes da membrana, conforme as expressões (28) a (30).

$$\text{se: } r = \frac{d_i}{2} \rightarrow \sigma_r = p_i; \text{e, se: } r = \frac{d_0}{2} \rightarrow \sigma_r = p_0 \quad (28)$$

$$p_i = \frac{b}{\left(\frac{d_i}{2}\right)^2} - a \quad (29)$$

$$p_0 = \frac{b}{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2} - a \quad (30)$$

Subtraindo membro a membro pode-se obter as constantes a e b conforme expressões (31) a (33).

$$p_i - p_0 = \frac{4b}{d_i^2} - \frac{4b}{d_0^2} = \frac{4b.d_0^2 - 4b.d_i^2}{d_i^2.d_0^2} \therefore p_i - p_0 = 4b \frac{(d_0^2 - d_i^2)}{(d_i^2.d_0^2)} \quad (31)$$

$$b = \frac{(p_i - p_0) \cdot (d_i^2.d_0^2)}{4(d_0^2 - d_i^2)} \quad (32)$$

$$a = \frac{p_i \cdot d_i^2 - p_0 \cdot d_0^2}{(d_0^2 - d_i^2)} = \sigma_a \quad (33)$$

Finalmente, substituindo os valores de b e a, obtidos em (32) e (33), nas eqs. (26) e (27), se obtém σ_r e σ_t , respectivamente pelas eqs. (34) e (35).

$$\sigma_r = -\frac{p_i \cdot d_i^2 - p_0 \cdot d_0^2}{(d_0^2 - d_i^2)} + \frac{(p_i - p_0) \cdot (d_i^2 \cdot d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2) d^2} \quad (34)$$

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot d_i^2 - p_0 \cdot d_0^2}{(d_0^2 - d_i^2)} + \frac{(p_i - p_0) \cdot (d_i^2 \cdot d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2) d^2} \quad (35)$$

As eqs. (14), (34) e (35) devem ser aplicadas dentro do limite elástico do material.

4.1.3 Análise para pressão interna atuante na membrana

A passagem da água entre o tubo e a membrana produz pressões internas, sendo, portanto, $p_0 = 0$. Neste caso, as eqs. (34) e (35) se reduzem às eqs. (36) e (37).

$$\sigma_r = -\frac{p_i \cdot d_i^2}{(d_0^2 - d_i^2)} + \frac{p_i \cdot (d_i^2 \cdot d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2) d^2} \quad (36)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot d_i^2}{4r^2} \left[\frac{(-4r^2 + d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2)} \right]$$

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot d_i^2}{(d_0^2 - d_i^2)} + \frac{p_i \cdot (d_i^2 \cdot d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2) d^2} \quad (37)$$

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot d_i^2}{4r^2} \left[\frac{(4r^2 + d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2)} \right]$$

Pelas eqs. (36) e (37), nota-se que ambas as tensões aumentam a medida que o raio (r) diminui. Portanto, as máximas tensões estão na superfície interior da parede da membrana, onde $r = d_i / 2$. Substituindo o valor de r nas eqs. anteriores, se obtém as eqs. (38) e (39) para tensões máximas.

$$\sigma_r \text{ maxima} = p_i \quad (38)$$

$$\sigma_t \text{ maxima} = p_i \left[\frac{(d_0^2 + d_i^2)}{(d_0^2 - d_i^2)} \right] \quad (39)$$

4.1.4 Equações de Clavarino (membrana fechada) e Birnie (membrana aberta)

Em um dos lados da membrana que fica fechada, uma vez que se analisam os efeitos das deformações transversais, correspondentes a cada uma das tensões aplicadas, estas influenciarão umas sobre outras afetando a capacidade de carga do material constituinte, obtendo-se as tensões axiais, radiais e tangenciais equivalentes, pelas eqs. (40), (41) e (42), respectivamente, de acordo com a teoria da máxima deformação.

$$\sigma_a' = \sigma_a + \nu\sigma_r - \nu\sigma_t \quad (40)$$

$$\sigma_r' = \sigma_r + \nu\sigma_a + \nu\sigma_t \quad (41)$$

$$\sigma_t' = \sigma_t - \nu\sigma_a + \nu\sigma_r \quad (42)$$

Se em um elemento da parede do cilindro, conforme foi indicado nas Figuras 14 e 15, submetido a tais tensões descritas em (40), (41) e (42), se aplica uma análise similar conforme para Equações de Lamé descritas anteriormente, e substitui nas mesmas os valores de σ_r , σ_t e σ_a , obtidos pelas eqs. (26), (27) e (33) respectivamente, se obtém as eqs. (43), (44) e (45).

$$\sigma_a' = a + \nu \left(-a + \frac{b}{r^2} \right) - \nu \left(a + \frac{b}{r^2} \right) \therefore \sigma_a' = a(1 - 2\nu) \quad (43)$$

$$\sigma_r' = -a + \frac{b}{r^2} + \nu.a + \nu \left(a + \frac{b}{r^2} \right) \therefore \sigma_r' = (1 - 2\nu)a - \left[\frac{(1 + \nu).b}{r^2} \right] \quad (44)$$

$$\sigma_t' = a + \frac{b}{r^2} - \nu.a + \nu \left(-a + \frac{b}{r^2} \right) \therefore \sigma_t' = (1 - 2\nu)a - \left[\frac{(1 + \nu).b}{r^2} \right] \quad (45)$$

Agora considerando o lado da membrana que teoricamente estaria aberto, não existem tensões axiais diretas, e uma análise similar à utilizada por Clavarino, aplicando a teoria da máxima deformação, efetuando as substituições de σ_r e σ_t por seus valores dados pelas eqs. (26) e (27), nas eqs. (43), (44) e (45), considerando $\sigma_a = 0$, se conduz às Equações (46), (47) e (48), para as tensões equivalentes.

$$\sigma_a' = \nu\sigma_r - \nu\sigma_t \rightarrow \sigma_a' = \nu\left(-a + \frac{b}{r^2} - a - \frac{b}{r^2}\right) \therefore \sigma_a' = -2.\nu.a \quad (46)$$

$$\sigma_r' = \sigma_r + \nu\sigma_t \rightarrow \sigma_r' = -a + \frac{b}{r^2} + \nu\left(a + \frac{b}{r^2}\right) \therefore \sigma_r' = -a(1-\nu) + \frac{b}{r^2}(1+\nu) \quad (47)$$

$$\sigma_t' = \sigma_t + \nu\sigma_r \rightarrow \sigma_t' = a + \frac{b}{r^2} + \nu\left(-a + \frac{b}{r^2}\right) \therefore \sigma_t' = a(1-\nu) + \frac{b}{r^2}(1+\nu) \quad (48)$$

4.1.5 Modificação no diâmetro da membrana submetida à pressão interna

Devido à pressão interna na membrana, esta pode variar seu diâmetro. Mesmo quando as mudanças no diâmetro são pequenas, este valor pode ser significativo na vazão do emissor. Na Figura 18 ilustra-se um uma membrana de diâmetro interno d_i e externo d_0 , exposta a uma pressão interna p_i e, sobre a mesma, a uma distância r do centro, há um elemento que suporta uma tensão tangencial unitária σ_t .

Figura 18 - Corte transversal da membrana sob pressão

A deformação unitária Δ_d de acordo com a teoria da tensão deformação apresentada pela Lei de Hooke é dada pela eq. (49), em um cilindro de diâmetro d , sendo E o módulo de elasticidade do material.

$$\Delta_d = \frac{\sigma_t}{E} d \quad (49)$$

Utilizando o valor da tensão tangencial equivalente dada pela Equação de Birnie, conforme eq. (48), com a qual se obtém maiores valores para σ_t' , comparados às Equações de Lamé e Clavarino; e, considerando que $p_0 = 0$, o que conduz o máximo valor de σ_t e a máxima deformação Δd para $r = d_i / 2$, se pode

descrever a eq. (50) para variação no diâmetro interno, utilizando os valores das constantes b e a, descritas em (32) e (33).

$$\Delta d_i = \frac{d_i}{E} \left[\frac{(1-\nu) \cdot p_i \cdot d_i^2}{(d_0^2 - d_i^2)} + \frac{(1+\nu) p_i \cdot (d_i^2 \cdot d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2) d_i^2} \right] \therefore \Delta d_i = \frac{p_i \cdot d_i}{E} \left[\frac{(d_0^2 + d_i^2)}{(d_0^2 - d_i^2)} + \nu \right] \quad (50)$$

Se a membrana for submetida apenas a pressão externa p_0 , a mesma tenderá à redução do diâmetro, que será máximo para d_0 , resultando, portanto, a eq. (51) para variação no diâmetro externo.

$$\Delta d_0 = \frac{p_0 \cdot d_0}{E} \left[\frac{(d_0^2 + d_i^2)}{(d_0^2 - d_i^2)} - \nu \right] \quad (51)$$

Os resultados a serem obtidos pela eq. (50) poderão ser utilizados para estimativa da vazão do emissor, em função da variação do diâmetro e consequentemente da área de passagem da água em função da pressão de trabalho. A eq. (51) poderá ser utilizada quando a membrana estiver sob pressão externa.

4.1.6 Análise do sistema composto por membrana, tubo e protetor

O emissor, conforme já foi mostrado nas Figuras 7, 8 e 9 é constituído pelo tubo ou mangueira de irrigação, a membrana e o protetor superpostos coaxialmente, constituídos de diferentes materiais, interligados pelo efeito de compressão ou expansão da parede de um dos materiais ou, compressão de um e expansão do outro, conforme ilustrado na Figura 19, na qual o tubo interno tem diâmetro interno d_i e externo d_s , e a membrana que o envolve tem diâmetro interno d_h e externo d_0 , sendo $d_h < d_s$.

Figura 19 - Diâmetros (A) e montagem entre tubo, membrana e protetor (B)

A inserção do tubo ou da membrana consiste em obter um diâmetro de contato d_c , uma vez obtido o equilíbrio das deformações. Este processo faz com que seja maior a pressão interna necessária para deformar a parede da membrana, em função da força de reação devido à compressão nas paredes dos materiais.

Considerando o emissor aberto em um dos extremos, embora sejam geradas tensões axiais, a maior tensão que atua na membrana é a tensão tangencial ou circunferencial, que deve ser considerada. O valor desta última tensão para qualquer valor do raio (r) pode ser obtido com a eq. (52), submetida à pressão interna e externa, e para pressão interna apenas, pela eq. (53), de acordo com a Equação de Birnie dada pela eq. (48), substituindo na mesma, os valores de a e b obtidos em (32) e (33).

$$\sigma'_t = (1-\nu) \frac{p_i \cdot d_i^2 - p_0 \cdot d_0^2}{(d_0^2 - d_i^2)} + (1+\nu) \frac{(p_i - p_0) \cdot (d_i^2 \cdot d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2) 4r^2} \quad (52)$$

$$\sigma'_t = (1-\nu) \frac{p_i \cdot d_i^2}{(d_0^2 - d_i^2)} + (1+\nu) \frac{p_i \cdot (d_i^2 \cdot d_0^2)}{(d_0^2 - d_i^2) 4r^2} \quad (53)$$

Quando não existe pressão interna nem externa, se manifestam apenas as tensões devidas a contração e expansão dos materiais. Desta forma, pode-se considerar que o tubo da Figura 19 está submetido a tensão externa causada pela contração da membrana externa ao tubo, e a membrana, submetida a uma tensão interna causada pela compressão do tubo interno. Uma análise similar pode ser realizada para a membrana e o sistema protetor.

Analisando-se o tubo, considerando p_c a pressão entre tubo e membrana, e utilizando $p_i = 0$, $p_0 = p_c$, $d_0 = d_c$, na eq. (52) se obtém as expressões (54) e (55).

- a) Tensão circunferencial σ_{ti} na superfície interior do tubo interno, conforme Figura 20, sendo $r = d_i / 2$.

Figura 20 - Secção transversal de um tubo interno sob tensão externa

$$\sigma_{ti} = -\frac{2p_c \cdot d_c^2}{(d_c^2 - d_i^2)} \quad (54)$$

- b) Tensão circunferencial σ_{tc} na superfície exterior do tubo interno, conforme Figura 20, sendo $r = d_c / 2$.

$$\sigma_{tc} = -pc \left(\frac{d_c^2 + d_i^2}{d_c^2 - d_i^2} - \nu \right) \quad (55)$$

Analisando-se a membrana externa ao tubo, sendo $p_0 = 0$, $p_i = p_c$ e $d_i = d_c$ tem-se as expressões (56) e (57).

- c) Tensão circunferencial σ_{tc} na superfície interior da membrana, conforme Figura 21, sendo $r = d_c/2$

Figura 21 - Secção transversal da membrana sob tensão interna

$$\sigma_{tc} = pc \left(\frac{d_0^2 + d_c^2}{d_0^2 - d_c^2} + \nu \right) \quad (56)$$

- d) Tensão circunferencial σ_{t0} na superfície exterior da membrana, conforme Figura 21, sendo $r = d_0 / 2$

$$\sigma_{t0} = \frac{2p_c \cdot d_c^2}{(d_0^2 - d_c^2)} \quad (57)$$

4.1.7 Pressão radial entre as partes constituintes do emissor

A pressão radial entre o tubo e a membrana ou entre a membrana e o protetor em suas superfícies de contato depende do coeficiente de poisson, módulo de elasticidade dos materiais e da diferença entre o diâmetro exterior d_h do material interno, e interior d_i do material externo, antes da junção dos dois por contração.

Conforme Figura 19, as deformações dos diâmetros dos materiais, devidas a pressão sobre a superfície de contato podem ser obtidas pela eq. (58).

$$\begin{aligned} \Delta d_s &= d_s - d_c \\ \Delta d_h &= d_c - d_h \\ \Delta d_s + \Delta d_h &= d_s - d_h \therefore B = d_s - d_h \end{aligned} \quad (58)$$

Na eq. (58), B é o valor da contração. Os valores de Δd_s e Δd_h em função da pressão p_c podem ser obtidos aplicando as eqs. (50) e eq. (51), portanto se pode escrever a eq. (59) para B.

$$B = \frac{p_c \cdot d_s}{E_s} \left(\frac{d_s^2 + d_i^2}{d_s^2 - d_i^2} - \nu_s \right) + \frac{p_c \cdot d_h}{E_h} \left(\frac{d_0^2 + d_h^2}{d_0^2 - d_i^2} + \nu_h \right) \quad (59)$$

Como a contração devida à junção é muito pequena, pode-se substituir sem erro apreciável, d_s e d_h por d_c , na eq. (59), obtendo-se a eq. (60).

$$\begin{aligned} \frac{B}{d_c} &= p_c \left[\frac{d_c^2 + d_i^2}{E_s (d_c^2 - d_i^2)} + \frac{d_0^2 + d_c^2}{E_h (d_0^2 - d_c^2)} - \frac{\nu_s}{E_s} + \frac{\nu_h}{E_h} \right] \text{ ou} \\ &\text{ou} \\ p_c &= \frac{B}{d_c \left[\frac{d_c^2 + d_i^2}{E_s (d_c^2 - d_i^2)} + \frac{d_0^2 + d_c^2}{E_h (d_0^2 - d_c^2)} - \frac{\nu_s}{E_s} + \frac{\nu_h}{E_h} \right]} \end{aligned} \quad (60)$$

Pela eq. (60), conhecendo-se B se pode calcular a pressão p_c , correspondente à pressão mínima para funcionamento do emissor. A partir da pressão mínima a vazão a ser obtida fica dependente do incremento de pressão interna, que interfere

diretamente na variação de diâmetro da membrana (eq. 50). Estimativas da vazão envolvendo a pressão interna com valores acima da pressão mínima foram realizadas. Estabeleceu-se uma relação pela Equação de Darcy Weisbach, utilizando o raio hidráulico para representar o diâmetro, e a Equação para variação do diâmetro interno da membrana que constitui o emissor modelo “C”. A variação da perda de carga dentro do emissor, entre a membrana e o tubo foi calculada considerando o fluxo interno como sendo gradualmente variado.

Ainda neste trabalho começou-se estudar as variáveis que influenciam na relação entre vazão e pressão aplicada, por meio de análise dimensional e de semelhança. Entretanto tal análise necessitaria de um tempo superior àquele do qual se dispunha, uma vez que seriam necessários trabalhos teóricos e de laboratório com vários emissores com diferentes dimensões e tipos de materiais, com estudos que envolvem as partes físicas (membrana, tubo e protetor), e o movimento do fluxo.

4.2 Resultados de laboratório

4.2.1 Relação vazão versus pressão

Os dados de vazão e pressão para os emissores modelos “B”, “C”, “D” e “E” estão apresentados no gráfico da Figura 22. Recordando, não foi analisado o modelo “A” devido o mesmo ter sido abortado por não apresentar características satisfatórias aos objetivos desta pesquisa.

Para uma mesma pressão, os dados de vazão no emissor modelo “C” foram aquém daqueles observados nos emissores modelo “B”. Isto ocorreu porque, para se obter a mesma vazão no modelo “C”, devido à força contrária do protetor que envolve a mesma, necessita-se maior pressão para expansão da membrana, ocasionada pela junção do protetor, membrana e tubo, originando a pressão “ p_c ” conforme eq. 60, para uma mesma variação de diâmetro da membrana descrita na eq. 50. Para os modelos “D” e “E”, emissores autocompensantes, a vazão foi em torno de $2,0 \text{ L h}^{-1}$ em todas as pressões medidas.

A função potencial descreveu a relação das vazões e pressões com um coeficiente de determinação acima de 0.93 para todos os emissores. Observa-se que, diferente do que ocorre com gotejadores convencionais de orifício (modelo “D”

e “E”), o valor do expoente da pressão obtido na Equação dos emissores “B” e “C” é maior que a unidade. Este fato está relacionado, possivelmente, com as características físicas do material (elastômero) utilizado para controle da vazão. Neste caso a seção de saída de água aumenta com a pressão, sendo o modelo “B” mais afetado por não apresentar protetor, enquanto nos orifícios dos gotejadores convencionais a seção é mantida praticamente constante. Os valores de expoente encontrados indicam que os emissores “B” e “C” são bastante sensíveis a pressão, desta forma, a membrana deverá ser utilizada com objetivo de fechar o orifício de saída da água, e evitar a entrada de raiz. A função de controle da vazão deverá ser realizada por um dispositivo específico a ser desenvolvido. Entretanto, para esta pesquisa, foi utilizada apenas a membrana.

Figura 22 - Relação vazão versus pressão para os emissores (“B”), (“C”), (“D”), e (“E”)

4.2.2 Uniformidade das vazões e variação na fabricação dos emissores

Na Tabela 5 apresentam-se os resultados de laboratório para as avaliações do coeficiente de uniformidade de emissão (CUE) e coeficiente de variação de fabricação (CVF) para cada modelo de emissor utilizado na pesquisa, sendo:

- emissor “B” com membrana elástica sem protetor do solo, a ser instalado em vaso com cultura - SBC;

- emissor “B” com membrana elástica sem protetor do solo, a ser instalado em vaso sem cultura - SBS;
- emissor “C” utilizando membrana elástica com protetor do solo, a ser instalado em vaso com cultura - SCC;
- gotejador comercial “D” para controlar a vazão em vasos com cultura, no sistema com protetor por tubo - SDC;
- gotejador comercial “D” para controlar a vazão em vasos sem cultura, no sistema com protetor por tubo - SDS;
- gotejador comercial “E” para irrigação por gotejamento, a ser instalado em vasos com cultura - SEC; e,
- gotejador comercial “E” para irrigação por gotejamento, a ser instalado em vasos sem cultura - SES.

Analisando-se os dados da Tabela 5, verifica-se que com os emissores modelos “D” e “E” foram possíveis as melhores classificações para CVF pela ABNT (1986) e Solomon (1984), e para CUE, conforme ASAE (1993). Por outro lado, os emissores de modelo “B” e “C” apresentaram as piores classificações tanto de CVF quanto de CUE, com valores de CVF considerados como inaceitáveis. Entretanto, isso ocorreu por dois motivos principais: o processo construtivo manual dos modelos “B” e “C”, impossibilitando a padronização do sistema protetor; e pelo fato de o diâmetro tanto da membrana quanto do tubo de polietileno ser desuniforme. Estes problemas não puderam ser controlados, por ter sido utilizado um material alternativo para testes. No entanto, em se tratando da construção de emissores para futuras análises, além de se estudar um mecanismo para controle da vazão, deverão ser utilizados protetor, tubo e membrana específicos.

Os dados apresentados na Tabela 5 não são para comparação entre modelos, pois, a perda de carga nos emissores “B” e “C” não é compensada, conforme para os modelos “D” e “E” que operam com pressões elevadas, em cujo gotejador ocorre alta perda de carga, oferecendo maior uniformidade de vazão, conforme mencionado por Mayers e Bucks (1972).

O fato de os emissores apresentarem baixos valores de CVF e CUE não impede que os mesmos sejam utilizados nos testes de campo para avaliação, uma vez que o propósito desta pesquisa é avaliar os emissores quanto à obstrução por sucção de partículas de solo e intrusão radicular.

Tabela 5 - Resultados das avaliações do coeficiente de variação de fabricação (CVF) e coeficiente de uniformidade de emissão (CUE) com os emissores utilizados na pesquisa

Parâmetro avaliado	Modelo "B"		Modelo "C"	Modelo "D"		Modelo "E"	
	SBC	SBS	SCC	SDC	SDS	SEC	SES
CUE	58,70	59,85	52,85	93,47	94,14	92,93	94,70
CVF	27,98	40,00	30,46	2,93	2,91	2,84	3,90

4.2.3 Pressão para funcionamento dos emissores e variação no diâmetro da membrana

Na Tabela 6 apresentam-se resultados de pressão mínima (P_c) estimada pela eq. (60), para funcionamento de cinco emissores do modelo "C" escolhidos aleatoriamente. Apresentam-se também as características físicas de cada emissor sendo: comprimento da membrana - L_m ; diâmetro interno da membrana - d_h ; diâmetro externo da membrana - d_o ; diâmetro interno do tubo de polietileno - d_i ; diâmetro externo do tubo de polietileno - d_s ; diâmetro interno do protetor da membrana - d_{ip} ; e, diâmetro externo do protetor da membrana - d_{ep} .

Observa-se que a pressão estimada, equivalente à p_c descrita pela eq. (60) varia conforme $|d_h - d_s|$. Isto se justifica pela desigualdade nas características físicas apresentadas para cada emissor. O principal fator está relacionado aos diâmetros interno e externo da membrana; diâmetro interno do protetor; e, ao diâmetro externo do tubo de polietileno. O diâmetro externo do protetor e interno do tubo de polietileno não têm importância sobre o valor de p_c , uma vez que o módulo de elasticidade do protetor e do tubo (2800000 kPa, e 900000 kPa, respectivamente), são muito grandes, comparados ao da membrana (1000 kPa). Para maiores diferenças entre diâmetros interno da membrana e externo do tubo ($|d_h - d_s|$), as pressões mínimas para funcionamento também apresentam valores mais elevados, o que pode ser importante para evitar a entrada de raiz dentro do emissor. Entretanto, para maiores pressões será necessária maior quantidade de energia para acionar os emissores, devendo ser obtido um ponto de funcionamento ideal.

Tabela 6 - Pressão mínima para funcionamento e características físicas de alguns protótipos do emissor modelo "C"

Emissor		1	2	3	4	5
Pressão mínima						
P_c (kPa)		115	98	100	105	110
Características físicas						
L_m	(mm)	30	31	31	31	30
d_h	(mm)	6,9	6,9	7,0	6,8	6,9
d_o	(mm)	13,2	13,2	13,3	13,3	13,3
d_i	(mm)	5,5	5,7	5,7	5,7	5,9
d_s	(mm)	7,5	7,4	7,5	7,3	7,4
d_{ip}	(mm)	12,4	12,4	12,5	12,4	12,5
d_{ep}	(mm)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
$ d_h - d_s $	(mm)	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5

No gráfico da Figura 23 apresentam-se as pressões estimadas (e_i) e medidas (o_i) para determinadas vazões nos cinco emissores avaliados. A precisão do modelo para estimativa da pressão avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson (r) foi 0,95, classificada como forte e positiva de acordo com Santos (2007). Para as relações entre vazão e pressão com os cinco emissores também se observa uma correlação positiva e forte. Neste último caso, o expoente da pressão observada (4,05) foi um pouco aquém daquele encontrado no gráfico da Figura 22 (4,51), obtido para um único emissor, ocorrendo o mesmo para a constante k da equação. Isso se justifica devido às diferenças físicas entre os cinco emissores, conforme visto na Tabela 5, o que os tornam mais ou menos sensível à variação de pressão. O índice de concordância de Willmott, Robeson e Matsuura (d), o qual se refere à exatidão, ou seja, a aproximação dos dados estimados em relação aos valores observados foi 0,85, mostrando que os valores das pressões estimadas pelas Equações estiveram bem próximos daqueles observados. O desempenho dos modelos para estimativa da pressão foi muito bom conforme classificação por Camargo e Sentelhas (1997), apresentando valor de 0.81, indicando que uma associação das equações propostas pode ser uma boa alternativa para prever a vazão nos emissores. Entretanto, estes modelos ainda são passíveis de aperfeiçoamento quando da utilização de uma análise dimensional e de semelhança envolvendo todas as variáveis que afetam diretamente a vazão e a perda de carga

no emissor, incluindo-se nestas as dimensões de todas as partes do emissor e suas características físicas, bem como uma análise do movimento do fluxo.

Figura 23 - Relação entre pressão estimada (e_i) e medida (o_i), e vazão dos emissores

Para representar o comportamento da membrana, para um determinado fluxo constante do emissor, no gráfico da Figura 24 apresenta-se a variação do diâmetro interno da membrana (Δd_i); a variação da pressão interna (Δh_i); e, a variação da velocidade do fluxo (Δv_i) ao longo do comprimento (L) da membrana. Considerou-se o ponto zero localizado na metade do comprimento da membrana, conforme Fig.7. Observa-se que à medida que se distancia do centro, a expansão da membrana ocorre cada vez em menor dimensão, com uma redução equivalente a cerca de 4.5 vezes entre o centro e o final; por outro lado, a energia de velocidade do fluxo aumenta, devendo no final da membrana, apresentar um valor aproximadamente igual à pressão disponível no mesmo ponto. Isso ocorre porque, para que haja fluxo constante, no interior do emissor, e principalmente entre a membrana e o tubo, ocorre uma perda de carga muito grande, o que leva à menor pressão interna disponível no final da membrana, e conseqüentemente, menor raio hidráulico desta.

Figura 24 - Variação do diâmetro interno (Δd_i) da membrana, pressão interna (Δh_i) e velocidade do fluxo (Δv_i) ao longo do comprimento da membrana

4.3 Resultados de campo

4.3.1 Curva de retenção de água no solo

Na Figura 25 apresenta-se a curva de retenção de água no solo utilizado para avaliação dos emissores enterrados em vasos.

A umidade do solo não foi determinada para tensões maiores que 100 kPa por não apresentar variações consideráveis, e devido ao fato de que o manejo seria realizado com o solo mantido com umidade próxima à capacidade de campo, normalmente com tensão entre 20 e 40 kPa. Pela curva de umidade versus tensão

de retenção, para esta faixa de tensão, observa-se que não houve grande variação de umidade do solo, estando a mesma em torno de $0,30 \text{ cm}^3$ de água por cm^3 de solo. Verifica-se que a capacidade de retenção do solo é baixa, o que indica necessidade de um manejo com turnos de rega mais curtos.

Figura 25 - Curva de retenção da água no solo utilizado na pesquisa

U - umidade volumétrica do solo

4.3.2 Qualidade da água utilizada

Os parâmetros médios da análise da água utilizada na irrigação podem ser visualizados na Tabela 7. Os valores de ferro e manganês estão 10 vezes mais baixo que os valores mínimos (0,2 e 0,1 respectivamente) recomendados para risco baixo de entupimento conforme Tabela 1 apresentada por Nakayama e Bucks (1991). Os mesmos autores recomendam sólidos em suspensão < 50 , sólidos dissolvidos < 500 , e $\text{pH} < 7,0$, portanto, os resultados da análise de água indicam que não haverá problema de entupimento nos emissores devido aos parâmetros avaliados na água utilizada para irrigação.

Tabela 7 - Resultados analíticos da qualidade da água utilizada na irrigação

Parâmetro	Unidade	Resultado
Ferro total	mg L^{-1}	0,02
Manganês	mg L^{-1}	0,01
Sedimentos em suspensão	mg L^{-1}	8,3
Sólidos totais dissolvidos	mg L^{-1}	230,0
pH	adimensional	6,9

4.3.3 Análise temporal das vazões nos emissores ao longo da linha lateral

Nas Figuras 26 a 29 apresentam-se graficamente os dados de vazão coletados ao longo das linhas laterais correspondentes aos emissores “B”, “C”, “D”, e “E”, que foram instalados em vasos com a cultura da cana-de-açúcar e somente em solo, avaliados em diferentes datas.

Pelo gráfico da Figura 26, não houve redução total na vazão dos emissores do sistema “B” com cultura (SBC) e sem cultura (SBS), tendo-se variações temporais nos resultados desde a instalação em julho de 2010 ao final do experimento em janeiro de 2012, com os valores da mediana oscilando de 1,2 a 2,2 L h⁻¹. Tais variações apenas não caracterizaram entupimento, tendo ocorridas possivelmente devido a dois fatores principais: a vazão pode variar com a pressão do solo sobre o emissor, podendo reduzir-se, principalmente, quando a infiltração da água aplicada é limitada pelas propriedades hidráulicas do solo, resultando em uma pressão positiva do mesmo sobre o emissor (SHANI; OR, 1995; SHANI et al., 1996; GIL et al., 2008); e, o fator temperatura não foi controlado no momento das avaliações de todos os emissores, sendo este importante na variação de vazão conforme comentado por Rodriguez - Sinobas et al. (1999).

Analisando-se as vazões que foram medidas na linha lateral, em cada época de avaliação, nota-se que os dados contidos na faixa de 25 a 75 % são bastante variáveis desde o início dos testes. Isso ocorreu devido aos fatores já mencionados e à variabilidade das características físicas dos emissores, apresentadas anteriormente na Tabela 6, além do alto coeficiente de variação de fabricação apresentado na Tabela 5. As principais características que afetaram a diferença de vazão em cada emissor são os diâmetros internos e externos da membrana e do tubo de polietileno. Nota-se que as variações ocorreram tanto para o SBC quanto para o SBS, não havendo evidência clara de redução ou aumento de vazão devido a problemas de entupimento por raiz e/ou sucção de partículas de solo. Estes problemas serão mais bem esclarecidos pelas análises do processo de entupimento (Tabela9) e pelas fotografias (Figura 31), realizadas no final do experimento, conforme serão apresentados mais adiante para todos os emissores.

Figura 26 - Vazão nos emissores do sistema “B” com cultura (SBC) e com solo (SBS)

Pelo gráfico da Figura 27, no sistema “C” com cultura (SCC), pode-se observar que de outubro de 2010 a janeiro de 2012 os valores de mediana oscilaram de 1,2 a 1,8 L h⁻¹. Nos dois primeiros períodos de avaliação ocorreram “outliers” com valores próximos a 3,0 L h⁻¹. Embora tenham ocorrido alguns valores caracterizados como “outliers”, e o coeficiente de variação de fabricação tenha sido alto, se pode observar que a variabilidade dos dados de vazão do emissor modelo “C” ao longo do tempo foi menor comparando-se com o emissor modelo “B”. Isso possivelmente ocorreu devido ao sistema protetor utilizado, reduzindo o efeito das propriedades físicas do solo sobre a vazão de cada emissor. As variações de vazão dos emissores na linha lateral assim como foi discutido para o emissor modelo “B”, pode ter ocorrido devido a problemas de variação de temperatura da água no momento do teste e sobrepressão no solo no emissor.

Analisando-se as vazões em cada época, nota-se que o terceiro quartil se manteve sempre próximo a 2,0 L h⁻¹, com mediana mínima de 1,2 e máxima de 1,8 L h⁻¹, e que as variações de vazão ao longo do tempo não evidenciaram de

forma clara problemas de entupimento, por redução ou aumento de vazão, existindo variabilidade nos dados em todos os períodos avaliados.

Figura 27 - Vazão nos emissores do sistema “C” com cultura (SCC)

Pelo gráfico da Figura 28, no sistema “D” com cultura (SDC) e sem cultura (SDS), não houve redução na vazão dos emissores, tendo-se pequenas oscilações temporais, de julho de 2010 a janeiro de 2012, com os valores em torno de $2,0 \text{ L h}^{-1}$. Apenas as pequenas variações observadas em todos os períodos, não caracterizaram entupimento, entretanto, neste emissor houve entrada de raiz e solo, conforme será visto na Figura 31, por uma avaliação no final do experimento.

Observa-se que os valores máximos e mínimos estiveram próximos da mediana, e do primeiro e terceiro quartil, havendo pouca oscilação nos dados no SDS. Para o SDC ocorreram valores extremos a partir de Janeiro de 2011. Os valores de mediana estiveram acima de $2,0 \text{ L h}^{-1}$, no SDC e no SDS. A baixa variação entre o primeiro e terceiro quartil ocorreu devido à pequena oscilação na medição da vazão nos emissores ao longo da linha lateral, justificada pelo baixo coeficiente de variação de fabricação. Nas quatro últimas avaliações realizadas para o SDC, apesar de os valores estarem entre $2,0$ e $2,2 \text{ L h}^{-1}$, entre o primeiro e terceiro quartil, nota-se que os valores das medianas foram menores

Figura 28 - Vazão nos emissores do sistema “D” com cultura (SDC) e com solo (SDS)

Pelo gráfico da Figura 29, nota-se ocorrência de “outliers” e dados extremos de vazão, com valores iguais a zero quando ocorreu obstrução total de alguns emissores no SEC. Conforme para o sistema “D”, no sistema “E” também ocorreram pequenas variações da vazão ao longo do tempo de avaliação tanto no SEC quanto no SES. Nos dois últimos períodos de avaliação do SEC nota-se que, apesar de a mediana se localizar próxima ao centro entre o primeiro e terceiro quartil, houve grande variação dos dados de vazão. Isto se deve à intrusão radicular nos emissores, bem como pela redução na vazão de todos ao longo da linha lateral, conforme será visto na Tabela 8 com os dados de vazão relativa. Uma importante ressalva deve ser mencionada: o emissor “E” é indicado para ser utilizado com aplicação de Trifluralina, entretanto, este procedimento não foi realizado.

No último período, para o SEC a mediana teve o valor reduzido, assim como todos os dados de vazão. Por outro lado nos vasos apenas com solo, a vazão se manteve em torno de 2,0 L h⁻¹ com pequena variação temporal, e com valores próximos durante todo o período avaliado, sem entupimento por sucção de partículas de solo.

Figura 29 - Vazão nos emissores do sistema E com cultura (SEC) e com solo (SES)

Na Tabela 8 apresentam-se as vazões relativas médias ($QR_{média}$) na linha lateral, os coeficientes de variação da vazão relativa ($CVQR$), e o coeficiente de uniformidade de emissão (CUE), avaliados ao longo do tempo para: sistema “B” com cana (SBC) e com solo (SBS), sistema “C” com cana (SCC), sistema “D” com cana (SDC) e com solo (SDS), sistema “E” com cana (SEC) e com solo (SES).

Pela Tabela 8 pode ser observado que os valores de $QR_{média}$ estiveram próximas da unidade, para os sistemas SDC, SDS e SES ao longo do tempo de avaliação, não ocorrendo redução na vazão, por raiz no SDC ou partículas de solo no SDS e SES. Os sistemas SBS, SDC, SDS e SES mantiveram as vazões relativas iguais em todos os períodos avaliados. Por outro lado, nos sistemas SBC e SCC houve variações nos valores de $QR_{média}$ ao longo do tempo, o que pode ter ocorrido devido à variação de temperatura da água, e pressão positiva do solo, conforme discutido anteriormente.

Os sistemas SDC, SDS e SES apresentaram os maiores valores de $QR_{média}$ nos períodos avaliados, seguidos por SBC, SBS, SCC e por último, com menor valor, o sistema SEC.

A $QR_{média}$ do sistema SEC foi maior que 0,85 até o terceiro trimestre avaliado (abril de 2011), entretanto, nas duas últimas avaliações a mesma reduziu para valores estatisticamente menores dentre os sistemas e os períodos. Na última avaliação prevaleceu entupimento total de alguns emissores no SEC, assim como foi encontrado por Coelho et al. (2007), para partículas sólidas na malha hidráulica, e parcial para a maioria.

Os resultados de CVQR foram variáveis ao longo do tempo, assim como a $QR_{média}$. Notam-se valores mais altos para o SEC devido a problemas de entupimento, entretanto, isto também ocorreu com os emissores que utilizaram membrana elástica, instalados tanto em solo quanto em cultura. Neste caso também se inclui aqueles emissores que não tiveram problemas com intrusão radicular e partículas de solo (SBC, SBS e SCC), conforme será visto na Tabela 9 e Figura 31, devido ao aspecto construtivo, por apresentarem alto coeficiente de variação de fabricação.

Os dados de CVQR analisados conforme CVF, para o SDC, SES e SDS atingiram classificação boa pela ABNT (1986), sendo os dois primeiros classificados por Solomon (1984) como excelente e o último como médio. Com os sistemas SBC, SBS e SCC se obtiveram classificação média (SBC) e marginal (SBS e SCC) pela ABNT (1986) e inaceitável por Solomon (1984). Por outro lado para o SEC o CVQR em todos os trimestres de avaliação e o valor médio dos trimestres foi considerado inaceitável conforme Solomon (1984) e ABNT (1986).

Os emissores dos sistemas SBC, SBS e SCC, embora tenham apresentado CUE fora do padrão ASAE (1993), assim como foi visto no teste de laboratório apresentado anteriormente (Tabela 5), ao longo do período avaliado, os valores estiveram próximos à média. Isso indica que a uniformidade se manteve conforme os resultados inicialmente obtidos. Os sistemas SDC, SDS e SES mantiveram alta uniformidade em todo o período avaliado, por outro lado, no SEC a mesma foi reduzida em cada período avaliado, indicando que o processo de intrusão radicular (Figura 31) além de reduzir a vazão, possibilitou também a redução da uniformidade da vazão. Isso ocorreu porque, embora a umidade do solo tenha sido mantida similar nos vasos, possivelmente, a raiz introduzida pode obstruir o orifício de cada emissor de forma particular.

Tabela 8 - Vazões relativas médias ($QR_{média}$) na linha lateral, coeficiente de variação da vazão relativa (CVQR) e coeficiente de uniformidade de emissão (CUE) nos diferentes sistemas e períodos avaliados

Período avaliado	Sistemas utilizados						
	SBC	SBS	SCC	SDC	SDS	SEC	SES
	-----QR _{média} (adimensional)-----						
Out 2010	0,75 Ba	0,74 Ba	*	0,99 Aa	0,99 Aa	0,86 Ba	0,99 Aa
Jan 2011	0,81 Ba	0,85 Ba	0,87 Ba	0,96 Aa	0,98 Aa	0,85 Ba	0,97 Aa
Abr 2011	0,92 Aa	0,81 Ba	0,83 Ba	0,97 Aa	0,98 Aa	0,85 Ba	0,97 Aa
Jul 2011	0,81 Ba	0,81 Ba	0,85 Ba	0,96 Aa	0,97 Aa	0,51 Cc	0,98 Aa
Jan 2012	0,89 Aa	0,84 Ba	0,91 Aa	0,95 Aa	1,00 Aa	0,44 Cc	1,00 Aa
Média	0,84 b	0,81 b	0,86 b	0,97 a	0,98 a	0,69 c	0,99 a
	-----CVQR (%)-----						
Out 2010	25,70	25,90	*	2,50	4,93	35,59	2,91
Jan 2011	13,75	26,38	26,29	2,85	6,38	35,49	1,68
Abr 2011	12,83	24,30	28,05	2,90	6,38	35,60	3,71
Jul 2011	19,50	25,10	24,87	2,84	4,40	58,21	1,66
Jan 2012	12,26	23,82	15,54	2,80	4,92	59,79	2,86
Média	16,21	25,10	23,68	2,78	5,40	44,93	2,56
	-----CUE (%)-----						
Out 2010	58,00	52,29	*	93,00	94,00	86,98	94,00
Jan 2011	57,60	52,10	50,26	93,30	93,50	85,30	94,26
Abr 2011	50,00	50,00	45,90	92,30	93,40	82,30	93,23
Jul 2011	54,60	46,57	45,70	92,10	93,40	65,33	95,12
Jan 2012	55,45	48,23	55,43	92,00	93,00	58,13	93,06
Média	53,33	49,84	48,87	92,03	93,00	72,43	94,44

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Tukey a 1%

SBC - sistema “B” com cana; SBS - sistema “B” com solo; SCC - sistema “C” com cana; SDC - sistema “D” com cana;

SDS - sistema “D” com solo; SEC - sistema “E” com cana; SES - sistema “E” com solo

*período em que o sistema ainda não havia sido instalado

Na Figura 30 apresentam-se os resultados das avaliações do distúrbio de vazão (DQ) médio em cada época, determinados de Outubro de 2010 a Janeiro de 2012 para os sistemas “B”, “C”, “D”, e “E”, sendo: sistema “B” com cana (SBC) e com solo (SBS), sistema “C” com cana (SCC), sistema “D” com cana (SDC) e com solo (SDS), sistema “E” com cana (SEC) e com solo (SES)

As análises do distúrbio de vazão devem ser realizadas juntamente com o CVQR e CUE, ao longo de todos os períodos avaliados, além disso, deve-se verificar se existem tendências em incremento ou redução do mesmo, ao longo dos períodos de avaliação. Apenas os valores de DQ não são suficientes para concluir sobre a eficiência do emissor em obstar a entrada de raiz e partículas de solo por sucção, tendo em vista que, devido a variações na vazão no momento da avaliação em campo, por problemas já comentados, o valor de DQ, pode não refletir problema de entupimento do emissor. Tal afirmação pode ser comprovada quando se avaliam os sistemas SBC, SBS e SCC. Nota-se que para os emissores de tais sistemas, embora tenham ocorrido DQ entre 11 e 24%, considerados altos, os mesmos tiveram altos valores CVQR e baixos valores de CUE, porém sem tendência de aumento (Tabela 8), e não apresentaram entupimento de qualquer natureza, conforme será visto na Figura 29, descrito na Tabela 9.

Em uma análise similar à anterior, para os emissores dos sistemas SDC, SDS, e SES, o distúrbio de vazão foi baixo, com valores menores que 5% em todos os períodos de avaliação. No entanto, os resultados apresentados na Tabela 8 mostraram que os valores de CVQR foram baixos e de CUE foram altos em todos os períodos, indicando uma possível relação entre distúrbio de vazão e CVQR, para emissores compostos por elastômeros e que não tenham compensação de pressão.

O sistema SEC apresentou um DQ ascendente após o segundo período de avaliação, passando de 15 para 56%. Para este sistema ocorreram dois emissores totalmente entupidos e outros oito com entupimento parcial na linha lateral de irrigação.

Figura 30 - Distúrbio de vazão médio obtido em cada emissor do sistema com solo e com cana

4.3.4 Intrusão de raiz e partículas de solo nos emissores

Em um corte transversal realizado nos emissores, observam-se os aspectos finais destes em relação à entrada de partículas de solo e raiz, para o sistema “B” com cana (SBC) e com solo (SBS), sistema “C” com cana (SCC), sistema “D” com cana (SDC) e com solo (SDS), sistema “E” com cana (SEC) e com solo (SES), conforme apresentado nas Figuras 31 A, B, C, D, E, F, e G.

Na Tabela 9 apresentam-se um resumo dos resultados da avaliação visual dos emissores, quanto à presença de partículas de solo, presença de raiz, entupimento total e entupimento parcial

Observa-se que nenhum dos emissores apresentou entupimento por sucção de partículas de solo, embora nos sistemas SDS e SES tenham ocorrido presença de solo dentro do tubo protetor e no emissor, respectivamente. No sistema SDC além de solo, ocorreu presença de raiz no tubo protetor e no microtubo, contido nos emissores 5, 7 e 9, da linha lateral, embora não tenha ocorrido entupimento do emissor, conforme os dados de QR e DQ apresentados, uma vez que para entupi-lo seria necessário, primeiro, obstruir o microtubo (diâmetro interno de 4,8 mm).

Entretanto, com maior tempo de uso, possivelmente iria entupir. A presença de solo no sistema SDC, possivelmente ocorreu pelo fato de ter sido utilizado um tubo protetor (Figura 31 E) pequeno (10 cm). Além disso, pelo fato de o tubo ter a parte de saída totalmente aberta, a ascensão da água dentro do mesmo possibilitou acúmulo de solo, principalmente se a infiltração foi dificultada, permitindo as raízes crescessem em seu interior, e no microtubo, não sendo cumprida a hipótese proposta nesta pesquisa, de que não haveria água, nutrientes e solo dentro do tubo.

Em todos os emissores do sistema SEC houve presença de raiz e entupimento parcial por raiz, tendo-se entupimento total nos emissores 5 e 9 da linha lateral, o que contribuiu para redução nos valores de QR, e aumento do DQ (Tabela 8). Nos sistemas SBS, SBC e SCC não houve presença de solo nem raiz, confirmando que os altos valores de CVQR, baixos CUE e menor QR não indicaram entupimento, conforme descrito anteriormente, mas, problema físico do material que compõe o emissor, devendo este ser aperfeiçoado.

(A) SBS

(B) SBC

(C) SCC

(D) SDS

(E) SDC

(F) SES

(G) SEC

Figura 31 - Aspectos finais dos emissores em relação à entrada de partículas de solo e raiz, para os emissores do sistema "B" com cana (SBC) e com solo (SBS), sistema "C" com cana (SCC), sistema "D" com cana (SDC) e com solo (SDS), sistema "E" com cana (SEC) e com solo (SES)

Tabela 9 - Avaliação visual quanto ao processo de intrusão de raiz e partículas de solo dentro de cada emissor na linha lateral de irrigação para os emissores do sistema “B” com cana (SBC) e com solo (SBS), sistema “C” com cana (SCC), sistema “D” com cana (SDC) e com solo (SDS), sistema “E” com cana (SEC) e com solo (SES)

Número do emissor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Emissor avaliado SBC/SBS/SCC										
Presença de solo	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Presença de raiz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Entupimento total	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Entupimento parcial	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Emissor avaliado SEC										
Presença de solo	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Presença de raiz	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Entupimento total	N	N	N	N	P	N	N	N	P	N
Entupimento parcial	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Emissor avaliado SDC										
Presença de solo	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Presença de raiz	N	N	N	N	P	N	P	N	P	P
Entupimento total	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Entupimento parcial	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Emissor avaliado SDS/SES										
Presença de solo	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Presença de raiz	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Entupimento total	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Entupimento parcial	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

P- presença

N- Ausência

5 CONCLUSÕES

- Embora não tenha ocorrido entupimento no emissor “D” até o momento de avaliação, a hipótese de que não haveria solo, água e nutrientes dentro do tubo protetor do emissor não se confirmou, indicando que para maior tempo de uso, possivelmente haveria entupimento, devido à presença confirmada de solo e raízes dentro do tubo;
- O modelo utilizado no sistema “E” apresentou problemas de entupimento por raiz, portanto, o mesmo não é indicado para uso em irrigação por gotejamento subsuperficial, nas condições analisadas nesta pesquisa;
- O emissor com mecanismo mecânico-hidráulico e proteção da membrana (modelo “C”) apresentou boa performance em relação ao impedimento da intrusão de raiz e solo no mesmo, sendo este, indicado para estudos posteriores.

6 CONSIDERAÇÕES

- A membrana empregada nos emissores deverá se utilizada com função de abertura e fechamento da saída de água, objetivando evitar a intrusão radicular, enquanto o controle da vazão deverá ser realizado por um dispositivo a ser desenvolvido, no sentido de aumentar a uniformidade da vazão;
- As Equações propostas para avaliação do comportamento da membrana possibilitarão estudos que visem o aperfeiçoamento do protótipo modelo “C”, podendo ser produzidas membranas com características específicas para construção do emissor;
- Para trabalhos futuros, além de estudos sobre uma membrana adequada, sugere-se análise dimensional e de semelhança dos parâmetros que influenciam na vazão do emissor, para estimativa desta, e para desenvolvimento de protótipos com quaisquer dimensões. Estudos como estes podem envolver análise por Métodos numéricos, Equação de Navier-Stokes e Elementos finitos.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciencia Solo**, Viçosa, v.28, p.337-345, 2004.
- ASAE EP 405.1 **Standards, Design and Installation of Microirrigation Systems**. St. Joseph, 1993. p.693-696.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Requisitos mínimos para elaboração de projetos de sistema de irrigação localizada: **PNBR 12: 02. 08 - 022**. São Paulo, 1986.18p.
- BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. cap.2, p.24-37.
- BOTÍA, P.; GARCÍA, J.; ROMERO, P. Cost-benefit analysis of a regulated deficit-irrigated almond orchard under subsurface drip irrigation conditions in Southeastern Spain. **Irrigation Science**, New York, v.24, p.175-184, 2006.
- BRALTS, V.F.; EDWARD, D.M.; WU, I.P. Drip irrigation design and evaluation based on statistical uniformity concept. In: HILLEL, D. (Ed). **Advances in irrigation**. Orlando: Academic Press. v.4, p.67-117, 1987.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- CARARO, D.C.; BOTREL, T.A.; HILLS, D.J.; LEVERENZ, H.L. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, Mich, v.22, n.2 p. 251-257, 2006.
- CLOI, C.Y.; SUAREZ-REY, E.M. Subsurface drip irrigation for bermudagrass with reclaimed water. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, Mich, v.47, n.6, p.1943-1951, 2004.
- COELHO, R.D.; FARIA, L.F.; MÉLO, R.F. Variação de vazão em gotejadores convencionais enterrados por intrusão radicular na irrigação de citros. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.2, p.230-245, abril-jun. 2006.
- COELHO, R.D.; VILELA, L.A.A.; RESENDE, R.S.; TEIXEIRA, M.B.; SÁ, J. SACOL. DE. Entupimento de gotejadores em decorrência de pulsos de partículas sólidas na malha hidráulica. **Irriga**, Botucatu, v.12, n.1, p.108-122, jan.-mar. 2007.
- DALRI, A.B. **Avaliação da produtividade da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial nos três primeiros ciclos**. 2004. 89 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2004.
- DANTAS NETO, J.; MEDEIROS, M.G.A. De.; AZEVEDO, C.A.V. De.; ZEVEDO, H.M. De. Performance Hidráulica e Perfil de Distribuição de Água do Microaspor Naan

7110, Sob Diferentes Condições de Vento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p.57-61, 1997.

DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane**. Wageningen: Veeman e Zonem, 1952. 371p.

FARIA, L.F. **Variação de vazão de gotejadores enterrados na irrigação de citros e café**. 2002.103p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GIL, M.; RODRIGUES-SINOBAS, L.; JUANA, L.; SÁNCHEZ, R.; LOSADA, A. 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, 2008.

HEARN, E.J. **Mechanics of materials 1**: an introduction to the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural components. 3rd ed. Oxford; New York: Butterworth Heinemann, 1997. p.1038.

HERNANDEZ, M.G.R. **Proteção de gotejadores à obstrução por intrusão radicular em irrigação subsuperficial de figueiras**. 2010. 136 p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

HOLZAPFEL, E.A.; MARINO, M.A.; VALENZUELA, A. Drip irrigation nonlinear optimization model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.4, p.479-96,1990.

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar var. Co. 290, em solo tipo terra-roxa-legítima. **Bragantia**, Campinas, v. 16, n.1, p.1-13, 1957.

JENSEN, J.H. **Some studies of root habits of sugar cane in Cuba**. Yonkers, New York: Tropical plant research foundation, 1951. 37p.

JUAN, J.A.M.S. **Riego por goteo: teoría y práctica**. 4 ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2000. 302p.

KARMELI, D.; KELLER, J. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Mich, v.17, p.678-684, 1974.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora, Rain bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 133p.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 415-423, 2004.

LEE, H.A. The distribution of the roots of sugar cane in the soil in the Hawaiian Islands. **Plant Physiology**, Washington, v.1, p.363-378, 1926.

MARQUES, P.A.A.; FRIZZONE, J.A.; TEIXEIRA, M.B. O estado da arte da irrigação por gotejamento subsuperficial. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 2, n.1, p.17-31, Mar. 2006.

MARTINS, C.C.; SOARES, A.A.; BUSATO, C.; REIS, E.F. Dos. Manejo da irrigação por gotejamento no cafeeiro. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.23, n.2, p.61-69, 2007.

MAY, D.; Hanson, B. The effect of drip line placement on yield and quality of drip-irrigated processing tomatoes. **Irrigation and Drainage System**, New York, v.21, p.109-118, 2007.

MAYERS, L.E.; BUCKS, D.A. Uniform Irrigation with low-pressure trickle system. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.100, n.3, p.341- 347, Sep.1972.

MEAD, R. **Root intrusion prevention**. Disponível em: <http://www.geoflow.com/roottfn/IApaperTFNapplicationsfinal.html>>. Acesso em: 20 mar. 2011.

MOSCA, M.A.; TESTEZLAF, R.; GOMES, E.P. Desenvolvimento de emissores alternativos para irrigação subsuperficial de baixa pressão. **Irriga**, Botucatu, v.10, n.3, p.249-262, ago.-out. 2005.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation Science**, New York, v.12, p.187-92, 1991.

PARKES, M.; YAO, W. W.; MA, X. Y.; LI, J. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, New York, v.29, n.4, p.331-339, outubro 2010. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content>>. Acesso em: jun 2011.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frequência**. Madrid: Mundi-Prensa, 1996, 513p.

RAJPUT, T.B.S.; PATEL, N. Effect of subsurface drip irrigation on onion yield. **Irrigation Science**, New York, v.27, n.2, p.97-108, 2009.

RECIPIENTES y tubos. Disponível em: <<http://www.sitenordeste.com/mecanica/recipientes-y-tubos.htm>>. Acesso em 8 nov. 2011.

RESENDE, R.S. **Intrusão radicular e efeito de vácuo em gotejamento enterrado na irrigação de cana-de-açúcar**. 2003. 143p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - ESALQ/USP, Piracicaba, 2003.

RESENDE, R.S.; COELHO, R.D.; LEAL, M.L. Da SILVA.; Da MATA, S.S. Susceptibilidade à intrusão radicular de gotejadores convencionais na irrigação subsuperficial de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.150-165, mai.-ago.2004.

RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; LOSADA, A. Effects of temperature changes on emitter discharge. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.125, p.64-73, 1999.

SAAD, J.C.C. **Otimização de sistemas de irrigação localizada utilizando programação não linear**. Piracicaba,1993.115f. (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

SANTOS, C. **Estatística descritiva**: manual de auto-aprendizagem. Lisboa: Edições Sílabo, 2007. 264 p.

SCHMIDT, M.V.V. **Características hidráulicas do tubo gotejador “Queen Gil”**. 1995.43p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa,1995.

SHANI, U.; OR, D. In situ method for estimating subsurface unsaturated hydraulic conductivity. **Water Resource Research**, Washington, v.21, n.8, p. 1863 -1870, 1995.

SHANI, U.; XUE, S.; GORDIN-KATZ, R.; WARRICK, A.W. Soil-limiting from Subsurface Emitters. I: Pressure Measurements, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.122, n.5, p. 291-295, 1996.

SIMUNEK, J.; KANDELOUS, M.M. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, New York, v.28, p.435-444, 2010.

SINGH D.K.; RAJPUT, T.B.S.; SIKARWAR, H.S.; SAHOO, R.N.; AHMED, T. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. **Agriculture Water Management**, Phoenix, v.83, n.2, p.130-134, 2006.

Solomon, K.H. Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. **Irrigation Science**, New York, v.5, p.161-172, 1984.

SOUZA, L.O.C. De.; MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.A.; RAMOS, M.M.; FREITAS, P.S.L. Avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento, utilizados na cafeicultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.541-548, 2006.

SUAREZ-REY, E.M.; CHOI, C.Y.; MCCLOSKEY, W.B.; KOPEC, D.M. Effects of chemicals on root intrusion into subsurface drip emitters. **Irrigation and Drainage**, Slough, v.55, n.5, p. 501-509, 2006.

TABATABAEI, S.H.; NAJAFI, P. Effect of using subsurface drip irrigation and et-hs model to increase wue in irrigation of some crops. **Irrigation and drainage**, Slough, v.56, n.4, p.477-486, 2007.

TIMOSHENKO, S. **Resistência de materiais**: Teoría y prolemas más complejos. Traduzido por Tomás Delgado Pérez de Alba. Madrid: Espasa-Calpe, 1975. 431p.

UNIVERSIDADE DE CALIFÓRNIA. Maintaining irrigation system. **Agricultural and natural Resources**, publication 21637, 2008. 19p.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. Campina Grande: UFPB, CCT, 1997. 184 p.(Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 36.).

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. **Environmental hydrology**. 2nd^a ed. Boca Raton:Lewis Publishers, 2004. 475p.

WILLMOTT, C.J.; ROBESON, S.M.; MATSUURA, K. Short communication: A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, Chichester, Published online in Wiley Online Library, DOI: 10.1002/joc.2419, 2011.