

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**BULBOS ÚMIDOS A PARTIR DA IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL COM ÁGUA DE
ABASTECIMENTO E EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO**

MARCELO LEITE CONDE ELAIUY

CAMPINAS

FEVEREIRO DE 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**BULBOS ÚMIDOS A PARTIR DA IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL COM ÁGUA DE
ABASTECIMENTO E EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO**

Dissertação submetida à banca examinadora
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola na área de concentração
em Água e Solo.

MARCELO LEITE CONDE ELAIUY

Orientador: Prof. Dr. Edson Eiji Matsura

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

EL12b	<p>Elaiuy, Marcelo Leite Conde Bulbos úmidos a partir da irrigação por gotejamento subsuperficial com água de abastecimento e efluente de esgoto tratado / Marcelo Leite Conde Elaiuy. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: Edson Eiji Matsura. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.</p> <p>1. Fertirrigação. 2. Águas residuais. 3. Irrigação por gotejamento. I. Matsura, Edson Eiji. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Wet bulb from the subsurface drip irrigation with water supply and treated sewage effluent

Palavras-chave em Inglês: Fertigation , Wastewater, Subsurface drip irrigation

Área de concentração: Água e solo

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Regina Célia de Matos Pires, Claudinei Fonseca de Souza

Data da defesa: 29/02/2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Marcelo Leite Conde Elaiuy**, aprovado pela Comissão Julgadora em 29 de fevereiro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



DEDICATÓRIA

É imprescindível dedicar este trabalho:

Aos meus pais Marco Antonio e Mariangela que com grande sabedoria me educaram para que eu pudesse seguir o meu caminho.

À Lídia Galdino, esposa e companheira que me ensinou o “jeito mineiro” de ver a vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Edson Eiji Matsura, pela sua amizade, pelo seu apoio e por acreditar na capacidade de alcançarmos os nossos objetivos.

Ao Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar, pela amizade e apoio incomensurável nos ensinamentos sobre a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo.

À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) pela infra-estrutura e suporte necessários para realização deste trabalho.

Aos professores da área de Água e Solo da FEAGRI, em especial ao Prof. Dr. Roberto Testezlaf que sempre se prontificou em colaborar com seu conhecimento na correção da minha pesquisa.

Ao Prof. Dr. Silvio Crestana da Universidade de São Paulo, pelo conhecimento e experiência trocados na disciplina: “Dinâmica da água e do soluto na região não saturada do solo”.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

Aos técnicos do Laboratório de Hidráulica e Irrigação, Túlio Assunção Pires Ribeiro e em especial ao Gelson Espíndola da Silva, pela amizade, iniciativa e pela demonstração dos seus conhecimentos técnicos na montagem do experimento em campo.

Ao técnico do Laboratório de Saneamento Giovani Archanjo Brota pela colaboração com a instrumentação utilizada em algumas etapas da pesquisa.

Aos meus companheiros e companheira de sala, Franciana, Allan e Leonardo pelo aprendizado mútuo e pelos momentos de descontração.

Aos alunos do curso de pós-graduação da FEAGRI, pelo companheirismo e amizade de Marcio, Fábio, Rhuanito, Douglas, Maycon, Ronny, Gustavo, Eduardo, Daniel e Natalia.

Aos alunos da pós-graduação do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar Bruno de Lima Santoro e Lucas Massayuki Sato, pela troca de informações e experiências com a técnica da TDR.

Aos alunos de iniciação científica, Maurício, Thomaz, Romeu e Ana, pela amizade e contribuição neste trabalho.

À Coordenadoria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e não foram citados.

EPÍGRAFE

*“Sem vazios não há pensamento, não há
mais futuro nem controle, só mutações
sem sabermos para onde vamos .”*

Arnaldo Jabor

RESUMO

O uso de efluente de esgoto tratado (EET) na agricultura combinado com o método de irrigação por gotejamento subsuperficial (IGS) pode reduzir os custos de produção agrícola, fertirrigando de maneira eficiente as culturas. O conhecimento da dinâmica da água e do soluto no solo ao redor do gotejador contribui para o dimensionamento da IGS. Neste estudo, comparou-se as dimensões do bulbo úmido formado pela aplicação de EET e água de abastecimento municipal (AAM) em um Latossolo Vermelho distroférico, para verificar o efeito da qualidade da água e da vazão entre gotejadores utilizados na cultura da cana-de-açúcar. O experimento de campo foi conduzido na Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp aonde foram instaladas sondas de TDR, utilizadas para estimar a distribuição do conteúdo de água no solo e a condutividade elétrica (CE). Três trincheiras foram abertas e as sondas foram dispostas a 0,15; 0,25; 0,35; 0,45; 0,55 e 0,65 m de profundidade, e a 0,05; 0,15; 0,25 e 0,35 m de distância do gotejador, totalizando 21 sondas em malha por trincheira. Em duas paredes opostas de cada trincheira utilizou-se um gotejador enterrado a 0,30 m para cada uma das vazões constantes, $1,0 \text{ L h}^{-1}$ e $1,6 \text{ L h}^{-1}$. O volume molhado no solo foi observado ao longo do tempo em cada aplicação de 1,0 L de AAM, totalizando 10 aplicações. Após um período de 15 dias foi adotada a mesma metodologia de aplicação, e observado o volume molhado no solo com EET. Os resultados dos diferentes perfis de umidade do solo mostraram que as dimensões vertical e horizontal do bulbo úmido são similares para a AAM e para o EET, sendo peculiares de acordo com as vazões utilizadas e volume aplicado. Observou-se também para o EET uma maior concentração de soluto próximo ao gotejador decaindo progressivamente com a frente de molhamento.

PALAVRAS-CHAVE: Fertirrigação; Águas Residuais; Irrigação por Gotejamento.

ABSTRACT

The use of treated sewage effluent (TSE) in agricultural combined with the subsurface drip irrigation (SDI) method may decrease the costs in agricultural production, in attempts to fertigate crops more efficiently. The precise knowledge about the dynamic of water and solute in the soil around the emitters contribute for a proper design of SDI. In this study, we compared the dimensions of the wet bulb formed by the application of TSE and municipal water supply (MWS) in a dusk red latosol, to evaluate the effect of water quality and discharge between drippers, used in sugar cane crop. The field experiment was conducted at the College of Agricultural and Engineering/State University of Campinas, where TDR probes were used to monitor the distribution of soil water content and electrical conductivity (EC). Three trenches were opened and 21 three-rod TDR probes were installed, placed at 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55 and 0.65 m – in depth, and 0.05, 0.15, 0.25 and 0.35 m – distance from the dripper, totaling 21 probes in mesh per trench. In two opposite walls of each trench this procedure was replicated using a dripper buried at 0.30 m for each constant discharge of 1.0 L h^{-1} and 1.6 L h^{-1} . The wetted soil volume was observed over time in each application with 1 L of MWS, totaling 10 applications. After a period of 15 days, was adopted the same methodology of application and the wetted soil volume was observed with TSE. The results from different wetted soil profiles indicated that dimensions vertical and horizontal of the wet bulb are similar for the MWS and TSE, being peculiars according to the discharges used and volume applied. We also observed for the TSE greater solute concentration near the emitter decreasing progressively towards the wetting front.

KEYWORDS: Fertigation; Wastewater; Drip Irrigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Demandas consultivas no país. Fonte: ANA (2011).....	6
Figura 2. Ilustração das dimensões adotadas no plantio e na irrigação subsuperficial da cana-de-açúcar. Adaptado de GAVA et al. (2011)	20
Figura 3. Ilustração do bulbo úmido.....	21
Figura 4. Foto de satélite da área experimental com detalhe circular em branco do local aonde foi realizado o experimento	23
Figura 5. Sistema integrado e reúso agrícola de esgoto da instalado na Feagri/Unicamp	25
Figura 6. Efluente de esgoto doméstico tratado utilizado no experimento	25
Figura 7. Sonda de TDR utilizada no experimento	28
Figura 8. Abertura das trincheiras e instalação das sondas	29
Figura 9. Esquema da disposição em malha das sondas e posição do emissor na parede da trincheira.....	29
Figura 10. Caixas plásticas para proteção dos cabos coaxiais e dos conectores BNC	30
Figura 11. Conjunto de equipamentos utilizados na leitura e aquisição de dados	30
Figura 12. Mesa de ensaio utilizando água de abastecimento municipal.....	33
Figura 13. Conjunto moto-bomba, regulador de pressão, filtro, registros e “bypass”utilizados no experimento para realizar a irrigação.	34
Figura 14. Sistema hidráulico (linha secundária) para aplicação da AAM e do EET no solo ..	35
Figura 15. Instalação do gotejador na parede da trincheira.....	35
Figura 16. Visão geral do experimento montado em campo.....	36
Figura 17. Perfis de umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) entre cada aplicação de 1L de AAM (V1-V10) na vazão de $1,0 L h^{-1}$	40
Figura 18. Perfis de umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) entre cada aplicação de 1 L de EET (V1-V10) para a vazão de $1,0 L h^{-1}$	41
Figura 19. Regressões lineares entre as dimensões do bulbo (r; +z; -z) em cada aplicação de EET e AAM e as respectivas correlações para a vazão de $1,0 L h^{-1}$	42
Figura 20. Perfis de umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) entre cada aplicação de 1 L de AAM (V1-V10) para a vazão de $1,6 L h^{-1}$	44
Figura 21. Perfis de umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) entre cada aplicação de 1 L de EET (V1-V10) para a vazão de $1,6 L h^{-1}$	45

Figura 22. Regressões lineares entre as dimensões do bulbo (r; +z; -z) em cada aplicação de EET e AAM e as respectivas correlações para a vazão de 1,6 L h ⁻¹	46
Figura 23. (A) Relação entre a área subsuperficial molhada e o volume teórico aplicado para os tratamentos A1 e E1; (B) Correlação entre as áreas subsuperficiais molhadas dos tratamentos A1 e E1.	49
Figura 24. (A) Relação entre a área subsuperficial molhada e o volume teórico aplicado para os tratamentos A1,6 e E1,6; (B) Correlação entre as subáreas superficiais molhadas dos tratamentos A1,6 e E1,6.	49
Figura 25. Perfis de condutividade elétrica do solo (dS m ⁻¹) entre cada aplicação de 1L de EET (V1-V10) na vazão de 1,0 L h ⁻¹	51
Figura 26. Perfis de condutividade elétrica do solo (dS m ⁻¹) entre cada aplicação de 1L de EET (V1-V10) na vazão de 1,6 L h ⁻¹	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT), para seis diferentes profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico.....	24
Tabela 2. Valores médios da análise química realizada inicialmente na área experimental.....	24
Tabela 3. Análise físico-química do efluente de esgoto doméstico tratado e da água de abastecimento municipal antes da aplicação no solo.....	26
Tabela 4. Variação entre o volume teórico aplicado e o volume estimado (vazão 1,0 L h ⁻¹) ...	47
Tabela 5. Variação entre o volume teórico aplicado e o volume estimado (vazão 1,6 L h ⁻¹) ...	48
Tabela 6. Valores da CE a partir do gotejador no sentido da frente de molhamento.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS

1. Abreviaturas

AAM = Água de Abastecimento Municipal

DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO = Demanda Química de Oxigênio

Ds = Densidade do Solo

EET = Esgoto Doméstico Tratado

Macro = Macroporosidade

Micro = Microporosidade

PIB = Produto Interno Bruto

PT = Porosidade Total

RAC = Reator Anaeróbico Compartimentado

GS = Gotejamento Subsuperficial

SST = Sólidos Suspensos Totais

TDR = *Time Domain Reflectometry*

2. Siglas

ANA = Agência Nacional de Águas

CETESB = Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CIRRA = Centro Internacional de Referência em Reúso de Água

CONAMA = Conselho Nacional de Meio Ambiente

EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

NASA = North America Space Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

c = velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$)

Ca = teor de cálcio na água de irrigação

CE_s = condutividade elétrica da solução no solo

CE_{TDR} = condutividade elétrica TDR (aparente)

H = pressão de entrada do emissor

K = constante dielétrica

Ka = constante dielétrica aparente

Kd = coeficiente de descarga

kPa = Quilopascal

L = comprimento do sensor

La = comprimento aparente da sonda

Mg = teor de magnésio na água de irrigação

Na = teor de sódio na água de irrigação

p = coeficiente de reflexão da sonda

q = vazão do emissor

t = tempo

V_0 = amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR

V_1 = amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda

V_{inf} = amplitude do sinal de retorno depois de reflexões múltiplas

x = expoente de descarga

Z_0 = impedância característica da sonda

Z_u = impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

θ = umidade volumétrica

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESE	3
3. OBJETIVOS.....	4
3.1 <i>Objetivo Geral</i>	4
3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1 <i>Reutilização de Água na Agricultura</i>	5
4.2 <i>Tratamento do Esgoto Doméstico</i>	7
4.3 <i>Esgoto Doméstico Tratado – Alterações Físicas e Químicas no Solo</i>	9
4.4 <i>Monitoramento dos Solutos no Solo</i>	11
4.5 <i>Uso da Técnica da TDR</i>	12
4.6 <i>Irrigação por Gotejamento Subsuperficial e Espaçamento entre Gotejadores</i>	18
4.7 <i>Geometria e Dimensões do Bulbo Úmido</i>	20
5. MATERIAL E MÉTODOS	23
5.1 <i>Caracterização da Área e Localização do Experimento</i>	23
5.2 <i>Sistema de Tratamento de Água e Esgoto da Feagri</i>	24
5.3 <i>Tratamento</i>	27
5.4 <i>Caracterização e Instalação das Sondas de TDR</i>	27
5.5 <i>TDR, Multiplexação e Aquisição de Dados</i>	30
5.6 <i>Gotejadores</i>	32
5.6.1 <i>Determinação da Equação Característica Vazão-Pressão</i>	32
5.7 <i>Irrigação</i>	34
5.8 <i>Umidade e Condutividade Elétrica</i>	36
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6.1 <i>Análise dos Dados Experimentais</i>	38
6.3 <i>Volume Aplicado e Área Subsuperficial Molhada</i>	47

6.4 Condutividade Elétrica do EET no Solo.....	50
7. CONCLUSÕES.....	54
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
9. ANEXOS.....	64

1. INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada tem uma importância significativa na economia brasileira. As atividades da agropecuária e do agronegócio, ou seja, os negócios relacionados à agricultura representam uma parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. As altas cotações de importantes produtos agrícolas, como algodão, soja, café, milho e laranja são responsáveis pela manutenção da balança comercial do nosso país.

Apesar de lucrativa, a agricultura irrigada é a atividade humana responsável pela maior demanda de água em termos mundiais, gerando conflitos em relação aos demais usos da água. Atualmente há uma tendência mundial que visa o uso de esgoto doméstico tratado (EET), para a irrigação na agricultura. O aproveitamento do EET na agricultura, além de atender as necessidades hídricas da cultura constitui uma prática de reúso de água e preservação da qualidade dos recursos hídricos, trazendo outros benefícios como a contribuição para a nutrição das plantas, uma vez que, o custo dos adubos e fertilizantes implica em pressão sobre a margem de lucro dos produtores rurais.

A utilização do EET aliado a sistemas de irrigação que visem o manejo sustentável deste recurso implanta o conceito da agricultura moderna que não busca somente o aumento da produção de alimentos, mas prima também pela conservação do meio ambiente.

Dentre os vários sistemas utilizados, a irrigação localizada por gotejamento subsuperficial ao aplicar a água diretamente na zona radicular formando o bulbo úmido, mantém a umidade do solo nesta região próxima a capacidade de campo, minimiza as perdas evaporativas, além de reduzir os riscos de contaminação do meio ambiente uma vez que o solo é utilizado como meio depurador, possibilitando o seu uso para aplicação do EET. No entanto, torna-se necessário o conhecimento da capacidade de suporte de cada sistema solo-planta, para que se possa estabelecer a taxa de aplicação mais adequada preservando a integridade dos recursos naturais.

A adoção de tecnologias de custo elevado como o método de gotejamento subsuperficial conjuntamente com águas de baixa qualidade como os efluentes requer a utilização de técnicas adequadas de manejo de irrigação, visando o uso racional da água e fertilizantes e aumento da produtividade, tornando-se necessário o estudo da dinâmica da água e dos solutos quando aplicados em profundidade. Os principais problemas relacionados à

aplicação de efluente no solo são a salinização e a contaminação de águas profundas ocasionada pelo processo de lixiviação.

O dimensionamento do bulbo úmido auxilia na estimativa adequada do número de gotejadores por planta e de sua localização em relação às plantas ou fileiras de plantas, influencia diretamente os custos do projeto de irrigação e a produtividade das culturas. No Brasil, esta estimativa associada ao dimensionamento da irrigação é baseada nos processos de infiltração e distribuição de água, utilizando dados empíricos retirados da literatura e apresentados na forma de tabelas e fórmulas.

Embora existam alguns trabalhos visando o dimensionamento de bulbos úmidos na irrigação localizada por gotejamento subsuperficial nem todos utilizam o EET para obter informações sobre a sua dinâmica no interior do solo que possam contribuir no manejo da fertirrigação da cultura da cana-de-açúcar, elevando a produtividade desta cultura e reduzindo os custos com fertilizantes e consumo de água, avaliando concomitantemente possíveis impactos decorrentes da sua aplicação no meio ambiente.

2. HIPÓTESE

As dimensões do bulbo úmido formado a partir da aplicação do esgoto doméstico tratado por gotejamento subsuperficial em um Latossolo Vermelho distroférico não se alteram quando comparado com a aplicação de água de abastecimento municipal, independentemente da vazão aplicada.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Dimensionar os bulbos úmidos formados a partir da irrigação subsuperficial com água de abastecimento municipal e efluente de esgoto tratado.

3.2 Objetivos Específicos

- i) Aplicar subsuperficialmente água de abastecimento municipal e efluente de esgoto tratado em um determinado volume de solo ao longo do tempo;
- ii) Estimar a umidade volumétrica e a condutividade elétrica utilizando sondas de TDR instaladas no perfil do solo para dimensionar o bulbo úmido;
- iii) Identificar informações referentes aos bulbos úmidos formados com efluente de esgoto tratado e água de abastecimento municipal que possam auxiliar no manejo da irrigação localizada do tipo gotejamento subsuperficial da cultura da cana-de-açúcar.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Reutilização de Água na Agricultura

Os efluentes geralmente são subprodutos sólidos, líquidos ou gasosos provenientes dos processos industriais ou resultantes dos esgotos domésticos que são lançados no meio ambiente, podendo ser tratados ou não. Os efluentes líquidos podem ser classificados como águas residuárias. A Resolução CONAMA N°54 (2005) define água residuária: esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuárias, tratados ou não.

De acordo com LAVRADOR FILHO (1987), a reutilização de águas é o aproveitamento de águas que já foram utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original (abastecimento). Pode ser direto ou indireto, bem como decorrer de ações planejadas ou não.

A prática da disposição de esgotos domésticos no solo de acordo com MEHNERT (2003) não é de hoje. A Alemanha adota esta prática a mais de 300 anos; a Inglaterra começou a utilizá-la no século passado. Outros países como México, Austrália e Estados Unidos também são adeptos desta prática, principalmente na agricultura onde se têm observado aumento na produção em solos de baixa fertilidade. Pode-se dessa forma, controlar a poluição dos corpos hídricos e aproveitar os nutrientes visando o aumento da produção.

A utilização de métodos alternativos (como o reuso de água proveniente de estações de tratamento de esgoto) no fornecimento de água para irrigação se torna opção economicamente viável e ambientalmente sustentável, já que é grande a utilização de água pelo setor agrícola (ANA, 2011).

O princípio da sustentabilidade da água concorre de maneira adequada com a sua reutilização, e seu uso na agricultura é uma forma alternativa de controle das fontes poluidoras nos corpos d'água, além da reciclagem dos nutrientes e aumento da produção agrícola (REIS et al., 2005).

De acordo com ARAÚJO et al. (1999) a prática de irrigação com efluentes, deve ser feita de maneira criteriosa, fornecendo assim, os nutrientes necessários para a cultura a que se destina. A aplicação do efluente de esgoto doméstico na agricultura é um método de tratamento e limpeza quando de sua filtragem pelo solo, alimentando com isso o lençol freático.

Reutilizar esgotos domésticos tratados além de reduzir a quantidade de água retirada dos mananciais, preserva-os. Esta prática tem sido de interesse para a agricultura, levando-se em conta a grande quantidade de água normalmente necessária, em torno de 70% da disponibilidade hídrica no Brasil e cerca de 80% em alguns países (HESPANHOL, 2003).

Dentre outros motivos para a utilização do efluente de esgoto doméstico para fins agrícolas destacamos ainda o custo elevado dos fertilizantes e seus riscos para a saúde pública e sobre o solo, a quase não existência de fontes alternativas visando à irrigação de culturas, o elevado custo dos sistemas de tratamentos de esgotos para sua descarga em corpos receptores de efluentes, e principalmente a importância e o valor da prática da gestão de recursos hídricos atualmente reconhecido pelos órgãos gestores desta prática (HESPANHOL, 2003).

AIROLDI (2007) afirma que a água utilizada para a irrigação não deve competir com a água para o consumo humano. A água para irrigação será cada vez mais escassa e sua qualidade cada vez pior.

Assim, a utilização de esgotos tratados para fins agrícolas promove redução na captação de águas superficiais, menos poluição nos corpos hídricos (atuais depositórios de esgotos domésticos e industriais tratados ou não), é uma prática que deve ser aplicada e estudada, procurando-se diminuir os custos de tratamento, já que o solo atua como uma forma de tratamento natural, reduzindo também os custos com fertilizantes químicos (SANDRI, 2007).

Com relação aos usos consultivos da água de acordo com o Relatório de Conjuntura 2011 fornecido pela Agência Nacional de Aguas (ANA), o quadro da estimativa de demanda consultiva no país, manteve-se nos padrões apresentados no Relatório de Conjuntura 2009 e no Informe 2010, sendo a irrigação responsável pela maior retirada e consumo no país.

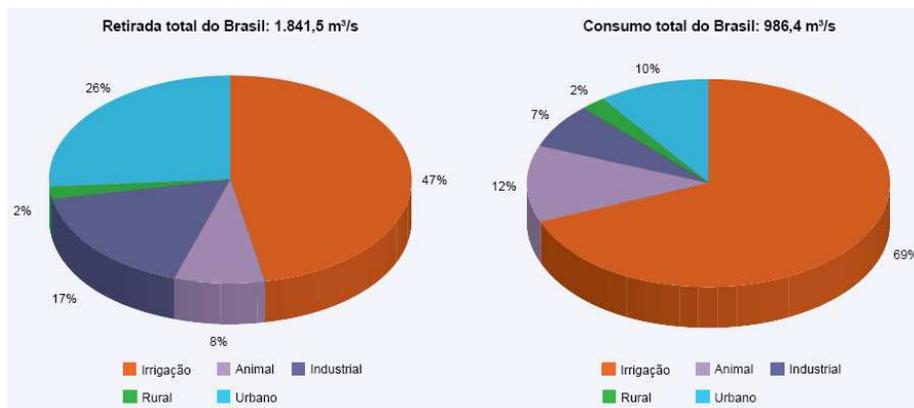


Figura 1. Demandas consultivas no país. Fonte: ANA (2011)

De acordo com o Centro Internacional de Referência em Reúso de Água – CIRRA (2002), os efluentes quando devidamente tratados podem ser utilizados em irrigação superficial de qualquer alimento, inclusive os consumidos crus, desde que não processados comercialmente; irrigação de pomares e vinhas de alimentos processados comercialmente e culturas não alimentícias (pastos, forragens).

A reutilização de águas no Brasil quando bem planejada ajudará os pequenos e médios agricultores no uso de uma água que muitas vezes se encontra escassa nos mananciais, principalmente naqueles que se encontram nas proximidades dos grandes centros urbanos. Porém, para isso, é necessário um sistema de tratamento adequado, oferecendo uma água de boa qualidade sanitária e com baixo custo (KÖNIG et al., 1998).

4.2 Tratamento do Esgoto Doméstico

Os sistemas de tratamento de esgotos domésticos podem ser de grande porte e de maior complexidade, quanto de pequeno porte, baixo custo e simplicidade operacional, tais como: tanques sépticos, lagoas de estabilização, reatores anaeróbios, disposição nos solos e leitos cultivados.

Os tanques sépticos foram concebidos por volta de 1860, na França, a partir de pesquisas realizadas por Jean Louis Mouras. Foi a primeira unidade inventada para tratamento de esgotos e até hoje é ainda amplamente utilizada, constituindo-se em uma das principais alternativas para tratamento primário de esgotos residências e de pequenas áreas não servidas por redes coletoras. São unidades de forma cilíndrica ou prismática, de fluxo horizontal, que desempenham as funções múltiplas de sedimentação da matéria sólida e remoção de materiais flutuantes, além de serem digestores de baixa carga, sem mistura e sem aquecimento.

A utilização de lagoas de estabilização para o tratamento de esgoto doméstico tem como produtos finais o lodo de esgoto e o efluente. Tais lagoas eliminam os principais agentes patogênicos do esgoto através do tratamento biológico primário e em alguns casos secundário, evitando assim a transmissão de doenças e reduzindo a carga elevada em matéria orgânica particulada (ANGELAKIS et al., 1999). Porém, o excesso de certas espécies químicas tais como os nutrientes (Nitrogênio e Fósforo, em suas formas disponíveis), os sais (principalmente NaCl), a matéria orgânica dissolvida e os potenciais poluentes metálicos, cuja

concentração é muito variável dependendo da origem do próprio esgoto, limitam a eficiência desses tratamentos (AL SALEM, 1999).

Outro método de tratamento de esgoto doméstico é o reator anaeróbio compartimentado (RAC). NOUR (1996), operando um RAC no tratamento de esgoto doméstico, obteve uma redução da DQO total situada entre 26,69% a 75,70%, sendo que as remoções de fósforo total e de nitrogênio total Kjeldahl foram pequenas. De acordo com HUSSAR (2001), a utilização de RAC no tratamento de águas residuárias de suinocultura, obteve uma redução na DQO que variou de 67,5% à 91,9%, por outro lado, as remoções de fósforo total e de nitrogênio total Kjeldahl foram baixas. Os estudos realizados indicam que o RAC é eficiente na remoção da DQO, contudo, é pouco eficiente na remoção de nitrogênio e fósforo devido às características do processo anaeróbio.

A disposição no solo de esgoto doméstico pode ser considerada como um tratamento terciário de efluentes, baseando-se no princípio de que o solo atua como um sistema filtrante, retendo ou eliminando os nutrientes, os poluentes e organismos patogênicos (BOUWER e CHANEY, 1974). Além da contaminação do meio, os esgotos domésticos, se aplicados no solo de modo aleatório, podem provocar alterações em suas propriedades físico-hídricas, dentre elas a condutividade hidráulica, porosidade total, distribuição da porosidade, responsáveis pelo movimento da água no solo.

Nos Estados Unidos, os leitos cultivados (ou *constructed wetland*) tornaram-se mais conhecidos a partir dos estudos de WOLVERTON (1988) para a Agência Espacial Norte Americana (NASA) onde o pesquisador testou o uso do tanque séptico associado aos leitos cultivados no tratamento de efluentes de casas não servidas pela rede de captação pública.

A associação dos leitos cultivados aos reatores anaeróbios compartimentados se mostrou muito promissora devido à eficiência na remoção da matéria orgânica, fácil implantação e baixo custo.

A Faculdade de Engenharia Agrícola e a Faculdade Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp realizaram pesquisas utilizando *wetlands* no pós-tratamento de efluente de esgoto doméstico e sua utilização na agricultura irrigada para a produção de espécies vegetais. ZANELLA (2008) relata que os reatores tipo *wetland*-construído de fluxo subsuperficial vegetados com plantas ornamentais, mostraram-se adequados como sistema de

pós-tratamento de esgotos domésticos, advindos de tratamento biológico anaeróbio proporcionando melhorias na qualidade e na aparência do esgoto tratado.

VALENTIN (2003) avaliou o desempenho de leitos cultivados ("constructed wetland") para tratamento de esgoto, e concluiu que o efluente final apresenta potencial de reúso agrícola devido aos baixos valores de sólidos suspensos totais, turbidez e certa quantidade de nitrogênio e fósforo.

A condutividade elétrica da água é o parâmetro mais empregado para avaliar a salinidade da água, a qual corresponde à medida da capacidade dos íons presentes na água em conduzir eletricidade, e cresce proporcionalmente ao aumento da concentração dos sais (RIBEIRO et al., 2005). Entretanto, quatro aspectos importantes devem ser considerados: salinidade, sodicidade, toxicidade de íons e teores de bicarbonato. Essas variáveis são fundamentais na determinação da qualidade agrônômica da água.

A condutividade elétrica do esgoto doméstico tratado deverá estar abaixo de 2,9 dS m⁻¹ (a 25°C) para limitar o risco de salinização do solo. Efluentes que apresentam condutividade elétrica entre 0,75 e 2,9 dS m⁻¹, somente podem ser utilizados para aplicação em solos bem drenados, sendo que as espécies cultivadas devem apresentar alta tolerância salina.

AYERS e WESTCOT (1985) estabeleceram alguns valores máximos e mínimos da condutividade elétrica para determinadas culturas. Segundo os autores, a tolerância deste parâmetro para a cultura da cana-de-açúcar está entre 1,7 e 19 dS m⁻¹.

4.3 Esgoto Doméstico Tratado – Alterações Físicas e Químicas no Solo

Em geral, os esgotos sanitários apresentam teores de macro e micronutrientes satisfatórios para a demanda da maioria das culturas. Porém, a presença de sais e sólidos dissolvidos fixos deve ser vista com atenção, já que tais características podem gerar um efluente salino, impróprio para a irrigação (FOLEGATTI, 1999).

O planejamento equivocado segundo BOND (1998) da aplicação de efluente de esgoto no solo poderá causar problemas, principalmente quanto à contaminação do solo e lençol freático por nitratos, compostos orgânicos, sodicidade, salinidade e metais pesados.

A análise dos efeitos da sodicidade e salinidade sobre as modificações nas propriedades físico-hídricas do solo e suas consequências na porosidade, permeabilidade,

capacidade de infiltração e retenção de água, tem gerado uma série de estudos. Todos os solos possuem sais solúveis em sua composição, e são essenciais para o desenvolvimento vegetativo. No entanto, em concentrações elevadas são nocivos, causando salinidade no solo.

A classificação dos solos em salinos e alcalinos tem como base os teores de sais solúveis e de sódio trocável. Uma das formas mais simples e úteis de determinar a concentração de sais solúveis é medir a condutividade elétrica do extrato de saturação.

De acordo com SANTOS (2004) os solos são considerados salinos quando possuem altas concentrações de sais solúveis; sódicos quando possuem altas concentrações de sódio trocável; e salino-sódicos quando apresentam altas concentrações de sais e sódio trocável.

JNAD et al. (2001a), analisaram as mudanças nas características químicas do solo devido a aplicação de efluente tratado em tanque séptico (tratamento primário) seguido de leitos cultivados com macrófita (tratamento avançado) utilizando o gotejamento subsuperficial como sistema de aplicação no solo em quatro locais diferentes, aplicando o volume de 2082 L no local 1 e 1893 L nos locais 2, 3 e 4. Retiraram amostras de solo a 0,08 m acima do gotejador, no nível do gotejador, 0,08 e 0,30 m abaixo do gotejador instalado no campo. Para a análise da concentração de Ca, K, Mg, Na e CE, utilizaram o método de extração solo:água de 1:2. Constataram que a aplicação de efluente resultou em aumento significativo de sódio no solo quando a concentração do mesmo no efluente era alta, e a concentração inicial no solo era baixa. A concentração de P aumentou significativamente próximo do emissor e na superfície do solo, por estar a linha de gotejador instalada a uma profundidade pequena. Não houve uma mudança drástica na concentração de nitrogênio total, Ca, Mg, K, carbono orgânico total e no conteúdo de sais no perfil do solo. Ainda de acordo com estes autores, a aplicação de efluente tratado utilizando a irrigação por gotejamento subsuperficial é relativamente recente, por isso poucas informações são encontradas sobre o impacto do uso deste tipo de água sobre as propriedades químicas do solo, nas vizinhanças do emissor.

RAMIREZ-FUNTES et al. (2002) verificaram ainda que as características do solo, não foram alteradas drasticamente, após vários anos de aplicação de efluente se esgoto doméstico tratado. No entanto, o uso contínuo deste tipo de efluente, pode elevar a salinidade e a sodicidade do solo, constituindo em ameaça para a produção das culturas futuramente implantadas.

A aplicação de efluentes com alta concentração de sódio eleva seu teor no solo, podendo acarretar expansão e dispersão das partículas de argila, resultando na alteração das características físicas do solo (JNAD et al., 2001b).

SANDRI et al. (2007) ao aplicar esgoto doméstico tratado por gotejamento superficial, subsuperficial e aspersão na cultura da alface concluiu que a composição química do solo e solução do mesmo apresentaram algumas mudanças, nos dois ciclos da cultura, sendo que o sódio foi o elemento químico que mostrou maior acúmulo no solo em relação aos demais parâmetros. O fósforo, manganês, magnésio e enxofre, tiveram suas concentrações elevadas no meio do ciclo, diminuindo na análise do final do mesmo, sendo o acúmulo atribuído a aplicação do efluente e a sua diminuição, principalmente ao consumo pelas plantas e lixiviação no solo.

VARALLO et al. (2010) avaliou as alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com efluente de esgoto doméstico e observou que a aplicação deste efluente solo não interferiu nas suas características físicas.

4.4 Monitoramento dos Solutos no Solo

A dinâmica dos solutos no solo e a necessidade de nutrição da cultura demandam uma otimização do dimensionamento e do manejo da aplicação do efluente de esgoto doméstico tratado via irrigação por gotejamento subsuperficial. Porém, existe uma dificuldade em determinar a atividade de um íon em dado ponto no solo. De acordo com BARROS et. al, (2009), pode-se utilizar a atividade média de um elemento no volume, entretanto, fica o questionamento de como determiná-la.

Segundo BLANCO e FOLEGATTI (2000) os métodos mais usados para determinar a salinidade do solo são: as soluções diluídas (solo, água) e extrato de saturação. Entretanto, entre os vários métodos propostos para medidas de salinidade do solo, somente métodos elétricos baseados na condutividade elétrica do volume do solo parecem práticos (MALICKI e WALCZAK, 1999). A concentração de sais solúveis do extrato de saturação tende a ser aproximadamente igual à metade da concentração da solução do solo no seu limite máximo de retenção de umidade na capacidade de campo e aproximadamente igual à quarta da concentração no limite inferior de umidade (QUEIROZ, 2004).

A metodologia de obtenção do extrato de saturação a partir de amostras não representa o estado iônico do solo em tempo real. O monitoramento dos íons a partir de análise do solo tem o inconveniente da necessidade de amostras deformadas e demora dos resultados. O monitoramento de íons com o extrator de solução permite a repetição de leituras no mesmo local de amostragem, mas contempla apenas as regiões com a água retida a potenciais mais altos. (SILVA et al., 2005).

Além dos métodos laboratoriais, métodos de campo estão sendo utilizados para determinar a salinidade do solo, pois demandam menos tempo, permitindo maior número de determinações.

Em condições de campo, destacam-se os equipamentos munidos de sensores que são capazes de medir a condutividade elétrica total do solo, dentre eles se sobressai o TDR (Time Domain Reflectometry), por permitir grande número de leituras simultâneas utilizando sondas e fácil operação (MALICKI e WALCZAK, 1999; MOJID e MALICKI, 1999).

SILVA et al., (2005) aplicou modelos matemáticos que melhor relacionassem a condutividade elétrica aparente obtida pela TDR, a umidade do solo e a condutividade elétrica da solução do solo sob aplicação de cloreto de potássio, via água de irrigação por gotejamento. Os resultados mostraram que em condições de campo a condutividade elétrica da solução do solo pode ser monitorada a partir de leituras da TDR para fins de distribuição de solutos sob uso de fertirrigação de acordo com os modelos matemáticos utilizados.

4.5 Uso da Técnica da TDR

Vários métodos são utilizados para determinação da umidade do solo, como o gravimétrico, considerado o método direto padrão, além dos métodos indiretos, que estimam a umidade a partir de outras propriedades do solo, tais como a termalização de nêutrons, resistência elétrica e Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR (SOUZA e MATSURA, 2002).

O uso da TDR, como método de medida de umidade e condutividade elétrica do solo, vem se destacando no cenário das técnicas empregadas para medidas de parâmetros físicos do solo. No final da década de 60, FELLNER e FELDEGG, (1969) introduziram a TDR como uma técnica para medir a permissividade dielétrica complexa de líquidos. A partir de então,

esta metodologia tem sido aplicada nas medidas de propriedades dielétricas de muitos materiais, inclusive o solo.

Muitas pesquisas foram efetuadas para se avaliar o comportamento da constante dielétrica em função das características do solo. DAVIS e ANNAN (1997) entre outros, estudaram os efeitos dos componentes do solo sobre as frequências das ondas eletromagnéticas, e demonstraram que a parte real da constante dielétrica do solo (k) mostrava forte dependência do conteúdo de água do solo e fraca dependência da composição e da densidade do solo.

No Brasil, os primeiros trabalhos com a TDR foram realizados por HERRMANN (1993), que desenvolveu um equipamento de transmissão de microondas para a determinação da umidade do solo e TOMMASELLI e BACCHI (2001) que realizaram estudos de calibração da técnica de TDR para cinco tipos de solo.

A TDR baseia-se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em cabos condutores envoltos pelo solo. Esse fenômeno se deve a diferença entre as constantes dielétricas, (K , adimensional), da água, do ar e do solo. Na matriz do solo as constantes variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variando entre 3 e 5, e água o valor máximo 81 (NOBORIO, 2001). A constante K medida nesse sistema ar-solo-água é denominada de constante dielétrica aparente (K_a , adimensional), assim conhecendo-se esta variável pode-se determinar a umidade volumétrica do solo por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (CONCIANI et al., 1997).

A determinação da constante dielétrica, K_a , é obtida medindo-se o tempo de propagação de uma onda eletromagnética, através de um cabo coaxial até um sensor (sonda), imerso em um meio. Parte da onda incidente que pode ser produzida por um testador de cabos, é refletida ao atingir o sensor devido a diferença de impedância entre este e o cabo coaxial. O remanescente da onda propaga-se pelo sensor até alcançar a sua extremidade, sendo também refletida. O tempo de propagação da onda (t), entre o início e o final do sensor, pode ser medido pelo osciloscópio do testador de cabos (NOBORIO, 2001) e obtido pela equação (1):

$$t = \frac{2LK_a^{0,5}}{c} \quad (1)$$

Em que:

L = comprimento do sensor [L];

Ka = constante dielétrica aparente do meio (adimensional);

c = velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$);

t = tempo [T].

Segundo CONCIANI et al. (1996), o cálculo da constante dielétrica é feito empregando-se a equação que relaciona a constante dielétrica com o tempo que o sinal leva para percorrer o meio, em função do comprimento da sonda, isto é, com a distância percorrida pelo sinal. Rearranjando a equação (1) obtém-se a equação (2). O fator $2L$ presente na fórmula leva em conta que o sinal faz o caminho de ida e volta, portanto, duas vezes o comprimento da haste:

$$Ka = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (2)$$

O termo $(ct/2)$ da equação (2) é reduzido a um comprimento aparente da sonda (La), conforme a equação (3):

$$Ka = \left(\frac{La}{L} \right)^2 \quad (3)$$

onde La é a distância entre as reflexões no início e final do sensor (sonda). Assim, conhecendo-se Ka , pode-se estimar a umidade volumétrica do solo por meio de calibrações obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório.

TOPP et al. (1980) verificaram que a água é a variável mais influente na constante dielétrica do solo. Foram os primeiros a propor um modelo de calibração empírico para determinar a umidade volumétrica em função da constante dielétrica do meio (Ka):

$$\theta = -5,31 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} Ka - 5,51 \cdot 10^{-4} Ka^2 + 4,31 \cdot 10^{-6} Ka^3 \quad (4)$$

em que θ é a umidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Ka é a constante dielétrica aparente (adimensional) do meio poroso.

A técnica tem como principais limitações o custo do equipamento e a necessidade de calibração para cada tipo de solo. Em função do custo elevado das sondas TDR importadas,

vários modelos têm sido desenvolvidos e construídos nas instituições de pesquisa e universidades brasileiras, em condições artesanais, apresentando correlações satisfatórias tanto em laboratório quanto em campo, conforme constatado nos trabalhos de (COELHO et al., 2001; SOUZA et al., 2001; SOUZA et al., 2006; COELHO et al., 2005; ROQUE, 2007; MILANI et al., 2008).

A técnica da TDR além da estimativa da umidade tem sido utilizada na avaliação do movimento de solutos no solo e formação de bulbo úmido em irrigação localizada em condições de campo e também em laboratório utilizando-se colunas de solo não saturado (BARROS et al., 2009; SOUZA et al., 2009; VARALLO et al., 2010, LOPES et al., 2010, BIZARI, 2011) e esta aplicação pode trazer importantes subsídios ao estudo da dinâmica de solutos para o manejo da fertirrigação com efluente de esgoto tratado.

A determinação da condutividade elétrica dos solos utilizando a técnica da TDR foi descrita pioneiramente por TOPP et al. (1980) e sistematizado por NADLER et al. (1999), DALTON et al. (1984), DALTON (1992) e HEIMOVAARA (1993). Tradicionalmente, a condutividade elétrica da solução no solo (CEs, dS m^{-1}) é medida por um condutivímetro com uma amostra de solo deformado misturado com certa quantidade padrão de água, extraído-se a solução desta amostra por filtragem ou centrifugação (EMBRAPA, 1997). A TDR, entretanto, mede a condutividade elétrica aparente (CE_{TDR} , dS m^{-1}), o qual varia com a umidade do solo. No entanto, existem formas de se correlacionar indiretamente a CEs com a CE_{TDR} , como os modelos de correlação pelo fator geométrico de tortuosidade da transmissão das ondas eletromagnéticas na sonda da TDR, propostos por RHOADES et al. (1976), RHOADES et al. (1989), MUALEN e FRIEDMAN (1991) e HEIMOVAARA et al. (1995).

A CE_{TDR} de acordo com equação (5) é estimada pela relação de amplitude dos sinais da TDR ao longo da sonda inserida no solo (GIESE e TIEMANN, 1975).

$$CE_{TDR} = \frac{Z_0}{120\pi LZ_u} \left(\frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (5)$$

Em que:

CE_{TDR} = condutividade elétrica TDR (aparente);

Z_0 = impedância característica da sonda (Ω);

Z_u = impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 = amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

V_{inf} = amplitude do sinal de retorno depois de reflexões múltiplas.

A impedância característica (Z_0 , Ω) é o modo de expressar a lei que relaciona a variação de voltagem e corrente com distancia ao longo de uma linha de transmissão uniforme, sendo geralmente utilizada para avaliar a performance de sondas de TDR. Em geral, sondas com Z_0 superior a 200 Ω são inadequadas para a determinação da umidade do solo, pois neste caso a reflexão prejudica a interpretação do sinal eletromagnético inviabilizando a técnica. Segundo ZEGELIN et al. (1989) e HEIMOVAARA (1993), pode-se medir Z_0 equação (6) por determinação do coeficiente de reflexão da sonda (p) conforme a equação (7), isso quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme.

$$Z_0 = Z_u K^{0,5} \frac{(1 + p)}{(1 - p)} \quad (6)$$

$$p = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) - 1 \quad (7)$$

Em que:

V_1 = amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do inicio da sonda;

K = constante dielétrica (adimensional).

Geralmente, o material dielétrico usado é água destilada a 20° C ($K = 81$).

Nos ensaios realizados com a técnica da TDR pode-se utilizar uma única sonda móvel ou fixá-la no solo em determinada profundidade, na qual as leituras são feitas por equipamentos comerciais, tais como, Tektronix (Tektronix, Inc.), Trase System (Soil moisture) e o TDR 100 (Campbell Scientific). Para a determinação contínua e automática dos dados em campo em diversas posições ou locais no solo há necessidade de uso de várias sondas acopladas ao multiplexador que é conectado ao equipamento TDR.

No Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp (Feagri/Unicamp) foram realizados experimentos envolvendo a técnica da TDR, incluindo a construção de sensores em grande escala e em diferentes modelos. SOUZA e MATSURA (2002) e SOUZA et al. (2006) conduziram pesquisas na produção de sondas de

TDR de baixo custo para viabilizar a aplicação dessa técnica em situações que necessitassem de uma quantidade elevada de sensores para o monitoramento da dinâmica da solução do solo.

ROQUE (2007) propôs um equipamento para a fabricação de sondas de TDR, na qual permitiu a construção de um número elevado de sensores, posteriormente utilizadas em condições de laboratório e campo, em estudos de geoestatística, utilizando multiplexadores. Com essas mesmas sondas, o autor avaliou a redistribuição da água de irrigação no interior do solo em dois sistemas de manejo e concluiu que a técnica da TDR foi eficiente no monitoramento da umidade do solo ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro, podendo ser empregada no manejo da irrigação, desde que se faça uma prévia calibração do equipamento para as condições locais.

SOUZA e MATSURA (2002) verificaram a possibilidade de usar hastes de latão em substituição ao aço inoxidável, e constataram que ambos os materiais possuíam características semelhantes na propagação de ondas eletromagnéticas, concluindo que as hastes de latão poderiam substituir as de aço inoxidável, o que resultaria em economia no custo de fabricação das sondas de TDR. Além disso, observaram a possibilidade de utilização de sondas do tipo multi-haste segmentada (hastes descontínuas) e sondas coaxiais de volume variável, conectadas a um equipamento de TDR convencional, modelo Trase System I, no monitoramento da umidade do solo em diversas profundidades, e na avaliação de bulbo úmido em irrigação localizada. Concluindo-se, assim, que essas sondas podem ser uma ferramenta no dimensionamento de irrigação e no balanço de água no solo.

No entanto, a sonda multi haste segmentada apresenta dificuldades na sua instalação, manuseio e retirada após a realização dos ensaios, tendo como consequência, na maioria dos casos, a deformação das hastes maiores, principalmente, quando instaladas em solos argilosos. Outro problema se refere à dificuldade na interpretação dos picos de impedância quando utilizado um número elevado de segmentações, que aumenta consideravelmente as reflexões dos sinais, limitando seu uso para no máximo 4 segmentos por sonda (SOUZA e MATSURA, 2002)

A técnica da TDR pode contribuir com as pesquisas de dimensionamento da irrigação, porém pode apresentar limitações financeiras e operacionais, como o custo dos equipamentos e a inserção das sondas em solos muito argilosos e as dificuldades de seu manuseio em campo.

4.6 Irrigação por Gotejamento Subsuperficial e Espaçamento entre Gotejadores

O Gotejamento Subsuperficial (GS) é um método pelo qual a água é transportada sob baixa pressão diretamente às raízes da planta. Este método possui muitas vantagens potenciais. Se bem manejado, as vantagens do GS podem incluir redução na quantidade de perda de água no solo e perda de nutrientes por lixiviação. Mantendo a uniformidade da água distribuída resulta em um excelente controle da irrigação de água e nutrientes, eleva a adaptabilidade na utilização de água de reúso, reduz a perda por percolação profunda reduzindo a poluição das águas subterrâneas e eleva a flexibilidade de adaptação dentre os vários tipos de solos e o enraizamento profundo da planta (CAMP et al., 2000; TROOIJEN et al., 2000; HILLEL, 2004).

Vários estudos têm mostrado que o GS consome menos água, e produz igual ou melhor, rendimento das culturas quando comparado com outros métodos de irrigação (CAMP et al., 2000). No entanto, problemas que têm limitado essa tecnologia incluem as dificuldades em monitorar o desempenho do sistema, o entupimento dos emissores e o alto custo dos equipamentos, desde que seja necessária a pressurização do sistema.

As profundidades das linhas laterais variam de 0,02 m a 0,70 m dependendo do solo e da cultura. A germinação das sementes, o estabelecimento, o crescimento de mudas e a existência de camadas de solo que interferem o movimento ascendente da água, também são outros fatores que afetam a movimentação lateral. (PHENE e SANDERS, 1976).

De acordo com BARROS et al. (2009), devido ao elevado custo das áreas produtivas de cana em São Paulo, a adoção de técnicas como o gotejamento subsuperficial é alternativa técnica para aumentar os índices de produtividade.

Diferentes procedimentos têm sido propostos para dimensionar o método de GS. SCHWARTZMAN e ZUR (1986) apresentaram um procedimento baseado em equações empíricas para delinear o espaçamento ideal entre emissores, determinando a largura e a profundidade máxima do volume molhado de solo. SINGH et al. (2006) também desenvolveu equações similares para estimar as mesmas dimensões do volume de solo molhado irrigado por SGS.

De acordo com WARRICK e OR (2007) a redistribuição de água no solo e os modelos de fluxo podem ser usados para determinar uma distribuição detalhada de água no solo aplicada por GS, desde que se conheça as suas características hidráulicas.

O espaçamento entre emissores depende das características do solo e da distância entre as plantas. Em geral, esse espaçamento deve ser menor que a distância entre as linhas de emissores laterais e deve estar relacionado às necessidades hídricas da cultura e à distância entre plantas (LAMM e CAMP, 2007).

A principal vantagem do aumento da distância entre emissores é a redução de custos no projeto de irrigação. Porém, este espaçamento excessivo deve ser evitado para prevenir uma distribuição inadequada de água na zona radicular. Problemas com entupimento de gotejadores ao longo da linha podem ocasionar déficits hídricos na zona radicular das plantas, uma vez que, a distância entre emissores foi ampliada (LAMM e CAMP, 2007).

Os fabricantes de gotejadores utilizam uma faixa de espaçamento compreendida entre 0,10 a 0,76m ao longo da linha (SCHWANKL e HANSON, 2007), mas outros espaçamentos podem ser utilizados de acordo com a necessidade do projeto de irrigação.

A escolha do espaçamento deve levar em conta as propriedades hidráulicas do solo aonde o sistema de irrigação será instalado, o sistema radicular específico da cultura e como as características climáticas afetam as necessidades hídricas da cultura (ARBAT et al., 2010). O espaçamento entre emissores pode ser fator importante para redução de perda de água e nutrientes para camadas mais profundas do solo (THORNBURN et al., 2003).

No Brasil o plantio de cana-de-açúcar pode ser feito em linha dupla (plantio em “W” ou “abacaxi”) com uma distância entre plantas de 0,40 m e entre linhas de 1,80 m (GAVA et al., 2011) (Figura 2).

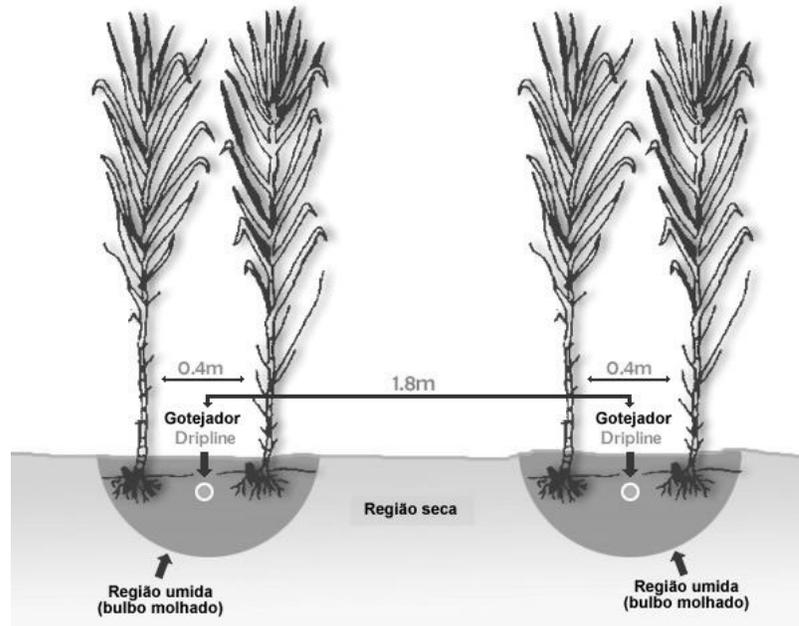


Figura 2. Ilustração das dimensões adotadas no plantio e na irrigação subsuperficial da cana-de-açúcar. Adaptado de GAVA et al. (2011)

A irrigação por gotejamento subsuperficial usualmente utiliza espaçamento entre gotejadores de 0,5 m enterrados a 0,30 m. DARLI e CRUZ (2008) avaliaram a produtividade da cana-de-açúcar em um Latossolo, fertirrigada via gotejamento subsuperficial instalando a fita gotejadora sob a linha de plantio na profundidade média de 0,30 m, espaçados de 0,30 m, com vazão nominal de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ a 55 kPa, e obtiveram uma resposta significativa por este método de irrigação nesta profundidade.

4.7 Geometria e Dimensões do Bulbo Úmido

O bulbo úmido se forma a partir de uma fonte pontual de água no solo que se propaga tridimensionalmente através da frente de molhamento. As dimensões do bulbo úmido dependem, sobretudo, dos seguintes fatores: estrutura e textura do solo, vazão do gotejador, frequência de aplicação e umidade inicial do solo. A Figura 3 abaixo ilustra um bulbo úmido dimensionado de acordo com os gradientes de umidade, em azul.

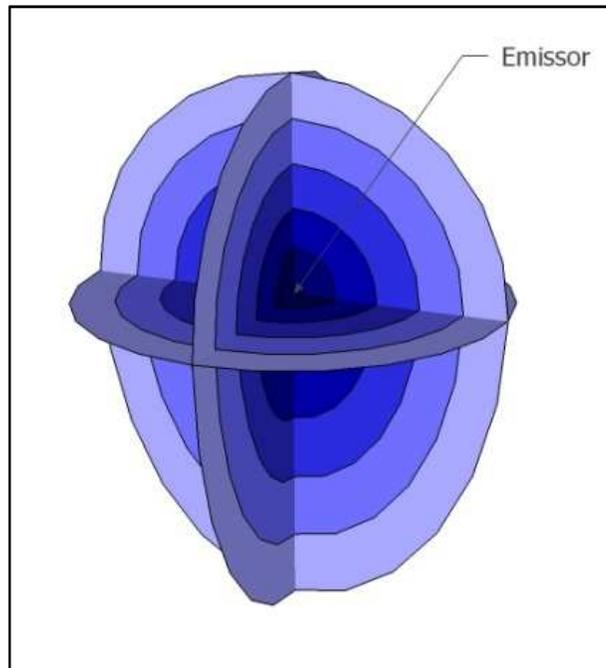


Figura 3. Ilustração do bulbo úmido

Informações sobre a geometria do bulbo úmido são importantes para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, principalmente para estimar o volume do solo molhado, a vazão do emissor e o tempo de aplicação de água (MAIA et al. 2010).

O conhecimento da forma e do tamanho do volume molhado do solo é um aspecto importante a considerar para otimizar o uso da água, evitando a percolação profunda. A avaliação da forma e do tamanho do volume molhado permite definir aspectos importantes, tais como lâmina e frequência de irrigação, número de gotejadores e dimensionamento hidráulico (COOK et al., 2006), como também no manejo da irrigação (HAO et al., 2007).

BEN-ASHER e PHENE (1993) propuseram um modelo esférico para o bulbo, formado por um gotejador localizado subsuperficialmente no solo. Os volumes de água aplicados tendem a formar bulbos úmidos com formas arredondadas e elípticas conforme descrito por ZUR (1996).

As fronteiras do volume molhado de solo são razoavelmente bem definidas e envoltas por uma faixa de solo cuja umidade é inferior à da frente de molhamento (ZUR, 1996).

Há muitas soluções analíticas para equações descrevendo a infiltração de água de fontes pontuais que permitem a estimação de padrões de umedecimento do solo a partir das propriedades hidráulicas do solo (CAMP, 1998). Padrões de umedecimento são, normalmente,

caracterizados pelo eixo radial (r) e vertical ($z+$, $z-$) que são as distâncias da frente de molhamento do emissor. Quando suas propriedades hidráulicas são conhecidas, estes modelos podem fornecer um sistema geral para os valores de r e z (THORBURN et al., 2003).

A partir do ponto de emissão localizado abaixo da superfície do solo a frente de molhamento avança mantendo uma simetria das suas dimensões, eixo radial (r) e vertical ($z+$, $z-$). No dimensionamento do bulbo úmido a partir de um determinado volume de controle estabelecido no perfil de solo, são utilizados sensores (sondas de TDR, tensiômetros) ou são coletadas amostradas para determinar as umidades que definem a geometria do bulbo no solo. Alguns autores (KANDELOUS et al., 2011; BASTOS et al. 2009; NOGUEIRA et al. 2000) ao realizarem pesquisas de dimensionamento de bulbos molhados, utilizaram a simetria das medidas do bulbo e obtiveram os valores de umidade do solo, utilizando apenas a metade do bulbo, fazendo o “espelhamento” da outra metade.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da Área e Localização do Experimento

O experimento foi realizado no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola – Feagri/Unicamp, no município de Campinas – SP (Lat. 22°81'89" S; Long. 47°06'22" O e Altitude de 622m), no detalhe em branco na Figura 4.



Figura 4. Foto de satélite da área experimental com detalhe circular em branco do local aonde foi realizado o experimento

Fonte: Google Earth 2009

A temperatura média anual é de 22,3°C, e o total anual pluviométrico de 1411 mm. O experimento foi realizado nos meses de maio a julho de 2011. O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho distroférico típico argiloso (EMBRAPA, 1999).

Amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas para caracterização das condições iniciais da área experimental. Foram abertas 3 trincheiras (3 repetições) com 0,80 m de profundidade sendo coletadas em cada uma delas, 6 amostras deformadas e outras 6 indeformadas (por meio de um amostrador de Ulhand com anéis de metal com volume conhecido), de acordo os limites: 0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 m.

De posse das amostras, foram realizadas as seguintes análises (Tabelas 1 e 2): densidade do solo (EMBRAPA, 1997), porosidade total, micro e macroporosidade e composição química.

Tabela 1. Valores médios de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT), para seis diferentes profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico.

Profundidade (cm)	Ds	Macro (cm ³ cm ⁻³)	Micro (cm ³ cm ⁻³)	PT
0_10	1,298	0,118	0,421	0,539
10_20	1,262	0,154	0,400	0,554
20_30	1,308	0,148	0,411	0,559
30_40	1,258	0,151	0,408	0,559
40_60	1,205	0,174	0,400	0,574
60_80	1,186	0,167	0,411	0,578

Tabela 2. Valores médios da análise química realizada inicialmente na área experimental

Parâmetros	Valores médios
pH (CaCl ₂)	4,98
pH (H ₂ O)	5,62
pH (SMP)	6,27
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	3,26
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,10
Ca (cmol _c dm ⁻³)	5,10
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,94
K (cmol _c dm ⁻³)	0,57
P (Mehlich) (mg dm ⁻³)	19,33
P (Resina) (mg dm ⁻³)	40,67
C (g dm ⁻³)	21,78
MO (%)	3,76
SB (cmol _c dm ⁻³)	6,61
CTC (cmol _c dm ⁻³)	9,87
V (%)	66,40

5.2 Sistema de Tratamento de Água e Esgoto da Feagri

A Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A (SANASA) e os poços artesianos localizados na Unicamp abastecem a Faculdade de Engenharia Agrícola. A água utilizada para a irrigação das culturas no campo experimental provém de um reservatório superficial localizado na própria Faculdade e que é abastecido, por bombeamento por outro reservatório situado nas proximidades do Parque Ecológico da UNICAMP.

O sistema de tratamento de esgoto “in loco” da Feagri (Figura 5) consiste em um preliminar (desarenador), cinco tratamentos primários (reatores anaeróbios) e três secundários

(filtro anaeróbico, leito cultivado de fluxo vertical e leito cultivado de fluxo subsuperficial) e um de reúso agrícola.



Figura 5. Sistema integrado e reúso agrícola de esgoto da instalado na Feagri/Unicamp

São tratados neste sistema aproximadamente $25\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de efluente bruto que não são mais despejados na rede coletora local sem nenhum tipo de tratamento. Este efluente é composto de dejetos domésticos e sanitários, de águas de vários laboratórios e das águas de lavagem da oficina mecânica da Faculdade de Engenharia Agrícola onde são realizadas as manutenções de máquinas e a usinagem de peças.

O efluente após o tratamento foi armazenado em um reservatório de 15.000 L e bombeado para uma caixa d'água de 500 L (Figura 6), para posteriormente ser aplicado no solo.



Figura 6. Efluente de esgoto doméstico tratado utilizado no experimento

Os parâmetros analisados do efluente e da água de abastecimento estão apresentados na Tabela 3. Esta análise foi realizada para que houvesse uma melhor interpretação da dinâmica da água e do soluto no solo durante a aplicação. A metodologia para a análise foi baseada no “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

Tabela 3. Análise físico-química do efluente de esgoto doméstico tratado e da água de abastecimento municipal antes da aplicação no solo.

Elemento		Efluente	Água de abastecimento
Fósforo (P)	ppm	7	ALD
Potássio (K)	ppm	19	ALD
Cálcio (Ca)	ppm	17,5	ALD
Magnésio (Mg)	ppm	1,8	ALD
Enxofre (S)	ppm	7	ALD
Ferro (Fe)	ppm	8,9	< 0,010
Manganês (Mn)	ppm	0,1	< 0,010
Cobre (Cu)	ppm	ALD	< 0,010
Zinco (Zn)	ppm	ALD	< 0,050
Boro (B)	ppm	0,2	ALD
Sódio (Na)	ppm	21	10,98
Cobalto (Co)	ppm	ALD	ALD
Molibidênio (Mo)	ppm	ALD	ALD
Cloro (Cl)	ppm	13	33
Alumínio (Al)	ppm	115	< 0,020
Nitrogênio (N)	%	0,14	< 0,005
Níquel (Ni)	ppm	ALD	ALD
pH		7,2	7,1
Cond. Elétrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	710	60

ALD – Valor abaixo do limite de detecção.

5.3 Tratamento

Foram utilizados dois tratamentos no experimento com vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ e $1,6 \text{ L h}^{-1}$ com três repetições para cada um, tanto para o esgoto doméstico tratado como para a água de abastecimento municipal. Os tratamentos foram identificados como:

- $\text{ENT } 1,0 \text{ L h}^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \text{AAM (A1)} - \text{Água de abastecimento municipal} \\ \text{EDT (E1)} - \text{Esgoto doméstico tratado} \end{array} \right.$
- $\text{ENT } 1,6 \text{ L h}^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \text{AAM (A1,6)} - \text{Água de abastecimento municipal} \\ \text{EDT (E1,6)} - \text{Esgoto doméstico tratado} \end{array} \right.$

5.4 Caracterização e Instalação das Sondas de TDR

As sondas contínuas utilizadas no experimento foram construídas na própria Faculdade de Engenharia Agrícola no Laboratório de Hidráulica e Irrigação.

As sondas de TDR (Figura 7) foram construídas com cabo coaxial RG-58 de 50 ohms para atender ao funcionamento dos principais aparelhos de TDR que utilizam conectores do tipo BNC “machos”, como os aparelhos Tektronix (*Tektronix, Inc.*), Trase System (*Soilmoisture*), TDR 100 e multiplexadores SDMX (*Campbell Scientific*). Utilizou-se na construção das sondas, três hastes paralelas de aço inoxidável (Aço AISI 304) com diâmetro de 0,003 m e 0,23 m de comprimento espaçadas de 0,015 m, de modo que quando prontas às sondas alcançaram um comprimento útil de 0,20 m. Foi utilizado um “offset” (cabeçote de resina epóxi aonde as hastes são fixadas) de 0,05 m.

Maiores detalhes construtivos podem ser encontrados em SOUZA¹ et al. (2006). Este tipo de sonda é largamente utilizada pelos usuários da técnica, os quais aplicam em seus trabalhos nas mais diferentes formas de penetração no solo: superficial ou em trincheiras.



Figura 7. Sonda de TDR utilizada no experimento

Para estimar a condutividade elétrica, a técnica da TDR necessita da impedância característica de cada sonda em água destilada. De posse deste valor analisa-se a impedância causada pelo meio estudado. Como as sondas foram utilizadas anteriormente em outro experimento, podendo ter ocorrido algum dano às mesmas, a impedância foi novamente determinada através do acondicionamento das sondas em vaso plástico contendo água destilada, cujas margens foram distanciadas 0,03 m das hastes, e então realizada leitura através do software “PCTDR” para determinar os valores da impedância. As sondas que tinham o valor diferente de até 5% da média (desvio padrão) foram selecionadas.

Foram abertas três trincheiras com as seguintes dimensões, (1,00; 0,60 e 0,80 m) respectivamente comprimento, largura e profundidade. A instalação das sondas foi feita nas paredes da trincheira (estrutura não deformada), e instaladas 21 sondas em faces opostas na extensão dos 0,60 m (largura), totalizando 42 sondas por trincheira, Figura 8.

As sondas ficaram em posição de malha localizadas a 0,15; 0,25; 0,35; 0,45; 0,55 e 0,65m de profundidade e a 0,05; 0,15; 0,25 e 0,35m de distância do ponto emissor onde cada sonda representará uma área de $0,01 \text{ m}^2$, promovendo “medidas pontuais”. A distribuição das sondas Figura 9 foi baseada em BARROS et al. (2009).



Figura 8. Abertura das trincheiras e instalação das sondas

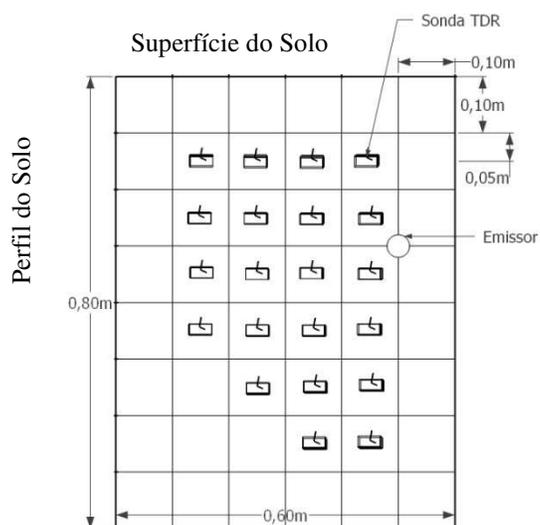


Figura 9. Esquema da disposição em malha das sondas e posição do emissor na parede da trincheira

Para que os cabos e os conectores das sondas ficassem devidamente protegidos das intempéries, foram utilizadas caixas plásticas brancas para protegê-los (Figura 10)



Figura 10. Caixas plásticas para proteção dos cabos coaxiais e dos conectores BNC

5.5 TDR, Multiplexação e Aquisição de Dados

O conjunto do equipamento (TDR + Sistema de aquisição + Multiplexadores) utilizado no experimento foi montado anteriormente em uma pesquisa realizada no ano de 2007 na Feagri/Unicamp (ROQUE, 2007). Este conjunto é composto por um reflectômetro TDR 100, placas com canais de multiplexação SDM_X-50 (aonde foram conectadas as sondas) e um coletor de dados CR1000.

Na Figura 11 podem ser observados os detalhes da montagem dos equipamentos em questão.

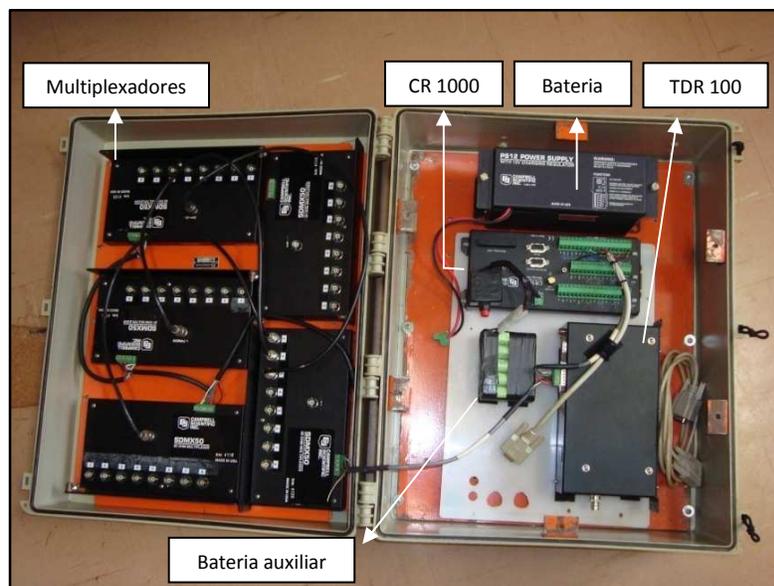


Figura 11. Conjunto de equipamentos utilizados na leitura e aquisição de dados

A comunicação com os equipamentos foi feita através de um computador portátil utilizando o programa “LoggerNet 3.4” (Campbell Scientific). Decorrida esta etapa, foi realizada a programação do datalogger (Anexos) para aquisição das leituras da TDR em campo. Os multiplexadores foram utilizados em dois níveis: Nível 1 – multiplexador ligado diretamente com o TDR; Nível 2 – multiplexadores ligados ao multiplexador do nível 1.

5.6 Gotejadores

Os gotejadores utilizados no experimento foram da marca Netafim modelo DripNet PC™ AS 16150 autocompensante, com vazões de 1,0 L h⁻¹ e de 1,6 L h⁻¹. Estas vazões foram propostas, pois este experimento coopera com informações para um projeto maior, “Uso de esgoto tratado em sistema de irrigação subsuperficial na cultura da cana-de-açúcar”, realizado no mesmo período na Feagri/Unicamp. Os espaçamentos entre gotejadores previamente estabelecidos pelo fabricante (Netafim) são: 0,55 m para a vazão de 1,0 L h⁻¹ e de 0,65 m para a vazão de 1,6 L h⁻¹.

Foram realizados ensaios nos gotejadores utilizando a AAM e o EET com a finalidade de verificar a uniformidade nas vazões e também para determinar a equação característica vazão-pressão. As equações obtidas foram comparadas com as equações propostas no catálogo dos fabricantes e com a norma da ABNT (1986). Os ensaios foram realizados em parceria com um projeto de iniciação científica na Feagri/Unicamp intitulado, “Avaliação hidráulica de gotejadores subsuperficiais no cultivo da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto doméstico”.

5.6.1 Determinação da Equação Característica Vazão-Pressão

As características dos gotejadores geralmente são fixas e a variação de vazão é determinada apenas pela variação de pressão. A vazão dos gotejadores é dada pela seguinte equação característica:

$$q = Kd \cdot H^x \quad (8)$$

Em que:

q = vazão do emissor (L h⁻¹);

Kd = coeficiente de descarga (adimensional);

H = pressão de entrada do emissor (KPa);

x = expoente de descarga (adimensional).

Para a determinação da relação vazão-pressão e equação característica do gotejador, foram utilizados segmentos de tubo gotejador com 7 m de comprimento e onze gotejadores, aproximadamente. Os ensaios com AAM foram realizados em uma bancada de testes,

localizada no Laboratório de Hidrologia da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, com a linha de gotejadores conectada em registros para ajuste das pressões de operação, conforme a Figura 12.



Figura 12. Mesa de ensaio utilizando água de abastecimento municipal

Os ensaios com EET foram realizados no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp.

As pressões foram monitoradas por um manômetro com precisão de $\pm 0,05\%$ FE, e faixa de 0 a 1000 kPa. Foram utilizadas quatro faixas de pressão em passos de 50 kPa. Utilizou-se pressões crescentes e decrescentes de 70, 120, 170 e 220 kPa para vazões de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ e 80, 130, 180 e 230 kPa para $1,6 \text{ L h}^{-1}$, com quatro repetições para cada pressão. As vazões dos emissores foram determinadas através da coleta dos volumes de água, em um período de tempo de 5 minutos, para cada pressão de operação. O volume foi medido em provetas de 1000 mL sendo este volume convertido em vazão após a realização das leituras. A vazão média de cada emissor foi obtida com os dados de quatro repetições e com os pares de valores de vazão e pressão, realizando-se a análise de regressão para determinação da equação característica vazão-pressão.

5.6.1 Uniformidade de Vazão

A uniformidade de vazão foi determinada utilizando-se os dados de vazão obtidos na determinação da equação vazão-pressão, a partir dos quais foram calculados a vazão média e o desvio-padrão. Foi calculado então, o coeficiente de variação de fabricação, adotando-se a metodologia recomendada pelo Projeto de Normas Técnicas da ABNT (1986).

5.7 Irrigação

A AAM e o EET foram armazenados separadamente em caixa d'água de 500 L acoplada à uma bomba KSB Hydrobloc C 800 T; 0,85 CV com a finalidade de gerar uma pressão constante de 18 mca medida através de um manômetro, garantido assim, a autocompensação dos gotejadores. Um regulador de pressão e um filtro de Mesh 120 (conforme recomendação do fabricante do gotejador), fizeram parte do conjunto de irrigação. Devido a pressurização do sistema e a utilização de um gotejador por vez, foi instalado um “bypass”, como retorno à caixa d'água, mantendo também o EET em constante agitação evitando assim, a precipitação dos solutos presentes. A Figura 13 ilustra o conjunto descrito acima.



Figura 13. Conjunto moto-bomba, regulador de pressão, filtro, registros e “bypass” utilizados no experimento para realizar a irrigação.

Saindo da caixa d'água a tubulação principal foi instalada e a partir dela foram colocados registros individuais derivando assim, as linhas secundárias de irrigação para cada trincheira.

Utilizou-se um conjunto de tubos e conexões (Figura 14) para que a fita aonde os gotejadores são fixados pudesse ser inserida no solo irrigando na posição previamente estipulada, à 0,10 m do vértice da parede da trincheira. No final da linha de irrigação foi instalada uma válvula de escorva e um gotejador de vazão correspondente ao que foi

enterrado, para verificação constante da vazão. O sistema hidráulico descrito foi devidamente testado, antes da instalação no campo, para verificação de possíveis vazamentos.

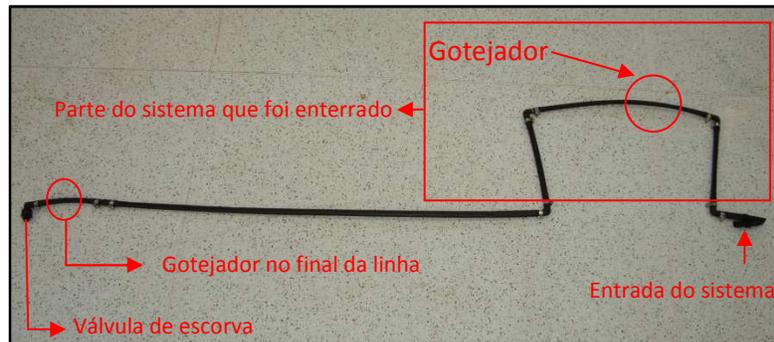


Figura 14. Sistema hidráulico (linha secundária) para aplicação da AAM e do EET no solo

Foram instalados dois gotejadores por trincheira, previamente selecionados após teste de vazão, a 0,30 m de profundidade em paredes opostas e com vazões distintas (Figura 15). Conforme descrito por PIRES, ARRUDA e SAKAI (2008) este valor de profundidade é ideal para a irrigação da cana-de-açúcar.



Figura 15. Instalação do gotejador na parede da trincheira

CASAÑO (1998) comenta que um dos problemas ocasionados em gotejadores enterrados é o entupimento por raízes ou entrada de partículas de solo, assim, para confirmar que nenhuma partícula afetou o volume de água aplicado, foram feitas medidas do volume de água do reservatório para determinar qualquer variação na vazão.

5.8 Umidade e Condutividade Elétrica

De acordo com LOPES et al. (2009), devido as diferenças nas propriedades físicas do solo ocasionadas durante a sua movimentação e conseqüentemente na distribuição da AAM e do EET, as leituras só foram realizadas após período de reestruturação do solo de aproximadamente dois meses. Após este período, o experimento foi mantido coberto com uma lona para que não houvesse a incidência direta de chuvas sobre o experimento, interferindo desta forma nas leituras.

O experimento após a instalação das sondas, dos gotejadores e posterior fechamento das trincheiras apresentou a seguinte configuração, conforme a Figura 16.



Figura 16. Visão geral do experimento montado em campo

Primeiramente foi aplicado 1L de AAM a cada hora num total de 10 aplicações. O monitoramento da distribuição da água foi realizado antes e após cada aplicação. Este procedimento descrito foi desenvolvido embasado nos trabalhos de COELHO e Or (1999) e WIENS et al. (2002). Para que houvesse a evaporação da AAM presente no solo foi aguardado um período de 15 dias antes do início das aplicações com EET.

As leituras de umidade e condutividade elétrica foram monitoradas através do Reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific, Logan-Utah) equipado com interface RS232, analisando o sinal eletromagnético automaticamente por um coletor de dados (CR1000 – Datalogger – Campbell Scientific).

A programação das leituras foi baseada na aplicação da AAM e do EET em um ponto de emissão por vez, com as 21 leituras sendo realizadas em tempo real, com o auxílio de multiplexadores SDMX 50 – Campbell Scientific. A constante dielétrica aparente (Ka) foi convertida em umidade volumétrica com base na Equação (9) de calibração ($R^2=0,81$) encontrada por ROQUE (2007).

$$\theta = 8,488 + 2,111Ka - 0,04805Ka^2 \quad (9)$$

Em que:

Ka = constante dielétrica aparente (adimensional);

θ = umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$).

Para a estimativa da condutividade elétrica aparente, a técnica da TDR baseia-se na impedância característica da sonda obtida conjuntamente com a leitura da umidade volumétrica. As leituras da umidade e da condutividade elétrica foram analisadas com auxílio de um software de mapeamento superficial que apresentou o perfil de distribuição da água e do soluto, durante todo o ensaio.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme exposto anteriormente os tratamentos foram identificados como A1, E1, A1,6 e E 1,6, a fim de, facilitar a discussão dos resultados.

6.1 Análise dos Dados Experimentais

Utilizando o software de mapeamento superficial foi possível uma melhor compreensão e comparação da dinâmica da água e do soluto no solo entre os tratamentos utilizados. O método de interpolação selecionado no programa foi o da Krigagem, pois segundo GONÇALVES (2004), a krigagem faz uso de um interpolador linear não tendencioso e de variância mínima que assegura a melhor estimativa dos dados. Este estimador tem como base os dados amostrais da variável regionalizada e as propriedades estruturais do semivariograma obtido a partir destes dados.

Para verificar se o número de pontos amostrados foi suficiente na representação da umidade volumétrica no solo para cada aplicação, foi determinado o respectivo volume aplicado, integrando-se a área representada pelas dimensões do bulbo úmido e será apresentado com mais detalhes neste tópico.

6.2 Distribuição da AAM e do EET

Nas Figuras 17 e 18 a seguir foram analisados os perfis de umidade volumétrica para cada aplicação (de 1 a 10 L), para a vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ e comparados entre o EET e a AAM.

Cada isolinha representada por uma tonalidade de cor possui um valor de $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Verifica-se através destas isolinhas a formação do bulbo úmido caracterizado pelo avanço da frente de molhamento no solo.

A umidade do solo segundo SILVA et al. (2003) pode interferir na formação do bulbo úmido, principalmente no gotejamento subsuperficial, uma vez que, a umidade inicial do solo abaixo do gotejador foi determinada e considerada elevada ($0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Os resultados apresentados demonstram que a vazão dos gotejadores e as propriedades físicas do solo exercem efeito diferenciado na forma do bulbo úmido. De acordo com os valores de umidade volumétrica obtidos com as leituras da TDR, observou-se que os bulbos apresentaram formas características. Os volumes de água aplicados formaram bulbos semelhantes aos descritos por ZUR (1996), formas arredondadas e elípticas.

Os eixos em azul (-z) e vermelho (+z) representam as dimensões vertical do bulbo a partir do ponto de emissão. O eixo em laranja (r) representa a maior distância radial alcançada pela frente de molhamento durante as aplicações.

Observou-se que a profundidade atingida pela frente de molhamento manteve-se constante a partir da sétima aplicação para o tratamento A1, e para o E1 a partir da oitava aplicação, sendo esta dimensão para ambos de aproximadamente 0,65m. Uma vez que, este trabalho contribui com informações sobre a geometria do bulbo úmido para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada na cultura da cana-de-açúcar, esta profundidade de acordo com KOFFLER (1986) é ideal para disponibilizar água na altura efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar para que não ocorra estresse hídrico nesta cultura. ZUR (1986) também propõe que o bulbo úmido deve atingir até o limite da profundidade efetiva das raízes. MAIA et al. (2010) avaliou que a determinação da profundidade máxima atingida pelo bulbo úmido por um emissor no solo é importante para prever as perdas de água e nutrientes aplicados.

O espaçamento entre emissores proposto pelo fabricante dos gotejadores utilizados neste experimento é de 0,55 m para a vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$. Avaliando-se a dimensão radial da frente de molhamento após a última aplicação, observou-se em ambos os tratamentos que há uma singularidade entre esta dimensão e o espaçamento sugerido pelo fabricante. Este valor do raio horizontal para os tratamentos A1 e E1 foi de aproximadamente 0,20 m, e representa quase a metade da distância entre os emissores, supondo-se a formação de uma faixa horizontal contínua de umidade ao longo da linha de irrigação.

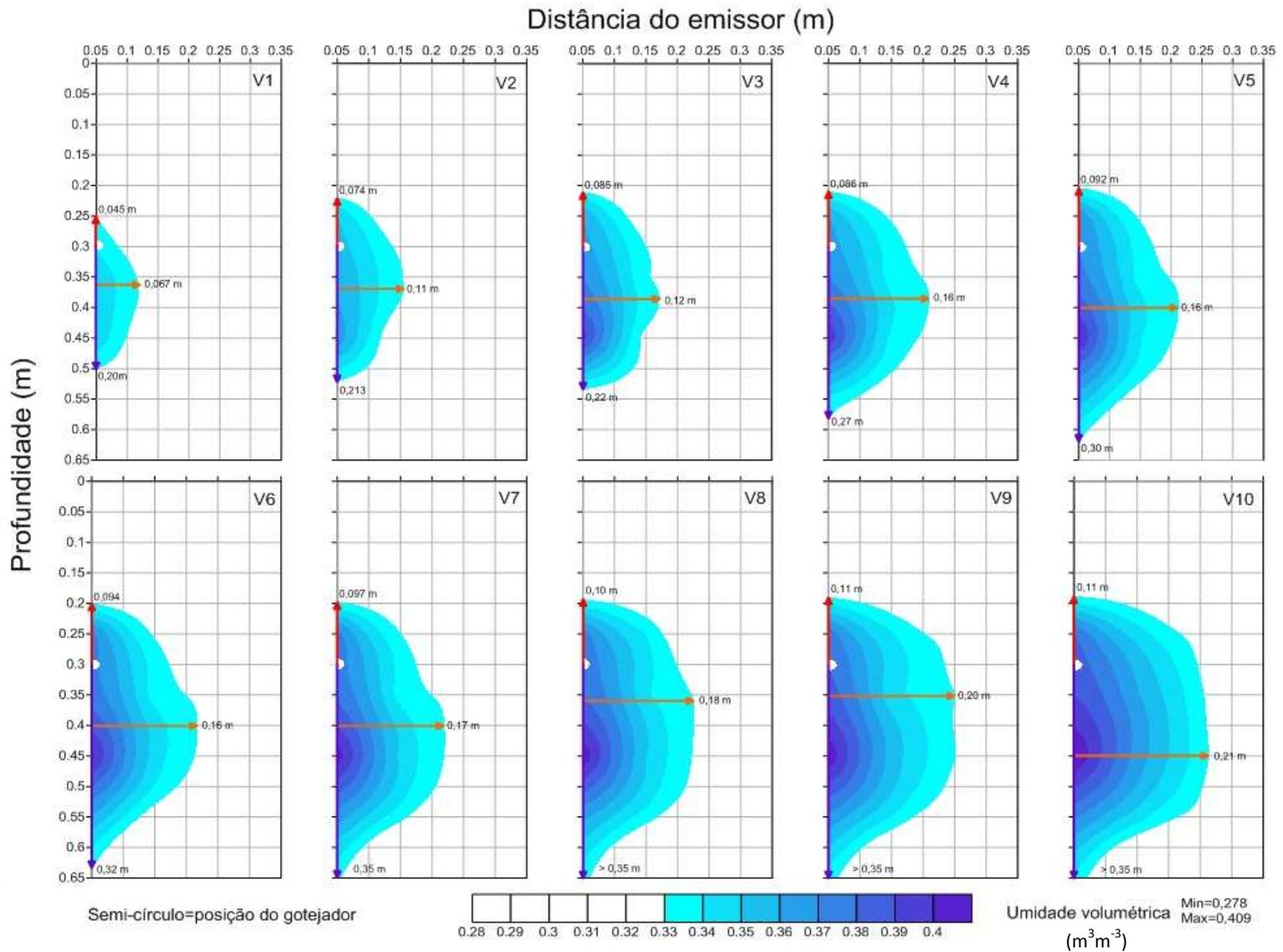


Figura 17. Perfis de umidade do solo (m³ m⁻³) entre cada aplicação de 1L de AAM (V1-V10) na vazão de 1,0 L h⁻¹

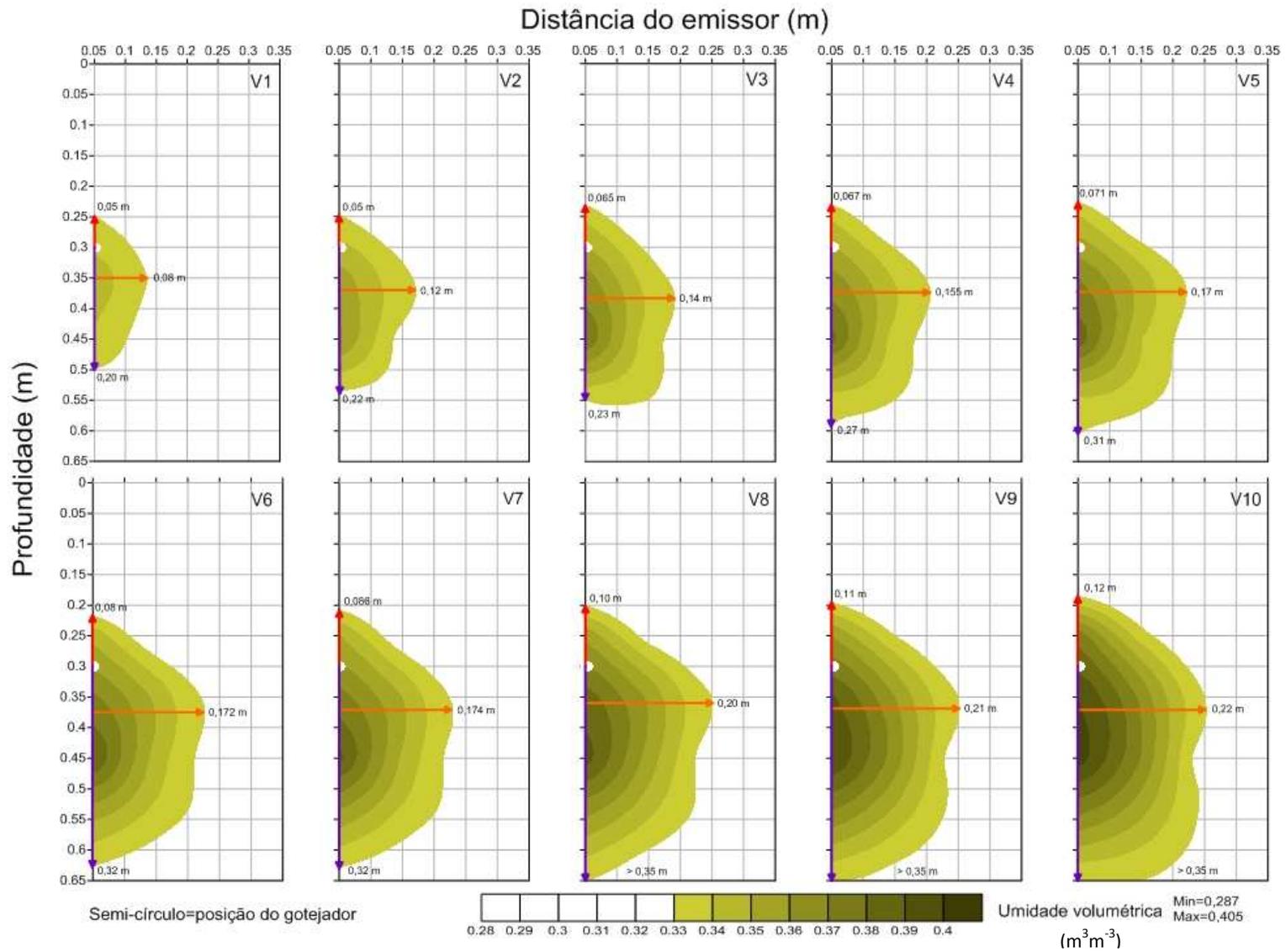


Figura 18. Perfis de umidade do solo (m³ m⁻³) entre cada aplicação de 1 L de EET (V1-V10) para a vazão de 1,0 L h⁻¹

Após as dez aplicações para os tratamentos A1 e E1 foram obtidas as dimensões vertical (+z e -z) a partir do emissor e a dimensão radial (r) máxima atingida pela frente de molhamento. As regressões lineares destas dimensões e os respectivos coeficientes de correlação entre a AAM e o EET estão apresentados na (Figura 19). Verificou-se que os coeficientes de correlação das dimensões (-z e r) foram satisfatórios, havendo uma associação linear entre dimensões equivalentes (-z) e (r) da ABM e do EET. Porém, o coeficiente de correlação da dimensão radial (+z) não apresentou uma associação aceitável. Uma explicação presumível para este fato seria a ocorrência de possíveis alterações nas propriedades físicas do solo durante a instalação do tubo gotejador, mesmo tendo sido aguardado um período de dois meses de reestruturação do mesmo.

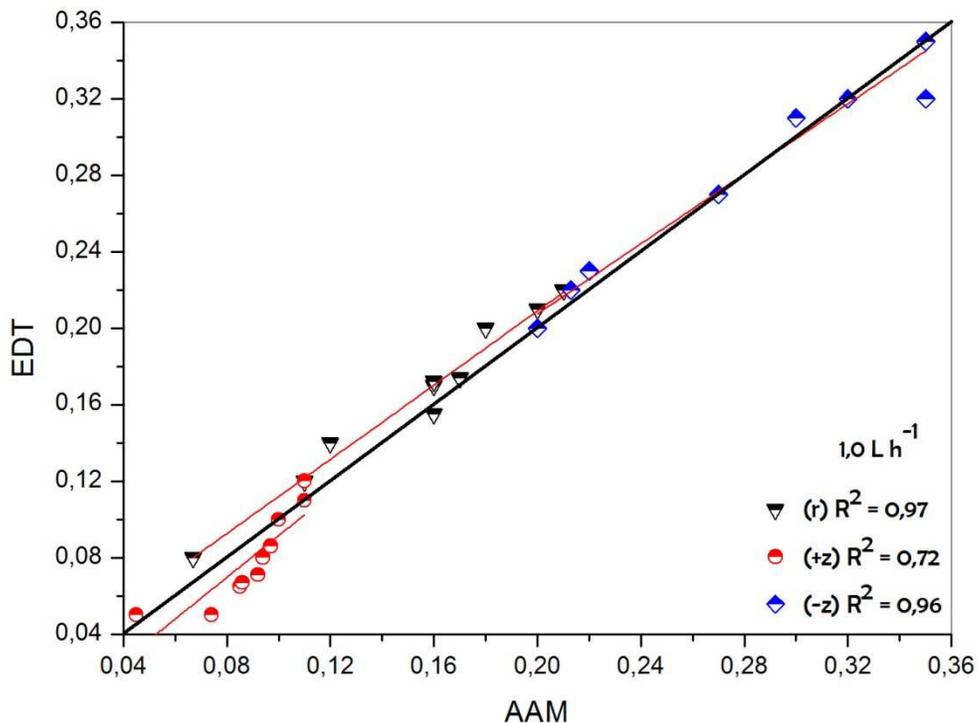


Figura 19. Regressões lineares entre as dimensões do bulbo (r; +z; -z) em cada aplicação de EET e AAM e as respectivas correlações para a vazão de 1,0 L h⁻¹.

Nas Figuras 20 e 21 a seguir são apresentados os bulbos molhados para os tratamentos A1,6 e E 1,6.

Conforme já mencionado, os eixos em azul (-z) e vermelho (+z) representam as dimensões vertical do bulbo a partir do ponto de emissão, e o eixo em laranja (r) representa a maior distância radial alcançada pela frente de molhamento durante as aplicações.

Observou-se também nestes tratamentos que os bulbos apresentaram formas características, ou seja, arredondadas e elípticas conforme os bulbos descritos por ZUR (1996). Estes resultados confirmam as observações feitas por KANDELOUS et al. (2011) ao comparar os resultados experimentais e analíticos de bulbos obtidos a partir da irrigação subsuperficial em solo argiloso a 0,30 m de profundidade, obtendo formas e dimensões similares aos deste trabalho.

Aumentando a vazão do gotejador para $1,6 \text{ L h}^{-1}$ observou-se um aumento no raio horizontal, e diminuindo a vazão notou-se um acréscimo no raio vertical do bulbo úmido, devido à alteração da área de infiltração de acordo com os tratamentos. BRESLER et al. (1971), BRESLER (1978), SCHWARTZMAN e ZUR (1986) e KELLER e BLIESNER (1990), através de experimentos realizados concluem que um aumento na vazão do gotejador resulta em um acréscimo no movimento horizontal e uma menor ampliação no movimento vertical da água no bulbo, para um mesmo tipo de solo e volume de água aplicado, confirmando dessa forma os resultados aqui apresentados. Também foi observado por SOUZA e MATSURA (2004) um incremento no raio horizontal em relação ao raio vertical, comparando os bulbos de umidade do solo, ao aplicarem água via gotejamento superficial em um Latossolo Vermelho distroférico, dobrando a vazão (de 2 para 4 L h^{-1}).

O fabricante dos gotejadores propõe um espaçamento de 0,65 m para a vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, conforme já mencionado. Avaliando-se a dimensão máxima do raio horizontal da frente de molhamento após a última aplicação, observou-se também em ambos os tratamentos que há uma singularidade entre esta dimensão com o espaçamento sugerido pelo fabricante. O valor do raio horizontal para os tratamentos A1,6 e E1,6 foi de aproximadamente 0,30 m. Como estes valores representam quase a metade da distância entre os emissores, supõe-se a formação de uma faixa horizontal contínua de umidade ao longo da linha de irrigação.

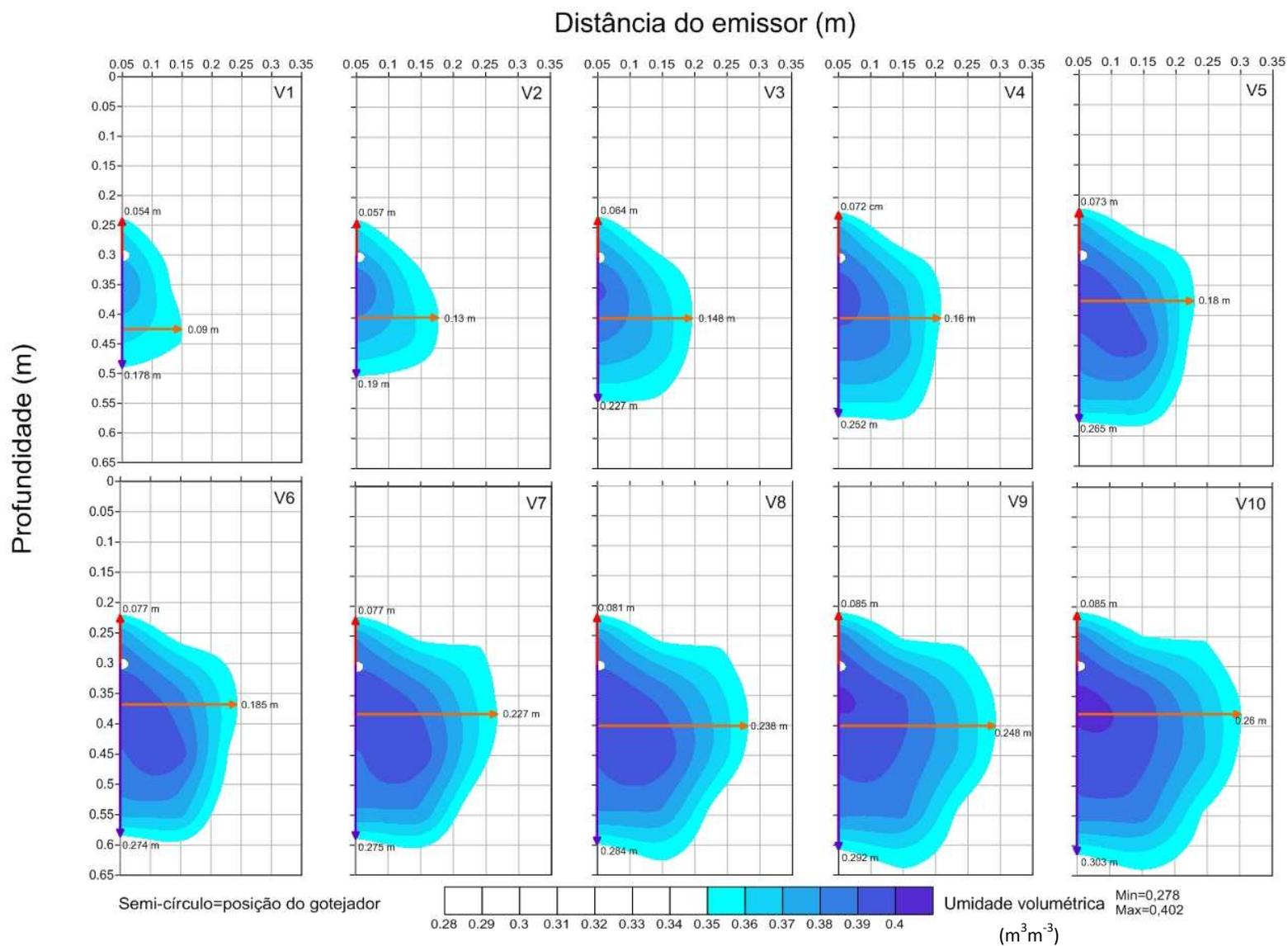


Figura 20. Perfis de umidade do solo (m³ m⁻³) entre cada aplicação de 1 L de AAM (V1-V10) para a vazão de 1,6 L h⁻¹

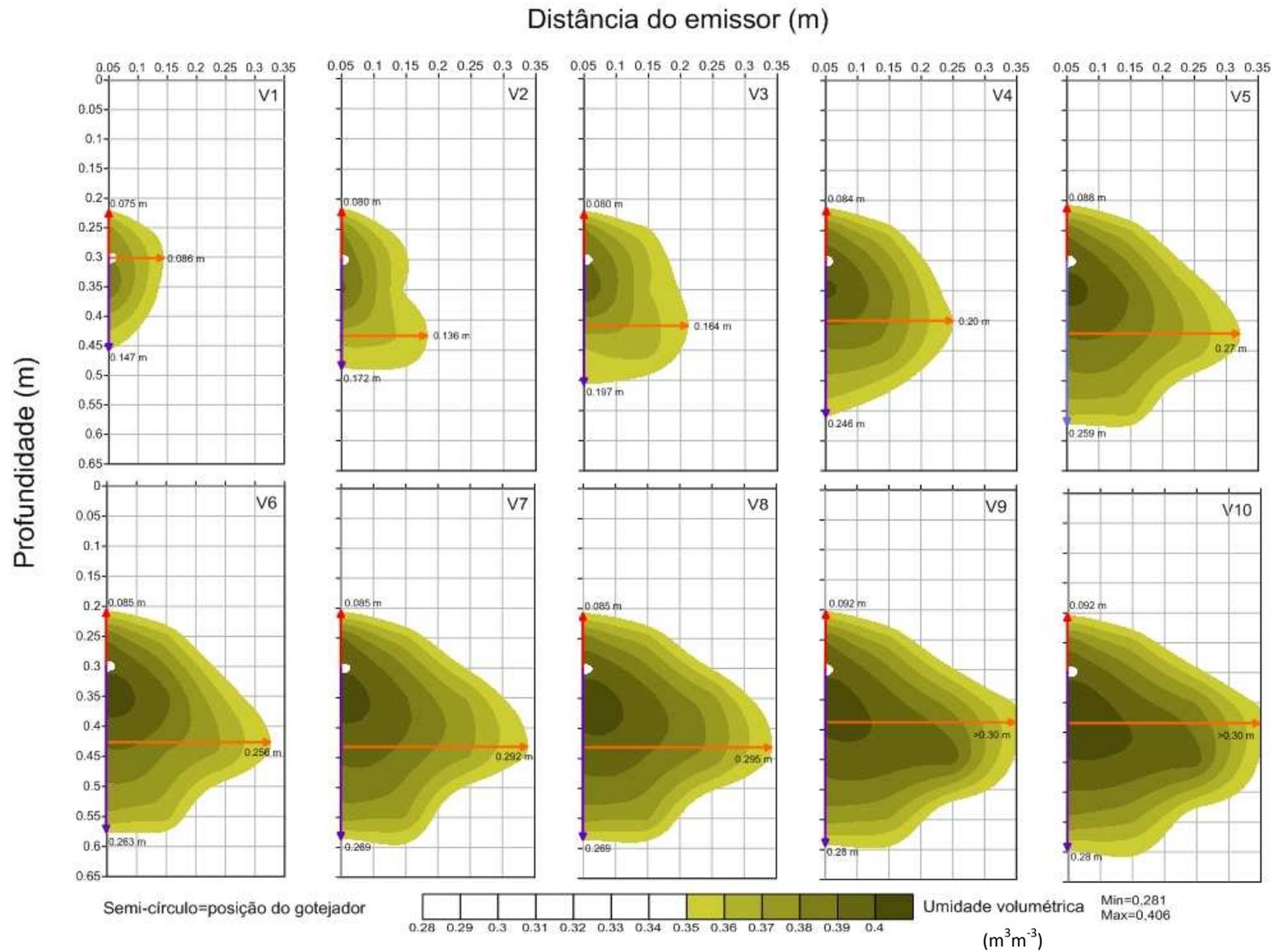


Figura 21. Perfis de umidade do solo (m³m⁻³) entre cada aplicação de 1 L de EET (V1-V10) para a vazão de 1,6 L h⁻¹

Na Figura 22 foram feitas as regressões lineares e obtidos os coeficientes de correlação das dimensões vertical (+z e -z) e radial (r) durante as aplicações para os tratamentos A1,6 e E1,6. Observou-se um coeficiente de correlação satisfatório das dimensões (-z e r), havendo uma associação linear entre dimensões equivalentes (-z) e (r) da AAM e do EET. Assim como nos tratamentos A1 e E1, o coeficiente de correlação da dimensão radial (+z) não apresentou uma associação aceitável entre os tratamentos A1,6 e E1,6, corroborando com a hipótese sugerida anteriormente sobre possíveis alterações nas propriedades físicas do solo durante a instalação do tubo gotejador, mesmo tendo sido aguardado um período de dois meses de reestruturação do mesmo.

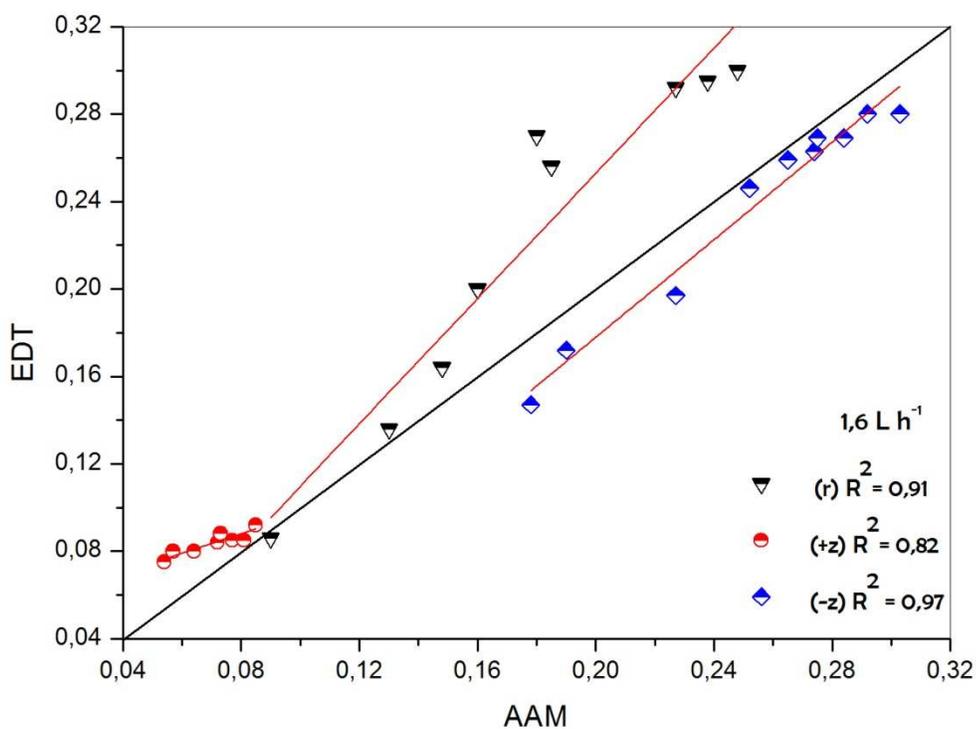


Figura 22. Regressões lineares entre as dimensões do bulbo (r; +z; -z) em cada aplicação de EET e AAM e as respectivas correlações para a vazão de 1,6 L h⁻¹.

6.3 Volume Aplicado e Área Subsuperficial Molhada

Nas Tabelas 4 e 5, têm-se os valores para os volumes teóricos aplicados e os volumes estimados através da integração das áreas, representadas pelas dimensões do bulbo úmido para cada tratamento. Observou-se que os volumes estimados são inferiores aos volumes teóricos aplicados. Tal fato pode ser explicado devido ao número de sensores utilizados na determinação das umidades e o método de interpolação utilizado (Krigagem), subestimando o volume aplicado em relação ao volume teórico. LOPES et al. (2009) ao aplicar nitrato de potássio por gotejamento superficial em um argissolo, a fim de, determinar o bulbo úmido também obteve volumes acumulados medidos inferiores aos volumes teóricos.

Tabela 4. Variação entre o volume teórico aplicado e o volume estimado (vazão 1,0 L h⁻¹)

Tratamento e Aplicação	Volume teórico (mL)	Volume estimado (mL)	% volume estimado em relação ao volume teórico
A1			
1 ^a	1	0,978	98,70
2 ^a	2	1,953	97,59
3 ^a	3	2,866	95,32
4 ^a	4	3,951	98,77
5 ^a	5	4,985	99,70
6 ^a	6	5,845	97,34
7 ^a	7	6,825	97,43
8 ^a	8	7,889	98,59
9 ^a	9	8,854	98,37
10 ^a	10	9,798	97,98
E1			
1 ^a	1	0,987	98,70
2 ^a	2	1,983	99,14
3 ^a	3	2,991	99,69
4 ^a	4	3,981	99,52
5 ^a	5	4,995	99,90
6 ^a	6	5,936	98,92
7 ^a	7	6,958	99,4
8 ^a	8	7,915	98,92
9 ^a	9	8,887	98,73
10 ^a	10	9,841	98,38

Tabela 5. Variação entre o volume teórico aplicado e o volume estimado (vazão 1,6 L h⁻¹)

Tratamento e Aplicação	Volume teórico (mL)	Volume estimado (mL)	% volume estimado em relação ao volume teórico
A1,6			
1 ^a	1	0,986	98,60
2 ^a	2	1,912	95,40
3 ^a	3	2,988	99,20
4 ^a	4	3,927	98,17
5 ^a	5	4,846	96,80
6 ^a	6	5,796	96,60
7 ^a	7	6,846	97,75
8 ^a	8	7,930	99,12
9 ^a	9	8,891	98,78
10 ^a	10	9,698	96,98
E1,6			
1 ^a	1	0,979	97,90
2 ^a	2	1,969	98,43
3 ^a	3	2,976	99,60
4 ^a	4	3,931	98,98
5 ^a	5	4,861	96,90
6 ^a	6	5,968	99,46
7 ^a	7	6,965	99,50
8 ^a	8	7,962	99,52
9 ^a	9	8,995	99,95
10 ^a	10	9,76	97,60

As Figuras 23 (A) e 24 (A) apresentam as áreas molhadas em relação aos volumes aplicados para cada tratamento. Observou-se que independentemente da vazão a área molhada com EET é superior em relação à AAM. Comparativamente a área do bulbo úmido após a décima aplicação foi 2,63% maior para o E1 em relação ao A1, e 3,4% maior para o E1,6 em relação ao A1,6. Uma explicação para este fato é que as aplicações iniciaram-se com a AAM para ambas as vazões e posteriormente com o EET, elevando a umidade inicial do solo (mesmo após o intervalo de 15 dias) e conseqüentemente à representação de uma área molhada superior.

Aumentando-se a vazão de 1,0 para 1,6 L h⁻¹ utilizando a AAM houve um acréscimo de 12,94% na área molhada e de 13,63% para o EET. BARROS et al. (2009) constatou um aumento de 8,2% ao dobrar a vazão de 2 para 4 L h⁻¹ de gotejadores enterrados. Desta forma, pode-se inferir que o aumento da vazão na irrigação subsuperficial representa um acréscimo na área superficial molhada, fato também confirmado por MAIA et al. (2010).

Os coeficientes de correlação das áreas subsuperficiais molhadas para os tratamentos A1, E1, A1,6 e E1,6, estão apresentados nas Figuras 23 (B) e 24 (B). Observou-se para os tratamentos com vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ uma redução neste coeficiente quando comparado ao valor obtido nos tratamentos com vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$. Porém, há uma associação aceitável entre as áreas para todos os tratamentos, sugerindo não haver diferenças significativas entre as dimensões dos bulbos molhados formados a partir da aplicação de AAM e EET

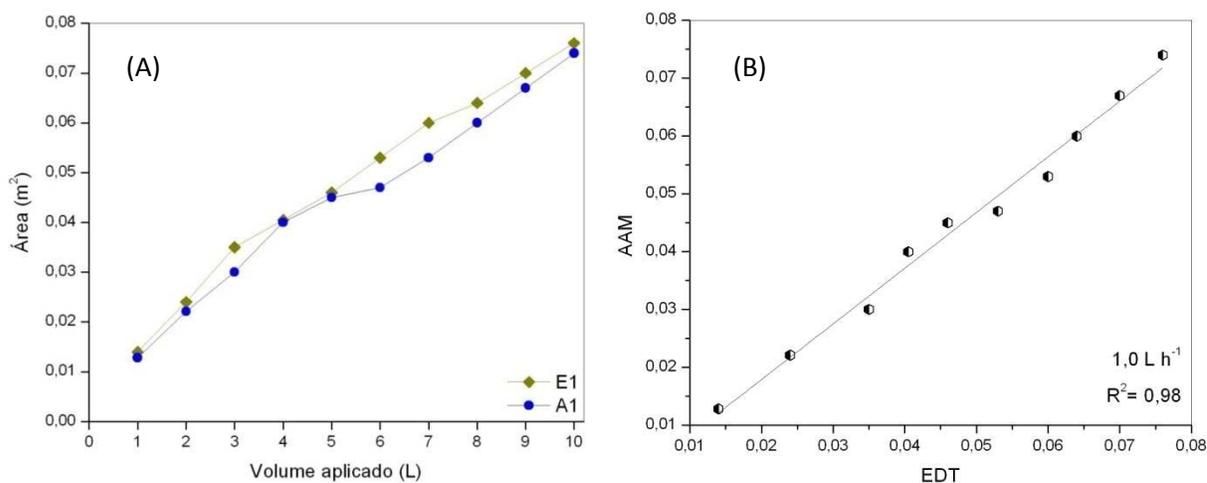


Figura 23. (A) Relação entre a área subsuperficial molhada e o volume teórico aplicado para os tratamentos A1 e E1; (B) Correlação entre as áreas subsuperficiais molhadas dos tratamentos A1 e E1.

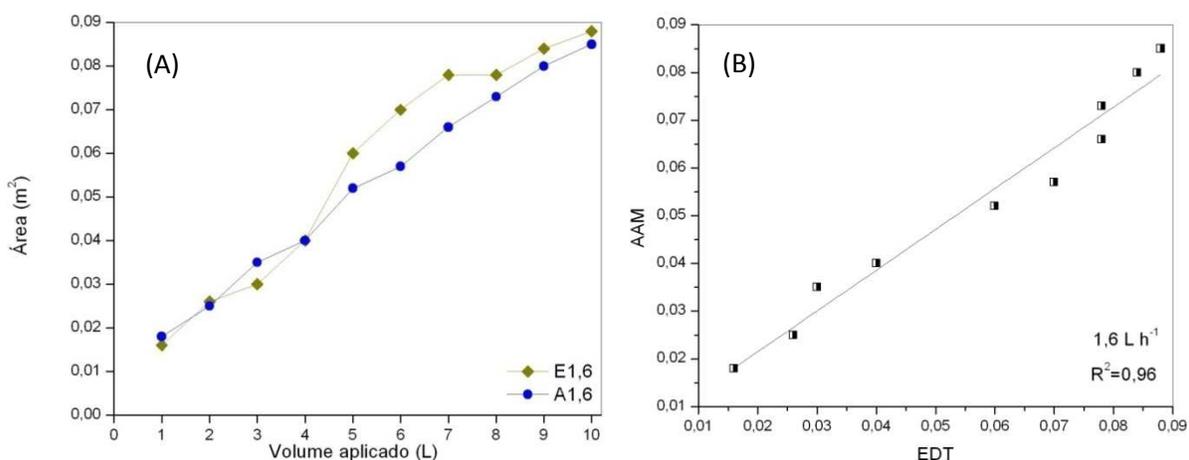


Figura 24. (A) Relação entre a área subsuperficial molhada e o volume teórico aplicado para os tratamentos A1,6 e E1,6; (B) Correlação entre as subáreas superficiais molhadas dos tratamentos A1,6 e E1,6.

6.4 Condutividade Elétrica do EET no Solo

A TDR permite a determinação simultânea da umidade e da condutividade elétrica aparente solo.

SONCELA et al. (2011) ao utilizar a técnica para estimar a condutividade elétrica em um solo irrigado com água residuária da suinocultura, obteve resultados que indicam a viabilidade da técnica na determinação deste parâmetro.

A condutividade elétrica do EET em função da umidade do solo foi estimada pela TDR e os perfis de CE estão apresentados nas Figuras 25 e 26. Os bulbos formados pela interpolação dos valores de CE apresentaram formatos similares quando comparados aos bulbos obtidos com os valores interpolados da umidade. Porém, observou-se a partir das medidas dos eixos verticais (azul e verde) e horizontal (cinza), que houve uma redução nas suas dimensões. LOPES (2009) verificou o mesmo fenômeno e baseou-se na hipótese de que os íons acompanham a frente de avanço da água, sendo que esta se movimenta um pouco a frente dos solutos, em direção ao extremo do bulbo.

FANTINATTI NETO (2007) define tal fenômeno de retardamento como sendo de sorção, em que a velocidade das espécies químicas é menor que a velocidade da água subterrânea. Este fenômeno inclui o processo físico-químico da adsorção em que a atração molecular fixa os solutos à superfície dos sólidos, tais como matéria orgânica, rocha ou partículas de solos. Os materiais que se comportam como adsorventes são os minerais de argila, oxi-hidróxidos de Fe e Al e as substâncias orgânicas (húmus), que são colóides eletronegativos, ou seja, têm uma carga superficial negativa capaz de fixar e trocar cátions. Portanto, como o solo da área experimental é um solo argiloso de textura média distroférico, a sua capacidade de retenção de cátions e de troca iônica sugere uma redução do bulbo quando dimensionado pelo parâmetro da condutividade elétrica.

Tomando como referência o ponto de emissão e comparando-se a distância vertical (profundidade) para ambas as vazões 1,0 e 1,6 L h⁻¹, notou-se que os íons presentes no EET atingiram profundidades maiores na menor vazão. Sob o ponto de vista da utilização do EET na fertirrigação, observou-se neste caso uma perda de nutrientes por lixiviação resultando em possíveis impactos ambientais como a contaminação de águas profundas, conforme observado por CHARLESWORTH e MURIRHEAD (2003).

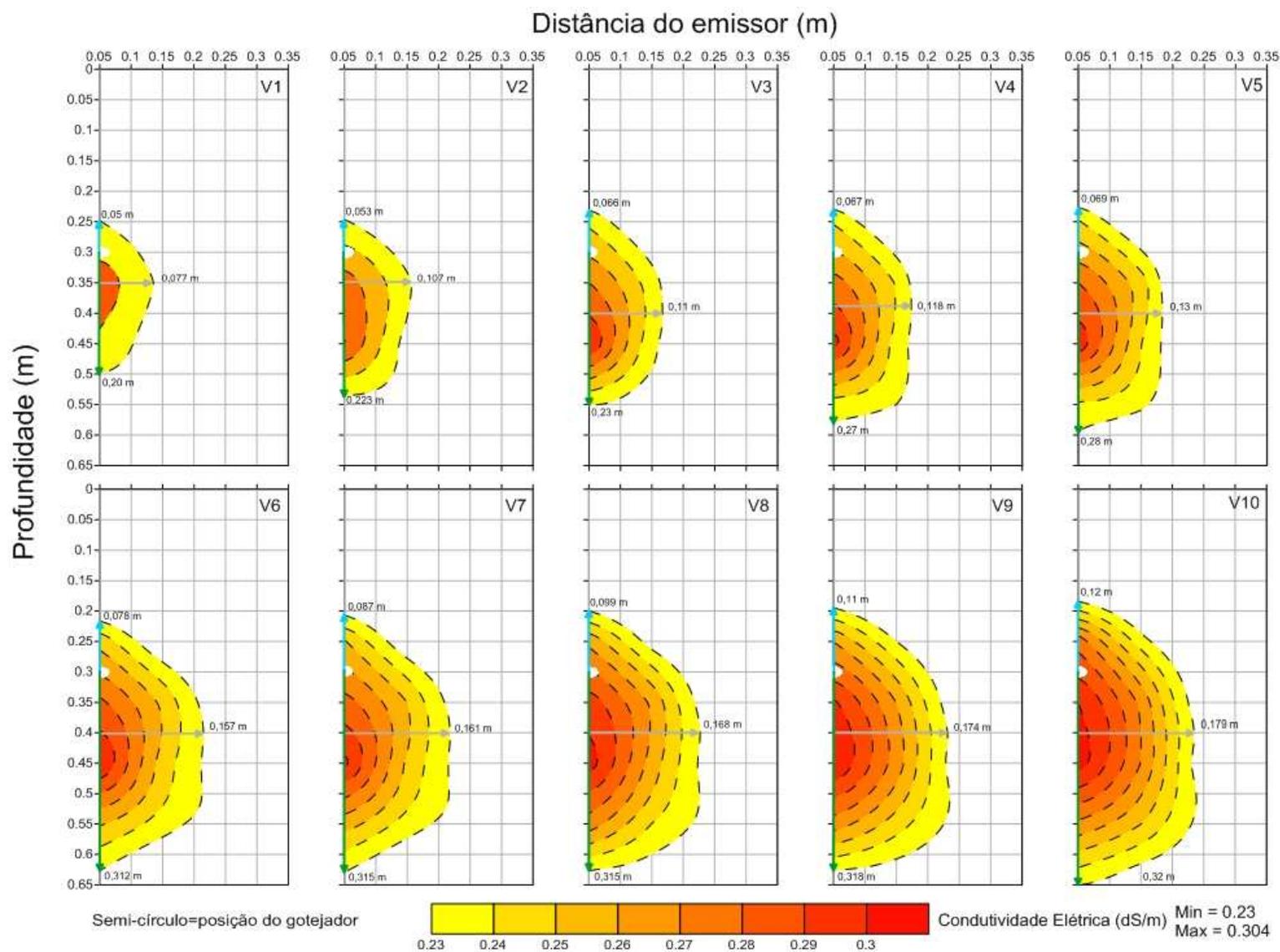


Figura 25. Perfis de condutividade elétrica do solo (dS m^{-1}) entre cada aplicação de 1L de EET (V1-V10) na vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$

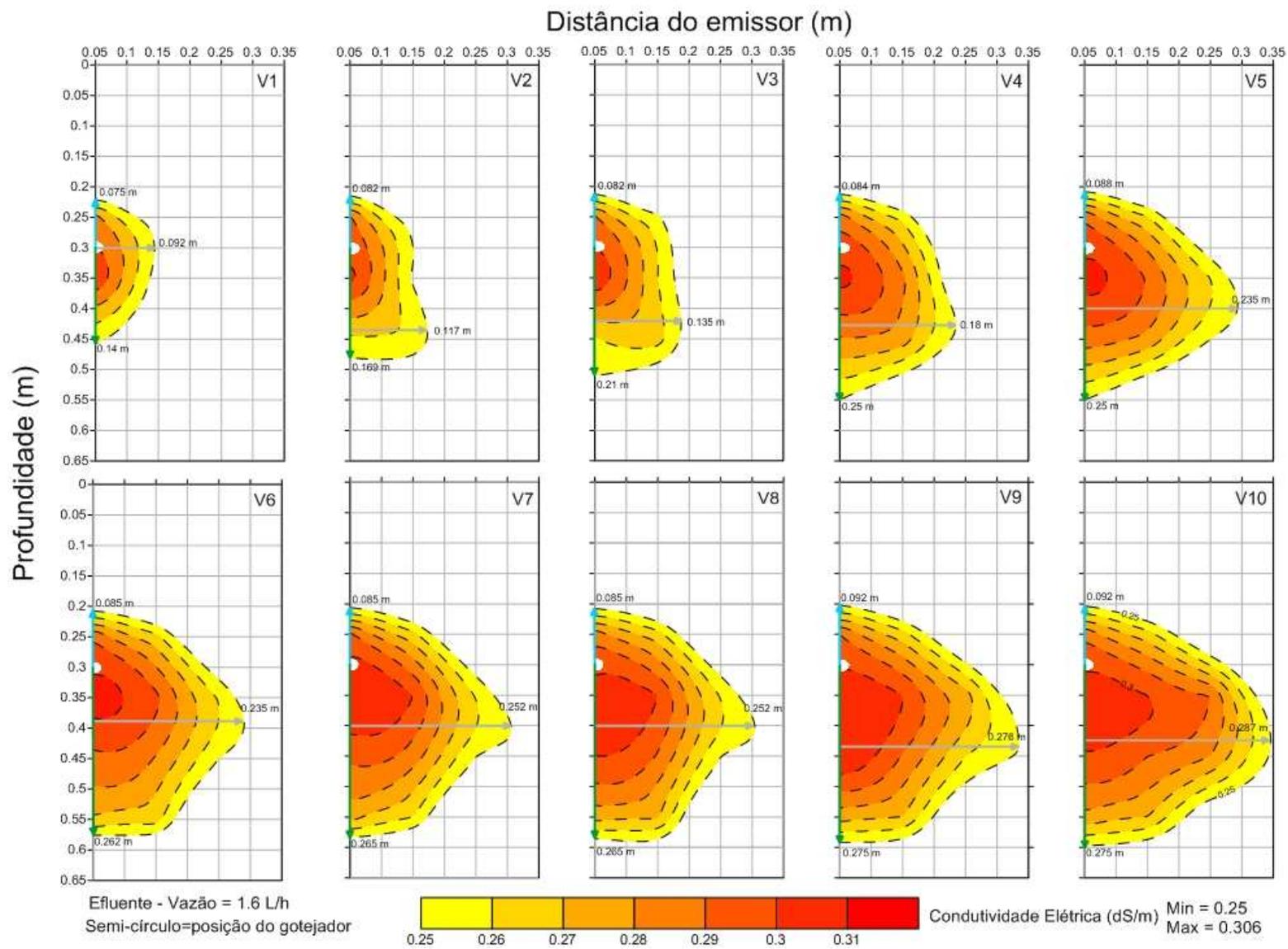


Figura 26. Perfis de condutividade elétrica do solo (dS m^{-1}) entre cada aplicação de 1L de EET (V1-V10) na vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$

Os íons presentes no EET na forma de sais podem nutrir as culturas elevando a sua produtividade, mas podem conduzir a impactos ambientais negativos. Observando-se as aplicações 8, 9 e 10 da Figura 25 observou-se um avanço dos íons na dimensão vertical (-z). Sendo muito solúveis, os nitratos possuem grande mobilidade no solo sendo facilmente transportados em profundidade, podendo contaminar aquíferos afetando dessa forma, a qualidade das águas subterrâneas (ABAIDOO et al., 2009).

Na Tabela 6 abaixo, tomando como referência o gotejador a partir do qual foi aplicado o EET e traçando-se uma linha horizontal ao longo do perfil do solo, observou-se através dos valores da condutividade elétrica uma elevação na concentração do soluto ao redor do gotejador com uma diminuição gradativa ao longo da frente de molhamento. SOUZA et al. (2009) ao aplicar via gotejamento superficial nitrato de potássio em um Latossolo Vermelho-Amarelo, observou também através das interações das diferentes umidades do solo e da distribuição da concentração do soluto, um gradiente espacial com aumento do armazenamento do soluto próximo ao gotejador reduzindo gradualmente no sentido da frente de molhamento.

BARROS et al. (2010) utilizou a técnica da TDR para o monitoramento da solução de nitrato de potássio aplicada por gotejamento subsuperficial e superficial e também obteve os maiores valores de condutividade elétrica próximos aos pontos de emissão.

A concentração de íons presentes no solo estimado pelo parâmetro da condutividade elétrica alerta para a presença de sais que causam efeitos adversos nas culturas, como o da toxicidade. A salinização na agricultura é talvez um dos mais críticos impactos ambientais negativos com o uso de águas residuárias. A salinidade e a sodicidade dos solos são causadas por sais inorgânicos e afetam a produtividade do solo alterando a pressão osmótica na zona radicular ou afetando diretamente as suas propriedades físicas (ABAIDOO et al., 2009).

Tabela 6. Valores da CE a partir do gotejador no sentido da frente de molhamento

Última aplicação	Distâncias em relação ao gotejador (m)				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
CE dS m ⁻¹ (Vazão 1,0 L h ⁻¹)	0,28	0,27	0,23	0	0
CE dS m ⁻¹ (Vazão 1,6 L h ⁻¹)	0,30	0,29	0,28	0,27	0,25

7. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que:

- i) Não houve diferenças significativas entre as dimensões dos bulbos molhados formados a partir da aplicação de AAM e EET para a vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ em um Latossolo Vermelho distroférico a 0,30 m de profundidade, assim como para a vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$.
- ii) O aumento na vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ para $1,6 \text{ L h}^{-1}$ elevou o raio horizontal do bulbo úmido sugerindo um espaçamento maior entre gotejadores com vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, sendo este incremento na distância para a maior vazão, recomendado pelo fabricante dos gotejadores.
- iii) De acordo com os gradientes de distribuição do EET no solo determinados pela condutividade elétrica em função do teor de umidade do solo, houve uma maior concentração do soluto próximo ao emissor.
- iv) A determinação do espaçamento entre gotejadores está relacionada com a vazão independentemente da utilização de EET ou AAM.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAIDOO, R. C.; BERNARD, K. D.; PRIYANKA, D.; AKPLE S. M. **Soil and Crop Contamination Through Wastewater Irrigation and Options for Risk Reduction in Developing Countries**, in P. Dion (ed) Soil Biology and Agriculture in the Tropics, Springer Verlag, Heilderbrg (2009).

ABNT - **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Emissores para sistemas de irrigação localizada - avaliação das características operacionais. PNBR 12: 02 - 08 - 021. São Paulo, 1986.7p.

AIROLDI, R.P.S. da. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária**. 140p. Dissertação de doutorado em Agronomia. Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

AL SALEM, S.A. Environmental considerations for wastewater reuse in agriculture. **WaterScience Technology**, Londres, v.33, n.10/11, p. 345-353, 1996.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Relatório de conjuntura de recursos hídricos no Brasil, 2009: Demandas de uso consuntivo**. 2011. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/>>. Acesso em: 2 jul. 2011.

ANGELAKIS, A.N.; MONTE, H.F.M.; BONTOUX, L.; ASANO, L. The status of wastewater reuse practice in the mediterranean basin: need for guidelines. **Water Resources**, Washington, v. 33, n. 10, p. 2201-2217, 1999.

APHA; AWWA; WPCF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19a edição, Washington D.C./USA, American Public Health Association, 1995.

ARAÚJO, A.L. de; KÖNG, A.; MILANÊZ, J.G.; CEBALLOS, B.S.O. de. **Reúso indireto de esgotos na irrigação de colunas experimentais de solo cultivados com alface (*Lactuca sativa*, L.)**, In: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, p.596-604, In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20, Rio de Janeiro, 1999.

ARBAT, G.; F.R. LAMM; KHEIRA ABOU, A. A. Effect of emitter spacing on soil water redistribution, corn yield productivity under subsurface drip irrigation (SDI). ASABE, St Joseph, MI. 17 pp, 2010

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **La calidad del agua en la agricultura**. Roma: FAO., 174 p., 1987

AYRES, R.S.; WESTCOT, D. W. Tradução: Gheyi, H.R.; Medeiros, J.F. & Damasceno, S.A.V. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 218p. 1991.

AYRES, R.S.; WESTCOT, D. W. Water quality for agriculture. Roma: FAO, 1985. 174 p. Irrigation and Drainage Paper, 29, Rev.1.

BARROS, A.C., FOLEGATTI, M. V., SOUZA, C. F.; SANTORO B. L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.13, n.6, p.700–707, 2009.

BARROS, A.C., FOLEGATTI, M. V., SOUZA, C. F.; SANTORO B. L. Distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.15, n.8, p.361–372, 2010.

BEN-ASHER, J.; PHENE, C.J. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model. In: JORGENSEN, G.S.; NORUM, K.N. **Subsurface drip irrigation. Theory, practices and application**. Fresno: California Center of Irrigation Technology. 1993. p.185-201.

BIZARI, D.R. **Cobertura morta de milho na umidade do solo e produtividade do feijoeiro irrigado em sistema plantio**, Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP , 222p., 2011.

BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em um ambiente protegido. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, p.29, 2000, Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: Universidade Federal de Pernambuco/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000.

BOND, W.J. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v.36, p.543-555, 1998.

BOUWER, H.; CHANEY, R.L. Land treatment of wastewater. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.26, p.133-176, 1974.

BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, New York, v.1, p.3-17, 1978.

BRESLER, E.; HELLER, J.; DINER, N.; BEN ASHER, J.; BRANDT, A.; GLODBERG, D. Infiltration of trickle source: Experimental data and theoretical predictions. **Science Society of America Proceedings**, v.35, p.683-689, 1971.

CAMP, C.R.; LAMM, F.R.; EVANS, R.G.; PHENE, C.J. Subsurface drip irrigation – past, present and future. In: National Irrigation Symposium, November 14-16, Phoenix, Arizona. **ASAE...** St, Joseph, MI, USA, p. 363-372, 2000.

CAMP, C.R. Subsurface drip irrigation: a review. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 41, p. 1353–1367, 1998.

CASAÑO, C. **Informacion geral**: riego por goteo subterráneo en olivar. Valencia: Mondragon, 1998. 7 p.

CHARLESWORTH, P.B.; MUIRHEAD, W.A. Crop establishment using subsurface drip irrigation: a comparison of point and area sources. **Irrigation Science**, New York, v. 22, n.4, p. 171-176, Nov. 2003.

CHRISTIANSEN, J.E. **The uniformity of application of water by sprinkler systems.** Agricultural Engineering, St. Joseph, v.22, p.89-92, 1941.

CIRRA – Centro Internacional de Referência em reúso de água. Reúso de água. Universidade de São Paulo. 2002. Disponível em: <<http://usp.br/cirra/reusos/>>. Acesso em: 2 jul. 2011.

CLOAGUEN, R. A. B. G. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um latossolo.** Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

COELHO, E.F.; ARRUDA, F.B. Aplicações da técnica de TDR: Manejo de água no solo. In: Matura, E.E.; JAVAREZ J., A.; GOMES, E.P.; SOUZA C.F. (ed.). Aplicações da técnica da TDR na Agricultura. Campinas: Feagri/Unicamp, cap. 7, p.129-145, 2001.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; FILHO, M.A.C. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas Grande, v.9, n.4, p.475-480, 2005.

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

CONCIANI, W.; CARNEIRO, B.J.; SOARES, M.M.; HERRMANN, P.S.P.; CRESTANA, S. Emprego TDR com sondas multihastes segmentadas para medida de umidade de um perfil de solo. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária, 1, 1996, São Carlos, **Anais...** São Carlos: EMBRAPA – CNPDIA, 1997, p. 169.

CONCIANI, W.; HERRMANN, P.S.P.; MACHADO, S.L.; SOARES, M.M. O uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação da umidade do solo *in situ*. **Revista Solos e Rochas**, Rio de Janeiro, v. 19, p.189-199, 1996.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº54, 28 de Novembro de 2005. Disponível em: <<http://mma.gov.br/>>. Acesso em: 2 out. 2011.

COOK, F. J. *et al.* Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 9, p. 1353-1359, 2006.

DAKER, A. **Irrigação e Drenagem: água na agricultura.** 7ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, v.3. 543p., 1988.

DALTON, F.N. Development of time-domain reflectometry for measuring soil-water content and bulk soil electrical conductivity. p. 143-167. In: G. C. Topp et al. (eds). Advances in measurement of soil physical properties: Bring theory into practice. SSSA. **Spec. Publ.** 30 SSSA, Madson, WI, 1992.

DALTON, F.N.; HERKELRATH, W.N.; RAWLINS, D.S.; RHOADES, J.D. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. **Science**, v.224, p.989-990, 1984.

- DARLI, A.; CRUZ, R.L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**.vol. 28, n.3, p. 516-524, 2008.
- DAVIS, J. L.; ANNAN , A. P. Electromagnetic detection of soil moisture. Progress Report, 1. **Canadian J. Rem. Sens.**, v.3, p.76-86, 1997.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos: **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: SNLCS, 1999.
- FANTINATTI NETO, F.P. **Estudo do Transporte de Contaminantes na Área de Disposição de Resíduos Sólidos da Cidade de Campos dos Goytacazes – RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007
- FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **J. Phys. Chern.**, v.73, p.616-623,1969.
- FOLEGATTI, M. V. Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças. **Agropecuária**. 458p. Guaíba, 1999.
- GAVA, J.de C.; SILVA, M. de A.; SILVA, R. C. da; JERONIMO Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejo de sequeiro e irrigado por gotejamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.
- GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. **Adv. Mol. Relax. Proc.**, v.7, p.45-59, 1975.
- GONÇALVES, A. C. A. **Uso da geoestatística para o manejo da água na agricultura irrigada**. In: Eduardo Guimarães Couto; Jésus Franco Bueno. (Org.). Os (des) caminhos do uso da água na agricultura brasileira. 1 ed. Cuiabá: EdUFMT - Editora Universitária, v. 1, p. 1-40, 2004.
- HAO, A. *et al.* Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. **Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University**, v. 01, n. 52, p. 187-193, 2007.
- HEIMOVAARA, T.J. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. Soil Science. **Society America Journal**.v.57, p.1410-1417, 1993.
- HEIMOVAARA, T.J.; FOCKE, A.G.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J.M. Assessing temporal variations in soil water composition in time domain reflectometry. Soil Science. **Society America Journal**.v.59, p.689-698, 1995.
- HERRMANN, P.S.P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas**. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – EEESC, Universidade de São Paulo.1993.

HESPANHOL, I. **Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos.** In: Mancuso, P.C.S.; Santos, H.F. dos; Phillippi Jr, A (Coord.) Reúso de Água. Barueri, SP: Manole, p.37-95, 2003.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 231p. 1970.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics.** San Diego: Elsevier Academic Press, 494 p., 2004.

HUSSAR, G. J. **Avaliação do desempenho de leitos cultivados no tratamento de águas residuárias de suinocultura,** Campinas: FEAGRI, UNICAMP, 1998, Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, 118 p. 2001.

JNAD, I.; LESIKAR, B.; KENIMER, A. & SABBAGH, G. Subsurface drip of residential effluent: I. soil chemical characteristics. **Transaction de ASAE.** St. Joseph. v.44, n.5, p.1149-1157, 2001a.

JNAD, I.; LESIKAR, B.; KENIMER, A. & SABBAGH, G. Subsurface drip of residential effluent: II. Soil hydraulic characteristics. **Transaction de ASAE.** St. Joseph. v.44, n.5, p.1159-1165, 2001b.

KANDELOUS, M. M.; SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.TH.; MALEK, K. **Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System,** Soil Science Society American Journal, Vol. 75, Number 2, March–April, 2011.

KELLER, J.; BLIESNER, R. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: **Chapman and Hall,** 652p. ,1990.

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

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

KOFFLER, N. F. **A profundidade sistema radicular e o suprimento de água às plantas no cerrado.** Piracicaba, POTAFÓS, 12 p., 1986

KÖNIG, A.; CEBALLOS, B.S.O. de; SANTOS, A.V. DOS; CAVALCANTE, R.B.; ANDRADE, J.L. de S.; TAVARES, J.L.; **Uso de esgoto tratado como fonte de água não convencional para irrigação de forrageiras.** In: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, p.2072-2081, In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19. Rio de Janeiro, 1998.

LAMM, F.R.; CAMP, C.R. **Subsurface drip irrigation. Microirrigation for crop production design, operation and management,** Eds. Lamm, F.R., Ayars, J.E., and Nakayama, F.S. Elsevier, Pp: 473-551, 2007.

LAVRADOR FILHO, J. **Contribuição para o entendimento do reuso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1987.

LOPES, L.N., MARTINS, E.; SANTORO B. L.; SOUZA C.F. Caracterização da distribuição da água no solo para irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 4, p. 564-577, outubro-dezembro, 2009.

LOPES, L. do N.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B. de L. Utilização da tdr para monitoramento da solução de nitrato de potássio em latossolo vermelho-amarelo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.5, p.932-947, 2010.

MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A.; MEDEIROS, J. F., NETO, J. D. Dimensões de bulbo úmido na irrigação por gotejamento superficial **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 149-158, jan-mar, 2010.

MALICKI, M.A.; WALCZAK, R.T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, n.50, p.505-514, 1999.

MILANI, D.I.C.; TAVARES, M.H.F.; SCHERPINSKI, Calibração de sondas TDR em condições de laboratório. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v.3, n.1, 2008

MEHNERT, D.U. **Reúso de efluente doméstico na agricultura e a contaminação ambiental por vírus entéricos humanos.** Biológico, v.65, n.1/2, p.19-21, São Paulo, 2003.

MOJID, A. M.; MALICKI, M. A. Comments on measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. **European Journal of Science**, Amsterdam, n.50, p.181-183, 1999.

MUALEN, Y.; FRIEDMAN, S.P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resour. Res.**, v. 27, p. 2771-2777, 1991.

NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical aspects salinity effect on TDR-measurement water content: a field study. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 63, p. 1070-1076, 1999.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Comp. and Elec. In Agr.**, v.31, p.213-237, 2001.

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

NOUR, E. A. A. **Tratamento de esgoto sanitário empregando-se reator anaeróbio compartimentado.** São Carlos: EESC, USP, 1996. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996, 148p.

PHENE, C.J.; SANDERS, D.C. High-frequency trickle irrigation and row spacing effects on yield and quality of potatoes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 773-776, 1976.

PIRES, R. C. M.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Irrigação e drenagem. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008, 882p.

QUEIROZ, S. O. P. **Método para avaliação de salinização do solo sob condições de ambiente protegido**. 2004, 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

RAMIREZ-FUENTES, E.; LUCHO-CONSTANTINO, C.; ESCAMILLA-SILVA, E. & DENDOOVEN, L. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. **Bioresource Technology**. v.85, n.2, p.179-187, 2002.

REIS, L.B. dos; FADIGAS, E.A.A.; CARVALHO, C.E. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. Barueri, SP: Manole, p.16-57. 2005.

RHOADES, J.D.; MANTEGHI, N.A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 53, p. 433-439, 1989.

RHOADES, J.D.; RAATS, P.A.; Prather, R.J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 40, p. 651-655, 1976.

RIBEIRO, G. M.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.15-22, 2005.

ROQUE, M.W. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo cultivado com feijão irrigado submetido a diferentes sistemas de preparo**. Campinas, 2007. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

SANDRI, D.; MATSURA, E.E.; TESTEZLAF, R. Desenvolvimento da alface Elisa em diferentes sistemas de irrigação com água residuária. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.11, n.1, p.17-29, Campina Grande, PB. 2007.

SANTOS, S.R dos; PEREIRA, G.M. Comportamento da alface tipo americana sob diferentes tensões da água no solo, em ambiente protegido. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.569-577, set/dez. 2004.

SILVA, C.A.; MATOS, J.A.; MEDEIROS, J.F.; LEVIEN, S.L.A. Dimensões de bulbo úmido em solos utilizados na irrigação por gotejamento superficial: argissolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais ...** Goiânia: SBEA, 2003. p. 224-228.

SILVA, T. S. M. et al. Condutividade elétrica da solução de solo em função da condutividade elétrica aparente e da umidade do solo sob aplicação de cloreto de potássio com uso da reflectometria no domínio do tempo. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 2, p. 174-183, 2005.

- SINGH, D. K.; T. B. S. RAJPUT; D. K. SINGH; H. S. SIKARWAR, R. N. SAHOO; T. AHMAD. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. **Agric. Water Mgmt.** 83(1-2): 130-134, 2006.
- SONCELA, R.; SAMPAIO S. C.; VILAS BOAS, M. A.; TAVARES, M. H. F.; SOUZA, C.F.; SONCELA, A. S. Electrical conductivity of soil irrigated with swine wastewater estimated by time-domain reflectometry¹. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2011, vol.35, n.4, pp. 1293-1300. ISSN 0100-0683. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400023>. Acesso em:17 jan. 2011.
- SOUZA, C.F., MATSURA, E.E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.63 - 68, 2002.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p.7-15, 2004.
- SOUZA¹, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F.; OR, D. Sondas de tdr para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 12-25, jan./mar. 2006.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração do equipamento da tdr para um Latossolo vermelho distroférico. **Engenharia Rural**, v.17, n.1, julho/2006.
- SOUZA, C.F; FOLEGATTI, M.V.; OR, D. Distribution and storage characterization of soil solution for drip irrigation. *Irrigation Science* (2009) 27:277–288 DOI 10.1007/s00271-008-0143-y
- SOUZA, A.L.; MATSURA, E.E.; MIRANDA, J.H. de; ROQUE, M.W.; BIZARI, D.R.; ROQUE, W. Reflectometria no domínio do tempo em estudos de lixiviação de potássio em colunas de solo não-saturado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.4, p.1219-1222, 2009.
- SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.112, p.242-253, 1986.
- SCHWANKL, L. J.; HANSON B. R. 2007 Chapt. 12: Surface drip irrigation. In *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation and Management*, 431-472. F. R. Lamm, J. E. Ayars, and F. S. Nakayama, eds. Amsterdam, The Netherlands: **Elsevier Publications**.
- THORNBURN, P.J.; COOK, F.J.; BRISTOW, K.L. Soil dependent wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. **Irrigation Science**, New York, v.22, n.3, p. 121 – 127, Nov., 2003.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

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

TROOIEN, T.P.; LAMM, F. R.; STONE, L.R.; ALAM, M.; RODGERS, D. H.; CLARK, G.A.; SCHLEGEL A.J.; Subsurface drip irrigation using livestock wastewater: drip line flow rates. **Applied Engineering in Agriculture**, 16(5), p. 505-508, 2000.

VALENTIM, M. A. A. **Desempenho de leitos cultivados ("constructed wetland") para tratamento de esgoto: contribuições para concepção e operação.** FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, Campinas/SP, 2003. 210 p. (Tese de Doutorado)
VARALLO, A.C.T.; CARVALHO, L.; SANTORO, B.L.; SOUZA, C.F. Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com água de reuso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p.372-377, 2010.

VIEIRA, D. B.; Francisco, J. A. G. **Formação do bulbo úmido sob gotejamento em Latossolo vermelho amarelo – orto.** In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 7, 1986, Brasília. Anais... Brasília, ABIRD, p.71-99, 1986.

WARRICK, A. W.; D. Or. 2007. Chapt. 2: Soil water concepts. In *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation and Management*, 27-59. F. R. Lamm, J. E. Ayars, and F. S. Nakayama, eds. Amsterdam, The Netherlands: **Elsevier Publications**.

WIENS, P.E.; SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; QUEIROZ, S.O.P. Avaliação da técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) no estudo da dinâmica de solutos no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA/UFBA, 2002. [CD-ROM].

WOLVERTON, B. C. “Aquatic Plant / Microbial Filters for Treating Septic Tank Effluent”. **Proceedings:** 1st International Conference on Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chattanooga – Tennessee/USA, vol. 1, no 5, pp. 173-177, junho/1988.

ZANELLA, L. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: wetlands-construídos Utilizando brita e bambu como suporte.** FEC – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, Campinas/SP, 2008. 189 p. (Tese de Doutorado).

ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; JENKINS, D.R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. **Water Resour. Res.**, v. 25, p. 2367-2376, 1989.

ZUR, B. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. **Irri. Sci.** 16 (3): 101-105, 1996.

9. ANEXOS

Exemplo sequencial do algoritmo utilizado na programação do datalogger.

```
Public LaL(21)
Public LaL2(21)
Public ToppVWC(21)
Public batt_volt
Public Panel_temp
Public EC(21)
Public PTemp
Public MuxChan
Dim I

Const a0=8.488
Const a1=2.11
Const a2=-0.04806
Const a3=0

DataTable (IDRA,1,-1)
  DataInterval (0,5,Min,3)
  Sample (21,LaL(),FP2)
  Sample (21,LaL2(),FP2)
  Sample (21,ToppVWC(),FP2)
  Sample (21,EC(),FP2)
  Sample (1,Batt_volt,FP2)

EndTable

BeginProg
  Scan (5,Min,2,3)
  PanelTemp (PTemp,250)
  Battery (Batt_volt)

  TDR100 (EC(1),0,3,1101,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
  TDR100 (EC(2),0,3,1201,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
  TDR100 (EC(3),0,3,1301,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
  TDR100 (EC(4),0,3,1401,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
  TDR100 (EC(5),0,3,1501,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
  TDR100 (EC(6),0,3,1601,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
  TDR100 (EC(7),0,3,1701,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
  TDR100 (EC(8),0,3,1801,4,1.0,251,7.5,12.5,.2,0.05,2.83,0)
```

TDR100 (EC (9) , 0, 3, 2101, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (10) , 0, 3, 2201, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (11) , 0, 3, 2301, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (12) , 0, 3, 2401, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (13) , 0, 3, 2501, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (14) , 0, 3, 2601, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (15) , 0, 3, 2701, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (16) , 0, 3, 2801, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)

TDR100 (EC (17) , 0, 3, 3101, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (18) , 0, 3, 3201, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (19) , 0, 3, 3301, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (20) , 0, 3, 3401, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)
TDR100 (EC (21) , 0, 3, 3501, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 2.83, 0)

TDR100 (LaL (1) , 0, 0, 1101, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (2) , 0, 0, 1201, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (3) , 0, 0, 1301, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (4) , 0, 0, 1401, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (5) , 0, 0, 1501, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (6) , 0, 0, 1601, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (7) , 0, 0, 1701, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (8) , 0, 0, 1801, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)

TDR100 (LaL (9) , 0, 0, 2101, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (10) , 0, 0, 2201, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (11) , 0, 0, 2301, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.04, 1, 0)
TDR100 (LaL (12) , 0, 0, 2401, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (13) , 0, 0, 2501, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (14) , 0, 0, 2601, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (15) , 0, 0, 2701, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (16) , 0, 0, 2801, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)

TDR100 (LaL (17) , 0, 0, 3101, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (18) , 0, 0, 3201, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (19) , 0, 0, 3301, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (20) , 0, 0, 3401, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)
TDR100 (LaL (21) , 0, 0, 3501, 4, 1.0, 251, 7.5, 12.5, .2, 0.05, 1, 0)

```
For I=1 To 21
  LaL2(I)=LaL(I)^2
Next I
For I=1 To 21
  ToppVWC(I)=a0 + a1*LaL2(I) + a2*LaL2(I)^2 + a3*LaL2(I)^3
  CallTable TDRA

Next I

NextScan

EndProg
```