

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

**Estudo Técnico e Econômico de um Dispositivo
Visando à Automação de Sistemas de Irrigação a
Partir do Monitoramento do Conteúdo de Água
no Solo**

Selma Cristina de Oliveira Batista

2012



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**ESTUDO TÉCNICO E ECONÔMICO DE UM DISPOSITIVO VISANDO
À AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO A PARTIR DO
MONITORAMENTO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO**

SELMA CRISTINA DE OLIVEIRA BATISTA

Sob a Orientação do Professor
Daniel Fonseca de Carvalho

e

Co-orientação do Professor
Leonardo Oliveira Médici

Dissertação submetida como
requisito parcial para obtenção do
grau de **Mestra em Ciências**, no
Curso de Pós-Graduação em
Agronomia, Área de Concentração
em Ciência do Solo

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2012

631.7
B333e
T

Batista, Selma Cristina de Oliveira, 1983-

Estudo técnico e econômico de um dispositivo visando à automação de sistemas de irrigação a partir do monitoramento do conteúdo de água no solo / Selma Cristina de Oliveira Batista – 2012.

44 f.: il.

Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia.

Bibliografia: f. 38-44.

1. Irrigação - Automação - Teses. 2. Irrigação agrícola - Teses. 3. Alface - Irrigação - Teses. 4. Alface - Cultivo – Teses. I. Carvalho, Daniel Fonseca de, 1968-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

SELMA CRISTINA DE OLIVEIRA BATISTA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2012.

Daniel Fonseca de Carvalho. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Rubens Alves de Oliveira. Dr. UFV

Guilherme Kangussú Donagemma. Dr. EMBRAPA-CNPS

EPIGRAFE

“Se teus projetos são para um ano, semeie o grão.

Se são para dez anos, plante uma árvore.

Se são para cem anos, instrua o povo.

Semeando uma vez o grão, colherás uma vez;

Plantando uma árvore, colherás dez vezes;

Instruindo o povo, colherás cem vezes.

Se deres um peixe a um homem, ele comerá uma vez;

Se o ensinares a pescar, ele comerá a vida inteira.”

Kuan-Tzu

(sábio chinês, século VII a.C.)

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus que iluminou toda a minha trajetória acadêmica e científica, dando força e sabedoria para encarar os desafios e tranquilidade que ele proveu em todos os momentos. Obrigada Senhor!

A minha família querida e amada por acreditar em mim e me auxiliarem a caminhar sempre em frente, em especial, aos meus sobrinhos que sempre contagiaram e motivaram-me com sua alegria e amor. Que meus passos possam tornar o de vocês mais leves.

E ao meu amado Giovane Leal pelo seu amor; companheirismo; amizade; cumplicidade; compreensão principalmente durante o período de execução do trabalho de campo, pela ajuda na minha carreira profissional durante esses seis anos de convivência. Muito obrigada! Te Amo!

A vocês dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), “minha casa” durante a graduação e o mestrado, lugar onde fiz amigos e comecei a trilhar minha trajetória profissional.

Aos meus Orientadores professores Dr. Daniel Fonseca de Carvalho e Dr. Leonardo Oliveira Médici pela confiança, disposição em ensinar, incentivo, paciência e dedicação.

Aos demais professores da UFRRJ pelos conhecimentos compartilhados.

Ao curso de Pós Graduação em Agronomia - Ciência do Solo pela oportunidade de fazer parte desta equipe. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.

Ao professor Raul de Lucena e o pesquisador José Guilherme pelo apoio constante na condução dos trabalhos.

Aos funcionários do SIPA (Sistema Integrado de Produção Agroecológica) conhecida como Fazendinha Agroecológica e aos funcionários da UFRRJ pelo apoio na execução dos trabalhos.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas (GPASSA), pela amizade e pelo apoio nas diversas atividades realizadas, em especial ao Hugo, Hermes e Daniela.

As minhas amigas Sumaya, Dalila, Fabiana, Itaynara, Karina, Laura, Mara, Suelen e Lorena, verdadeiras irmãs. A amizade de vocês fez muita diferença.

A todos que de alguma forma me ajudaram chegar até aqui.

RESUMO

BATISTA, Selma Cristina de Oliveira. **Estudo técnico e econômico de um dispositivo visando à automação de sistemas de irrigação a partir do monitoramento do conteúdo de água no solo.** 2012. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamentos de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ, 2012.

O presente estudo teve como objetivo estudar o uso de um “acionador simplificado para irrigação” em diferentes condições de funcionamento e tipos de solo. Três experimentos foram conduzidos, ao longo de 2010 e 2011, nas instalações do SIPA (Sistema Integrado de Produção Agroecológica), localizado no município de Seropédica-RJ. Em casa de vegetação, foram realizados dois experimentos desenvolvidos em um delineamento experimental inteiramente casualizado, num esquema fatorial $2 \times 2 \times 2$, sendo os fatores: (a) 2 desníveis do pressostato (0,30 m e 0,90 m); (b) 2 tipos de textura de solo (argilosa e arenosa) e (c) 2 volumes de vaso (2,76 L e 4,81 L) e 3 repetições. As amostras de solo utilizadas foram provenientes do horizonte A de um Planossolo Háplico e do horizonte B de um Argissolo Vermelho Amarelo. O primeiro experimento foi conduzido sem cultivo e o segundo, com o cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.), cultivar Regina. Utilizando a mesma cultivar de alface, conduziu-se o experimento de campo em uma área, cujo solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo. Esse estudo foi desenvolvido em um delineamento experimental em blocos ao acaso, num esquema fatorial 2×2 , com 6 repetições, sendo os fatores: (a) 2 desníveis do pressostato (0,30 m e 0,90 m) e (b) 2 profundidades de instalação da cápsula cerâmica (0,10 m e 0,20 m). As variáveis de produção avaliadas foram: massa fresca e massa seca da parte aérea, diâmetro da cabeça, área foliar de cada planta. Com o acionamento automático do sistema de irrigação, diferentes volumes de água foram aplicados aos vasos com solo, sendo os mesmos proporcionais à tensão de acionamento provocada pelos desníveis do pressostato, e influenciados pelos tipos de solo e volume de vaso. Estes volumes foram transformados em lâmina aplicada para a análise dos tratamentos em ambos os experimentos em casa de vegetação. As variáveis de produção da cultura estudadas, em ambas as condições de cultivo, foram submetidas à análise de variância utilizando o teste F. Nos experimentos conduzidos em casa de vegetação às parcelas com desnível do pressostato a 0,3 m foram as que receberam maiores lâminas irrigadas e a alface se desenvolveu melhor no solo de textura arenosa, em vasos de 4,81 L e com o desnível do pressostato a 0,3 m, obtendo um diâmetro médio da cabeça de 14,65 cm. Em campo, a produção média de massa fresca da cabeça foi maior (301,83 g por planta) para o desnível do pressostato a 0,9 m. Nessa condição, a lâmina aplicada foi de 58,77 mm, representando uma reposição de 77% da ETo acumulada durante o período, e a eficiência no uso da água (EUA) de 802,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹. Não foram observadas diferenças significativas em relação à profundidade de instalação da cápsula cerâmica no canteiro.

Palavras-chave: Irrigação automatizada. *Lactuca sativa* L. Manejo da irrigação.

ABSTRACT

BATISTA, Selma Cristina de Oliveira. **Technical and economic studies of a device aimed at automation of irrigation systems from the monitoring** of soil water content. 2012. 44 p. Dissertation. (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

The present study aimed to study the use of a "simplified controller for irrigation" in different operating conditions and soil types. Three experiments were conducted during 2010 and 2011, in the SIPA (Integrated System of Organic Production) installations, located in the municipality of Seropédica (RJ), Brazil. In the greenhouse, two experiments were developed in a completely randomized design in a factorial 2 x 2 x 2 factors: (a) 2 levels of the pressostate (0.30 and 0.90 m) and (b) two soil texture classes (clayey and sandy); and (c) 2 vessels volume (2.76 L and 4.81 L), with 3 replicates. Soil samples were taken from the A horizon of a Fragiudult soil, and from the B horizon of an Udult soil. The first experiment was conducted without plant cultivation and the second with lettuce (*Lactuca sativa L.*) Regina variety. Using the same variety of lettuce, it was conducted a field trial in an area of the Udult soil. The study was conducted in a randomized complete blocks, in a 2 x 2 factorial arrangement with six replications, and the following factors: (a) 2 levels of the pressostate (0.30 and 0.90 m), and (b) 2 installation depths of the ceramic capsule (0.10 m and 0.20 m). The production variables evaluated were: fresh and dry aerial biomass, lettuce head diameter, and foliar area of each plant. In the irrigation system with automatic starting, different volumes of water were applied to pots containing soil, and they were proportional to the driving voltage, caused by the difference in pressostate levels, and influenced by soil types and vessel volume. These volumes were transformed into irrigation amounts to analyze the treatments in both greenhouse experiments. The crop production variables studied, in both cropping conditions, were subjected to variance analysis using the F test. In the greenhouse experiments, the plots with 0.3 m level of the pressostate resulted in the highest irrigation volume, and the lettuce grew best in the sandy texture soil, in the 4.81 L pots and with the 0.3 m level of pressostate, with a head diameter of 14.65 cm. In the field study, the average head production in terms of fresh weight was highest (301.83 g per plant) for the 0.9 m level of pressostate. In this condition, the irrigation layer was of 58.77 mm, representing a recovery of 77% of ETo accumulated during the period, and the water use efficient (WUE) was of 802.5 kg ha⁻¹ mm⁻¹. There were no significant differences in relation to the installation depth of the ceramic capsule in the planting bed.

Key words: Automated irrigation. *Lactuca sativa L.* Irrigation management.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões dos vasos utilizados nos experimentos em casa de vegetação.	12
Tabela 2. Resultado da análise de retenção de água no solo (umidade em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).	13
Tabela 3. Textura (g.kg^{-1}) dos solos utilizados no trabalho.....	13
Tabela 4. Análise química dos solos utilizados no trabalho.	13
Tabela 5. Resultado da análise química do substrato orgânico utilizado na produção de mudas (Oliveira, 2010).....	14
Tabela 6. Análise química do Argissolo Vermelho-Amarelo em duas profundidades.	15
Tabela 7. Textura do Argissolo Vermelho-Amarelo em duas profundidades.....	16
Tabela 8. Lâmina (mm) aplicada correspondente aos tratamentos de desnível de pressostato com interação ao volume de vaso.....	28
Tabela 9. Lâmina (mm) aplicada ao longo do segundo experimento em casa de vegetação correspondente aos tratamentos de desnível de pressostato com interação ao tipo de solo.....	28
Tabela 10. Média de produção de cada variável avaliada.	29
Tabela 11. Diâmetro da cabeça da alface (cm) cultivado em casa de vegetação correspondente aos tratamentos de desnível de pressostato com interação ao tipo de solo.....	29
Tabela 12. Média de produção de cada variável avaliada.	34
Tabela 13. Variáveis de produção massa fresca e massa seca.....	34
Tabela 14. Produtividade e eficiência do uso da água (EUA) no cultivo da alface, nos diferentes tratamentos.	35
Tabela 15. Discriminação dos materiais utilizados na montagem do dispositivo e seu valor unitário.	36
Tabela 16. Consumo de energia de elétrica pelo sistema em cada tratamento.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do acionador automático para irrigação.	11
Figura 2. Componentes para a confecção do acionador.	11
Figura 3. Esquema experimental em casa de vegetação.....	12
Figura 4. Instalação do acionador em campo.	16
Figura 5. Croqui da área experimental no campo (dimensões em metros).	17
Figura 6. Instalação das válvulas solenoides no início da linha de derivação.....	17
Figura 7. Esquema da instalação elétrica do dispositivo em campo.	18
Figura 8. Hidrômetro utilizado no experimento.	19
Figura 9. Curvas de calibração para o Argissolo Vermelho Amarelo (ARG) e Planossolo Háplico (PL).	21
Figura 10. Variações de umidade relativa do ar e oscilações de temperatura registradas pelo termohigrógrafo no interior da casa de vegetação.	22
Figura 11. Monitoramento da temperatura registrada no experimento em casa de vegetação com planta cultivada.	23
Figura 12. Lâminas aplicadas mensalmente em vasos de 2,76 L (a) e 4,81 L (b) para o experimento sem planta.	24
Figura 13. Lâminas aplicadas semanalmente em vasos de 2,76 L (a) e 4,81 L (b) para o experimento com planta.....	25
Figura 14. Variação do conteúdo de água no solo ao longo do experimento em cada tipo de solo, Argissolo (a, b) e Planossolo (c, d) durante a primeira fase (sem cultivo).	26
Figura 15. Variação do conteúdo de água no solo ao longo do experimento em cada tipo de solo, Argissolo (a, b) e Planossolo (c, d) durante a segunda fase (com cultivo).	27
Figura 16. Curva de calibração para cada camada de solo analisada.	30
Figura 17. Dados meteorológicos observados durante o experimento em campo.	31
Figura 18. Lâminas de água recebidas em cada tratamento.	32
Figura 19. Conteúdo de água no solo ao longo do experimento na profundidade de 0,10 m (a) e 0,20 m (b).	33

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1.	A Água na Agricultura	3
2.2.	Monitoramento da Água no Solo	3
2.3.	Automação de Sistemas de Irrigação	5
2.4.	A Cultura da Alface (<i>Lactuca Sativa</i> L).....	7
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1.	Acionador Automático para Irrigação	10
3.2.	Experimento em Casa de Vegetação	11
3.3.	Caracterização e Preparo dos Solos.....	12
3.3.1.	Preparo e cultivo das mudas	14
3.3.2.	Colheita e análise de produção	14
3.3.3.	Análises estatísticas	15
3.4.	Experimento em Campo	15
3.4.1.	Caracterização e preparo dos solos	15
3.4.2.	Preparo e cultivo das mudas	16
3.4.3.	Tratamentos.....	16
3.4.4.	Sistema de irrigação	18
3.5.	Colheita.....	19
3.6.	Eficiência no Uso da Água	19
3.7.	Estimativa da evapotranspiração	20
3.8.	Análise Estatística	20
3.9.	Avaliação de Custo do Dispositivo	20
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1.	Estudo do Funcionamento do Acionador em Casa de Vegetação.....	21
4.1.1.	Calibração da TDR	21
4.1.2.	Monitoramento meteorológico no interior da casa de vegetação	21
4.1.3.	Lâmina de água aplicada.....	23
4.1.4.	Monitoramento do conteúdo de água.....	25
4.1.5.	Análise estatística dos resultados.....	27
4.2.	Estudo do Funcionamento do Acionador em Campo.....	30
4.2.1.	Calibração da TDR	30
4.2.2.	Condições meteorológicas	31
4.2.3.	Lâmina aplicada de água.....	32
4.2.4.	Monitoramento do conteúdo de água no solo.....	32
4.2.5.	Variáveis de produção da cultura da alface avaliadas.....	33
4.2.6.	Eficiência no uso da água	35
4.3.	Avaliação de custo do dispositivo	36
5.	CONCLUSÕES	37
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

A crescente redução da disponibilidade dos recursos hídricos vem se tornando uma preocupação de âmbito mundial, pois é crescente a demanda por alimento já que de acordo com a ONU (2011), o planeta atingiu uma população de mais de 7 bilhões de habitantes e a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) afirma que nos próximos 39 anos a produção de alimentos nos países em desenvolvimento terá que dobrar para acompanhar este crescimento demográfico. Para isso, o sistema produtivo terá que superar vários desafios, sendo um deles, o decréscimo da disponibilidade de água.

A agricultura irrigada é o ramo da atividade humana que mais consome água, sendo a ela atribuída o uso de 70% da água disponível nas diversas atividades humana (Medici et al., 2010). Vale ressaltar que apesar deste grande consumo de água a agricultura irrigada é uma forma eficiente de se produzir alimentos (Paz et al., 2000; Parizi, 2007). Sendo assim, o manejo de irrigação deve ser considerado prática importante para o uso racional deste recurso, evitando desperdícios e otimizando a produção agrícola. Além disso, conservar os recursos hídricos contribui para a sustentabilidade do meio produtivo e minimiza os danos causados ao meio ambiente. De acordo com Paz et al. (2000), o manejo adequado dos sistemas de irrigação pode conduzir a excelentes resultados na produção de alimentos.

A eficiência da irrigação na agricultura pode ser melhorada com o uso de novas tecnologias e, embora existam inúmeras delas disponíveis, a grande maioria dos produtores ainda irriga de forma inadequada, ou seja, a decisão de quando e quanto irrigar é baseada em conhecimentos mais culturais do que técnicos. Normalmente são adotadas, como forma de manejo, observações visuais da cultura e da camada superficial do solo e não parâmetros relacionados à dinâmica de água no sistema solo-planta-atmosfera. Marouelli et al. (2003) ressaltam que a baixa adoção das tecnologias entre os agricultores está associada ao fato de julgarem que são caras, complicadas, trabalhosas e, sobretudo, sem resultados que proporcionem retornos financeiros satisfatórios.

O manejo da irrigação realizado empiricamente, sem o controle do conteúdo de água do solo ou da determinação da evapotranspiração da cultura, pode resultar em insucesso da atividade agrícola, reduzindo a produtividade da cultura, além de aumentar os custos de produção com maior uso de energia, desperdício de nutrientes, doenças e entre outros gastos acarretados por irrigações excessivas ou deficitárias. Assim, o estudo do monitoramento das condições de solo e clima durante o desenvolvimento da planta, aliado ao conhecimento sobre a cultura permite aplicar, com mais precisão, a quantidade requerida de água no momento oportuno.

O monitoramento do conteúdo de água do solo, por sua vez, possibilita ao produtor saber qual profundidade umedecer e como comportam as raízes em função da demanda hídrica. Várias são as formas de se monitorar o conteúdo de água do solo, sejam por métodos diretos, como o gravimétrico, ou por métodos indiretos, como os baseados na tensão da água no solo, por exemplo, tensiômetros. Nesse sentido, sistemas automáticos de irrigação vêm se tornando uma ferramenta importante, pois além de minimizar a necessidade de mão de obra, pode proporcionar a aplicação de lâminas adequadas para suprir a necessidade hídrica da cultura assim reduzindo os custos de produção e diminuindo os impactos da irrigação sobre a disponibilidade de água.

Na literatura existem vários estudos com sistemas automáticos e cada vez mais a agricultura irrigada vem acompanhando os avanços tecnológicos melhorando a eficiência dos sistemas de irrigação. A manutenção do conteúdo de água do solo é uma característica de sistemas automatizados baseado no uso de sensores de umidade, como o Irrigas® (Marouelli

et al., 2003) e o dispositivo apresentado por Medici et al. (2010), desenvolvido para manter automaticamente a tensão da água no solo entre 0 e -10 kPa, faixa de tensão necessária para a demanda da maioria das culturas, além disso, a confecção é bastante simples, excluindo a necessidade de obter-se mão-de-obra especializada e os materiais utilizados são de baixo custo.

Com base no exposto, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de avaliar o uso de um acionador automático para irrigação em diferentes condições de funcionamento e tipos de solo. O equipamento foi utilizado na irrigação da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.), tanto em condição de laboratório como em campo de produção.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A Água na Agricultura

Dos problemas que afetam a humanidade, a constante diminuição da qualidade e da disponibilidade dos recursos hídricos tem se tornado um dos mais agravantes, comprometendo a possibilidade do desenvolvimento sócio-econômico de regiões ou até mesmo de países, sendo um dos fatores limitantes para o desenvolvimento destes.

Dentre os diversos usos dos recursos água e solo, a agricultura irrigada se destaca, pois, apesar de todos os benefícios econômicos e sociais a ela associados, demanda grande quantidade de água, com aproximadamente 70% da água doce consumida no planeta (Calzadilla et al., 2010), além de muitas de suas práticas preconizarem o uso excessivo de produtos que podem contaminar o solo e as próprias fontes de água, inviabilizando seus usos para as futuras gerações. Assim, a constante diminuição da qualidade e da disponibilidade dos recursos hídricos tem se tornado cada vez mais agravante.

Na produção agrícola, a irrigação é uma técnica muito utilizada e que, em algumas regiões do globo terrestre, concorre diretamente com a indústria e abastecimento público pelo uso da água, tornando-se motivo de preocupação, pois o volume utilizado é demasiadamente grande (Chopart et. al., 2007; Queiroz et. al., 2008).

A grande quantidade de água requerida para a prática da irrigação, o decréscimo de sua disponibilidade e o alto custo da energia necessária à sua aplicação têm aumentado o interesse pela racionalização desse recurso, de forma a minimizar as suas perdas (Azevedo et. al., 1999; Freitag, 2007), pois apesar do consumo excessivo de água a agricultura irrigada é uma maneira eficiente de produzir alimento.

No Brasil, Parizi (2007) salienta que cerca de 50% da água consumida é proveniente da agricultura irrigada e de acordo com Queiroz et al. (2005), no país a grande maioria dos usuários não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação, e o monitoramento automático para esse manejo é ainda incipiente.

Segundo Queiroz (2007), o manejo inadequado da cadeia da irrigação, ocorre por uma causa mais cultural do que técnica. Culturalmente, o produtor rural irriga em excesso com receio que a planta sofra algum estresse hídrico. Consequentemente, esta atitude irá propiciar perdas de água e de nutrientes pela percolação abaixo da zona radicular, além de contribuir para a criação de um ambiente favorável à proliferação de microrganismos patogênicos. Em contrapartida, em irrigações deficitárias a lâmina de água atingirá apenas as camadas superficiais do solo, diminuindo a reserva hídrica na zona radicular, o que prejudica o crescimento de raízes.

Diante do exposto, o manejo de água de irrigação é uma medida importante visando à otimização do consumo deste recurso hídrico e deve ser implementada dentro de um critério técnico e econômico. O controle diário do conteúdo de água no solo, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, associado ao conhecimento de parâmetros relacionados à planta, ao solo e ao clima, constitui uma maneira de se determinar o momento oportuno de promover a irrigação e a quantidade de água a ser aplicada, evitando o uso incorreto e excessivo desse recurso pela agricultura. No entanto, vários são os fatores que contribuem para a ausência do manejo de irrigação e entre eles destaca a metodologia que, embora disponível, não é difundida de forma adequada e acessível aos produtores.

2.2. Monitoramento da Água no Solo

Para um eficiente manejo da água de irrigação é fundamental o conhecimento da disponibilidade de água no solo para as plantas, sendo esta quantificada em função da

demanda de água da planta e da atmosfera e pela intensidade de fluxo de água do solo para as raízes (Reichardt & Timm, 2004).

Dentre os parâmetros utilizados no manejo da irrigação, o conteúdo da água no solo constitui-se num dos mais importantes no sistema solo-água-planta-atmosfera, sendo muito utilizado na avaliação e no monitoramento dos sistemas hidrológicos. Em geral, a determinação do conteúdo de água do solo é realizada utilizando uma variedade de métodos e sensores (Or & Wraith, 2002), sendo os principais deles o gravimétrico, que fornece diretamente os valores do conteúdo de água no solo, e os indiretos, que tomam como base medidas da moderação de nêutrons, da resistência do solo à passagem de uma corrente elétrica, da constante dielétrica do solo ou da tensão da água no solo (Teixeira & Coelho, 2005). Esses métodos vêm sendo aperfeiçoados ao longo dos tempos, se adequando ao avanço das tecnologias.

Durante a última década, a indústria avançou no desenvolvimento de sensores de umidade do solo (SMS), principalmente por duas razões básicas: a primeira tem haver com o grande desenvolvimento na área informática, com computadores de circuitos integrados com maior capacidade e mais compactos; e a segunda, pelos avanços significativos na aplicação dos métodos eletromagnéticos para a medição do conteúdo de água do solo, por fazerem uso da constante dielétrica (k_a) para estimar o conteúdo de água.

A constante dielétrica é um índice que expressa a permissividade do meio em relação à permissividade do vácuo. Para o ar, k_a é praticamente 1; para um solo seco, k_a normalmente varia de 2 a 5; e para água (20 °C) seu valor é de aproximadamente 81 (Cardenas-Lailhacar et al., 2008). Assim, em função da grande diferença no valor de k_a com a presença de água no sistema, conhecendo-se esta variável pode-se determinar o conteúdo da água no solo indiretamente (Topp, 2003).

A medição do conteúdo de água no solo por meio de métodos dielétricos vem sendo utilizadas com mais frequência por apresentarem, entre outras vantagens, medições instantâneas, requererem pouca ou nenhuma manutenção e por permitirem o fornecimento de leituras contínuas (Cardenas-Lailhacar & Dukes, 2010). Uma dessas técnicas é a Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR (Time Domain Reflectometry), cuja aplicação na determinação de propriedades físicas do solo foi introduzida por Topp et al. (1980). Seu princípio de funcionamento baseia-se na medida do tempo de propagação de um pulso de frequência de micro ondas, emitido ao longo de uma haste de aço inox, de comprimento conhecido, inserida no solo (Tommaselli & Bacchi, 2001; Santana et al., 2006). Este tempo de propagação depende do conteúdo de água do solo, sendo relacionado à constante dielétrica (k_a) do meio (Faria, 1998), que são principalmente regido pelo conteúdo de água ao redor das sondas (Topp, 2003; Blonquist et al., 2005).

Inúmeros artigos científicos têm sido dedicados a esta técnica durante estes últimos 20 anos (Laurent et al., 2005), tendo em vista suas diferentes aplicações. Sob o ponto de vista agrônômico, seu principal uso se baseia na determinação do conteúdo de água no solo (Topp et al., 1980) e a determinação da condutibilidade elétrica dos solos, com vistas a avaliação da salinidade da solução do solo (Dalton & Van Genuchten, 1986; Nadler et al., 1991; Souza et al., 2006).

Souza et al. (2011) realizaram o manejo da irrigação em pimentão (*Capsicum annuum* L.), por meio do balanço de água no solo, com utilização da técnica TDR no monitoramento do conteúdo de água do solo. Carvalho et al. (2011) utilizaram sondas de TDR afim de determinar as lâminas de irrigação no cultivo de beterraba (*Beta vulgaris*), além de outros autores que têm utilizado a técnica com sucesso no manejo da irrigação.

A TDR é considerada por vários autores como um dos métodos mais promissores por não oferecer riscos à saúde do operador, como as sondas de nêutrons, e ser extremamente sensível às variações do conteúdo de água do solo no solo. De acordo com Topp et al. (1980),

Coelho & Or (1996) e Souza (2002), para medidas do conteúdo de água do solo do solo, em laboratório ou em campo, a utilização da TDR proporciona precisão e ampla faixa de detecção do conteúdo de água no solo. Além disso, a técnica apresenta vantagens como a rapidez e a repetibilidade das leituras e a não destruição da região amostrada (Roque, 2007), podendo ainda ser acoplada a dispositivos de coleta automática dos dados, tornando-se possível a automação do sistema de irrigação (Coelho et al., 2003). Outra vantagem da TDR é a possibilidade de sua utilização para medição do conteúdo de água nas camadas superficiais do solo, normalmente ocupadas pelo sistema radicular efetivo das culturas, considerando-se a profundidade de interesse para determinação da lâmina a ser aplicada. Segundo Cardenas-Lailhacar & Dukes (2010) medições precisas podem ser realizadas junto à superfície do solo e seu custo tem diminuído substancialmente nos últimos anos.

Souza et al. (2006) consideram a TDR um método confiável para determinação do conteúdo de água e da concentração da solução no mesmo volume de solo, necessitando, para isso, que seja realizada uma calibração específica. Além da calibração, Coelho et al. (2003) ressalta a importância do local de instalação e o número de sensores no campo para que a amostragem seja mais representativa da área a ser irrigada.

2.3. Automação de Sistemas de Irrigação

Independente do método de monitoramento do conteúdo de água do solo, o uso sustentável da irrigação está diretamente associado à racionalização do uso da água que tem como objetivo principal reduzir os desperdícios, buscando aumentar sua eficiência pelas plantas, além de possibilitar o equilíbrio sustentável sob ponto de vista econômico, social e ambiental. Desta forma, o uso racional da água é garantido, obtendo-se produtividade com menor impacto ambiental. Visando também otimizar o uso da mão-de-obra nesses sistemas, a adoção de dispositivos de automação de baixo custo tem sido estudada, constituindo também uma ferramenta para controle da lâmina de água aplicada.

Nos últimos anos, tem sido observado na agricultura irrigada um avanço no emprego da automação dos sistemas. Isto implica na implantação de sistemas interligados e assistidos por redes de comunicação, compreendendo sistemas supervisórios e interfaces homem-máquina (IHM), que possam auxiliar os operadores no exercício de supervisão e análise dos problemas que porventura venham a ocorrer. Nos diversos setores produtivos, a automação decorre de necessidades, tais como: maiores níveis de qualidade de conformação e de flexibilidade, menores custos de operação, menores perdas de materiais e menores custos.

A automação da irrigação tende a se tornar cada vez mais comum, pois evita o desperdício da água, dispensa a mão-de-obra que seria empregada no acionamento dos sistemas de bombeamento, bem como na estimativa das lâminas de irrigação a serem aplicadas e também, segundo Noble et al. (2000), confere uma maior precisão reduzindo o erro humano. Tanto na agricultura quanto em cultivos domésticos de plantas, a automação da irrigação representa vantagens, pois maximiza e desonera a produção vegetal, além de conferir liberdade para as pessoas se ausentarem de suas casas com a segurança de deixar as plantas livres da seca. Queiroz (2007) afirma ainda que a automação é umas das ferramentas possíveis de se usar para tentar minimizar perdas.

A automação de sistemas de irrigação, baseado na tecnologia SMS (sensores de umidade do solo), apresenta potencial para fornecer água às plantas por meio da manutenção do conteúdo de água do solo num intervalo desejado, considerado ótimo ou adequado para o crescimento da planta (Muñoz-Carpena & Duques, 2005). Um sistema de irrigação automatizado, quando bem programado, apresentará vantagens em relação aos sistemas tradicionais, pois o acionamento manual geralmente é realizado de forma irregular e sem controle, aplicando lâminas excessivas, além do custo de se dispor de operadores para essa função (Médici, 1997; Macedo et.al., 2010). Boutraa et al. (2011) constataram maior

rendimento na produção em plantas de trigo irrigadas automaticamente quando comparadas com plantas manualmente irrigadas.

Smajstrla & Koo (1986), Clark et al. (1994), Smajstrla & Locascio (1994), Muñoz-Carpena et al. (2003) e Muñoz-Carpena et al. (2005) constataram economia de água com a utilização de tensiômetros para a automação da irrigação visando produção agrícola em localidades da Flórida (EUA). Entretanto, de acordo com Cardenas-Lailhacar (2006), essas pesquisas sugerem que os tensiômetros necessitam de calibração e manutenção frequentes, até duas vezes por semana. Assim, a adoção dessa tecnologia não levará a uma irrigação controlada automaticamente, uma vez que não elimina a interação humana no manejo da irrigação.

Outros tipos de sensores têm sido adaptados para automatizar a irrigação com base no conteúdo de água no solo. Nogueira et al. (2002) utilizaram sensores de TDR para manter o conteúdo da água do solo dentro de dois limites pré-estabelecidos (limite superior e inferior do conteúdo de água). Duques & Scholberg (2005) e Duques et al. (2003) utilizando sondas de TDR e sensor dielétrico encontraram 11% e 50% de economia de água, sem diminuir os rendimentos de milho doce e pimentão verde, respectivamente.

Sensores de matriz granular (GMSS) também têm sido utilizados para automatizar sistemas de irrigação em produções agrícolas (Shock et al., 2002; Muñoz-Carpena et al., 2003) e, como acontece com outros sensores, não necessitam de tanta manutenção como tensiômetros. Contudo, em irrigação em pequenas áreas, apesar da GMSS bem como outros tipos similares de sensores terem sido utilizados com sucesso na agricultura, eles encontram uma utilização limitada, pois há preocupação dos agricultores de o custo de comprar, instalar e operar os sensores de umidade do solo não compensarem a economia de água, além de acreditarem na dificuldade do uso e desconhecerem a durabilidade destes. (Qualls et al., 2001).

Rosenfeld et al. (2000) apresentaram resultados obtidos com um sistema de automação eletrônica, denominado “sistema ecológico autônomo”, como uma alternativa para o fornecimento de água às plantas operando com baixas pressões e mínima necessidade de energia, destacando a viabilidade para áreas inferiores a 10 ha. No entanto, o sistema não considera o potencial da água no solo, para definir o momento e o volume de água a ser aplicado. O sistema funciona várias vezes ao longo do dia, em curtos espaços de tempo, correspondente ao volume de água necessário de acordo com a necessidade da cultura.

O uso de temporizadores (timers) no acionamento pode ser eficaz na automação da irrigação (Alencar et al., 2007), mas depende de algum sistema indireto de estimativa da lâmina que deverá ser aplicada. Por outro lado, existem vários equipamentos que determinam o conteúdo da água no solo ou o potencial da água no solo, sendo alguns atualmente utilizados na automação do processo de acionamento de sistemas de irrigação. Contudo, a maioria deles utiliza materiais especificamente desenvolvidos, tornando-os caros e pouco disponíveis.

Queiroz (2007) considera que a pesquisa brasileira vem apontando soluções simples e de baixo custo para a automação tanto de sensores que monitoram variáveis ambientais, quanto da aplicação de água. Cruz et al. (2010) avaliaram sensores capacitivos desenvolvidos para monitorar o conteúdo de água do solo, mas apesar de apresentar resposta à variação do conteúdo de água do solo, os autores concluíram que o sensor apresenta baixo tempo de resposta, oscilando com o efeito causado pela temperatura ambiente. Silva et al. (2001) avaliaram um sistema automático visando o manejo da irrigação, baseado no tensiômetro de mercúrio. Instalado dentro de casa de vegetação, o sistema mostrou-se eficiente no manejo de água tanto para solo arenoso como argiloso. O sistema pode ser utilizado para manejo de sistemas de irrigação localizados, os quais mantêm altos níveis do conteúdo de água do solo, dentro das condições adequadas para o bom funcionamento do tensiômetro. No

entanto, os autores alertaram quanto à durabilidade do sistema e a certa dificuldade para montagem do mesmo.

De acordo com Klein (2001), a automação de sistemas de irrigação com sensores eletrônicos ou mesmo tensiômetros equipados com transdutores eletrônicos de pressão vem sendo utilizados. O inconveniente desses sistemas é que normalmente apresentam custo elevado, por envolverem sistemas eletrônicos de controle complicados, de difícil manejo e manutenção.

Atualmente vem sendo comercializado o equipamento Irrigas® que é simples, robusto, de baixo custo e informa ao agricultor o melhor momento de irrigar o solo (Calbo & Silva, 2001). Este aparelho, contudo, apresenta custo mais elevado na condição que permite o acionamento automático da irrigação. Em contrapartida, o dispositivo denominado “acionador simplificado para irrigação” apresenta baixo custo e vem se mostrando eficiente na automação da irrigação, possuindo, desta forma, potencial para uso na agricultura. O protótipo, desenvolvido pelo Prof. Dr. Leonardo Oliveira Medici (UFRRJ), teve seu pedido de patente realizado em 2007, junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual), recebendo o registro MU 8700270-1. Outra diferença entre o Irrigas® e o “acionador simplificado para irrigação” é que este último foi desenvolvido para manter automaticamente a tensão da água no solo entre 0 e -10 kPa, enquanto que o Irrigas® vem sendo comercializado em versões que informam ao agricultor quando a tensão ficou mais negativa que -10, -25 e -40 kPa. Segundo Marouelli et al. (2003), já foi demonstrado experimentalmente que o Irrigas® pode ser confeccionado com tensão crítica de -7 kPa.

Medici et al. (2010) estudaram o “acionador simplificado para irrigação” em substrato orgânico e comercial observando a eficiência deste na automação da irrigação. Os autores verificaram a possibilidade de regulagem da tensão dentro da faixa de -1 a -8 kPa, obtida com a variação do desnível do pressostato entre 0,3 e 0,9 m. Entretanto, não foram observadas diferenças entre a regulagem do acionador e a tensão no substrato na faixa de desnível do pressostato de 0,3 a 0,9 m, apesar da mesma, próximo ao sensor, ter-se mantido sempre dentro de faixa adequada para a maioria das culturas agrícolas, ou seja, inferior a -13,3 kPa.

2.4. A Cultura da Alface (*Lactuca Sativa* L)

A alface (*Lactuca sativa* L.) é conhecida pela população humana desde 500 a.C. e pertence à família *Asteraceae* (composta) como a escarola e o almeirão (EMBRAPA, 2011). Originou-se de espécies silvestres que ainda são encontradas em regiões de clima temperado, no sul da Europa e na Ásia Ocidental (Ryder & Witaker, 1976; Sanchez, 2007).

A planta é herbácea, delicada, com caule diminuto, ao qual se prendem as folhas. Estas são amplas e crescem em roseta, em volta do caule, podendo ser lisas ou crespas, formando ou não uma “cabeça”, com coloração em vários tons de verde ou roxa, conforme a cultivar” (Filgueira, 2003).

O sistema radicular da alface é do tipo pivotante, podendo atingir até 60 cm de profundidade quando em semeadura direta. É muito ramificado e superficial, explorando efetivamente apenas os primeiros 25 cm de solo quando a cultura é transplantada (Filgueira, 2003), faixa considerada de grande importância quando se faz uso de técnicas como a irrigação (Lima Junior, 2008).

Ela apresenta ciclo curto de produção e, dependendo do sistema de plantio (semeadura direta ou transplante de mudas), da época de plantio (verão ou inverno), da cultivar utilizada e do sistema de condução (campo ou protegido), o seu período de cultivo pode variar de 40 a 70 dias (Lima, 2007). A cultura apresenta seu ciclo dividido em três fases fenológicas, sendo elas: muda com 20 dias, roseta ou crescimento de 15 a 25 dias e amadurecimento e florescimento com 15 a 20 dias (Rocha, 2007). Palomino Montes (2008) divide em três os estádios de desenvolvimento da alface após o transplantio das mudas, assim denominados:

estádio 1 – do transplante até a planta cobrir 10% da superfície do vaso; estágio 2 – do final do primeiro estágio até a cobertura completa efetiva da superfície do vaso; estágio 3 – do final do segundo estágio até o máximo desenvolvimento vegetativo quando se faz a colheita da alface.

Os espaçamentos adotados no cultivo da alface variam entre 0,25 a 0,30 m por 0,25 a 0,30m entre linhas e plantas dependendo das características das cultivares (Resende et al., 2007), sendo o plantio realizado em canteiros ou em patamares. O solo rico em matéria orgânica, com boa disponibilidade de nutrientes e de textura média é o mais recomendado para o cultivo dessa hortaliça.

Comparada com outras folhosas, a alface é uma planta muito exigente em nutrientes sendo a absorção destes em pequenas quantidades, e o seu período de maior consumo no estágio final de desenvolvimento (Sanchez, 2007). Em geral, a absorção de N, P e K seguem a mesma tendência que a taxa de acúmulo de biomassa da cultura (Gomes, 2001).

Segundo o CEASA (2011), a classificação da alface comercial é dividida em grupos (crespa, lisa, americana, romana e mimosa) e classes de peso, e também classificada quanto ao sub-grupo (verde e roxa). Em relação ao mercado, dados do Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2011) apontam que a produção nacional de alface é de aproximadamente 525.602 t ano⁻¹, sendo apontada como a hortaliça mais consumida no Brasil e a folhosa mais conhecida no globo terrestre (Freitas, 2010). No estado do Rio de Janeiro a produção em 2010 foi de 27 t ha⁻¹ e no município de Seropédica de 30,78 t ha⁻¹ (Emater-Rio, 2011), isto ressalta a importância da cultura para o estado.

Não só pelo valor que alcança no mercado, gerando renda para agricultura familiar, a alface desempenha importante papel na dieta da população, por ser fonte de vitaminas A e C, além de conter vitaminas B1 e B2, cálcio e ferro. Além disso, na medicina popular é conhecida pelo seu efeito calmante (Fernandes et al., 2002; Smith, 2009).

As características climáticas afetam diretamente a produtividade da cultura, sendo muito sensível a fatores como intensidade de luz, fotoperíodo, concentração de CO₂ e, principalmente temperatura (Sakai, 2008). Geralmente, no verão, a maioria das cultivares de alface não se desenvolve bem devido ao calor intenso, dias longos e o excesso de chuva, condições que favorecem o pendoamento precoce, tornando as folhas leitosas e amargas, perdendo seu valor comercial (Filgueira, 2003). Entretanto, graças ao avanço nos estudos em melhoramento genético, já existem no mercado cultivares mais adaptadas aos cultivos no verão e, assim, atualmente em certas localidades do país, como a região serrana do estado do Rio de Janeiro, a produção da cultura procede-se durante o ano todo, possibilitando o retorno financeiro.

A alface é uma das hortaliças mais exigentes em água durante todo o seu ciclo, onde a quantidade e a qualidade da mesma influenciam na produtividade e na qualidade comercial. Assim, se torna necessária a reposição de água para a planta com um manejo adequado e eficiente.

De modo geral, em cultivo de hortaliças, variações no conteúdo de água no solo afetam o desenvolvimento vegetativo das mesmas, seja em excesso ou em déficit, no qual acarretará a diminuição da qualidade e produtividade das plantas (Marouelli et al., 1996; Lima et al., 2010).

Os estudos já realizados com manejo de irrigação em cultivo da alface demonstraram que com o acréscimo da quantidade de água aplicada, o peso da cultura e a sua produtividade aumentam linearmente até atingir o máximo de produção, a partir do qual há uma queda em função do excesso do conteúdo de água no solo (Filgueira, 2003; Lima Junior, 2008). De acordo com Flecha (2004) e Nobre et al. (2009), o excesso de água no solo apresenta correlações lineares negativas com a produtividade da cultura da alface. O efeito pode ser

identificado pela redução da altura da planta, do número de folhas, do diâmetro e do peso da parte aérea, além da redução do diâmetro do caule e da massa seca da raiz.

Andrade Júnior & Klar (1997), avaliando o efeito de diferentes níveis de irrigação em cultivo de alface, constataram que os dados relativos à eficiência do uso da água (EUA) apresentaram resposta linear decrescente, indicando que à medida que aumenta os níveis de irrigação ocorre uma diminuição na EUA, logo no comportamento produtivo da cultura. Portanto, o desenvolvimento vegetativo da alface é influenciado pelo conteúdo da água presente no solo. Assim Andrade Júnior & Klar (1997) e Santos & Pereira (2004) recomendam que, para um bom desenvolvimento da cultura é necessária uma aplicação de água com maior frequência e menor intensidade ao longo de seu ciclo.

Como em outras culturas, a alface exige uma quantidade diferenciada de água no solo. Vários trabalhos têm mostrado ser a tensão de água no solo indicada para mostrar a irrigação necessária a ser aplicada na cultura e não apenas para determinar o momento de irrigar (Figueroa, 1998; Santos & Pereira, 2004; Vilas Boas et al., 2007). Santos & Pereira (2004) avaliaram o efeito de diferentes tensões da água no solo sobre o comportamento produtivo da alface tipo americana em ambiente protegido e, de posse dos resultados, concluíram que as irrigações devem ser realizadas quando as tensões estiverem em torno de -15 kPa, pois há uma tendência em obter-se plantas mais altas, com maior peso de matéria fresca comercial, folhas mais tenras e uma melhor eficiência no uso da água sob esta tensão. Além disso, com o aumento da tensão da água no solo a altura de plantas e o peso da matéria fresca da parte comercial reduziram-se linearmente no intervalo entre -15 kPa e -89 kPa.

Marouelli et al. (2010) recomendam que para a cultura da alface, em sistema por gotejamento no campo, a tensão da água no solo seja de -15 kPa quando usa o Irrigas® para o monitoramento do conteúdo de água do solo. Assim como o Irrigas®, o “acionador simplificado para irrigação” foi desenvolvido para manter automaticamente a tensão da água no solo na faixa entre 0 e -10 kPa. Em comparação com o primeiro, o nível de água aplicada para irrigação será menor e assim se torna interessante uma investigação sobre a resposta da cultura da alface irrigada com este dispositivo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido nas instalações do SIPA (Sistema Integrado de Produção Agroecológica), conhecido como Fazendinha Agroecológica Km 47. A área está localizada no município de Seropédica-RJ (latitude 22°48'00''S; longitude 43°41'00''W; altitude de 33,0 m) onde, segundo Carvalho et al. (2006), o clima é do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen.

Foram realizados experimentos em casa de vegetação, no período de 01/11/2010 a 08/06/2011, e em campo, no período compreendido entre 18/05 a 01/07/2011. Em ambos os casos, o sistema de irrigação foi abastecido por um reservatório de 1.000 L, instalado a uma altura do solo de, aproximadamente, 5,0 m, possibilitando a distribuição de água por gravidade, na pressão adequada ao bom funcionamento do sistema de gotejamento. Durante o período experimental, o abastecimento de água ao reservatório foi realizado de forma automática, por meio de um sensor de nível instalado na caixa, mantendo, dessa forma, o suprimento de água ao sistema de irrigação automático.

3.1. Acionador Automático para Irrigação

O dispositivo objeto deste estudo, “acionador simplificado para irrigação”, caracteriza-se por ser de fácil construção e por apresentar baixo custo, tendo em vista a possibilidade de utilização de utensílios domésticos fabricados em larga escala, e de fácil aquisição no mercado (Medici et al. 2010). De acordo com a Figura 1, o acionador é composto por uma cápsula cerâmica ou vela de filtragem residencial de água (1) conectada por um tubo flexível (2) a um pressostato de máquina de lavar roupa (3). O procedimento de montagem consiste na instalação da cápsula (1) no substrato de cultivo, a um desnível (h) do pressostato, e no preenchimento da tubulação com água. Em decorrência da evapotranspiração do cultivo, o conteúdo de água no substrato diminui, provocando a formação de uma tensão dentro da cápsula que se transmite pelo tubo flexível (2) até o pressostato (3). Com esta tensão, o diafragma do pressostato aciona um comutador que estabelece a passagem de corrente elétrica através de fios elétricos (5), permitindo o acionamento de uma bomba hidráulica ou a abertura de uma válvula solenóide (4), e dessa forma, a passagem de água da tubulação de derivação (6) para a linha de emissores (7).

A água fornecida ao solo umedecerá o substrato e entrará na cápsula (1) fazendo com que a tensão na cápsula seja aliviada e se estabeleça uma pressão positiva no pressostato (3), o qual então irá cortar a corrente de alimentação do sistema de irrigação (bomba ou válvula solenóide). Assim, o próprio potencial matricial da água do substrato das plantas irá comandar o processo de ligar e desligar o sistema de irrigação evitando aplicação deficitária ou em excesso. Teoricamente, a tensão de acionamento do equipamento será igual, em módulo, ao desnível de coluna de água entre a cápsula cerâmica e o pressostato. Portanto, a variação deste desnível representa a possibilidade de ajuste no funcionamento do dispositivo. A Figura 2 apresenta os componentes do acionador.

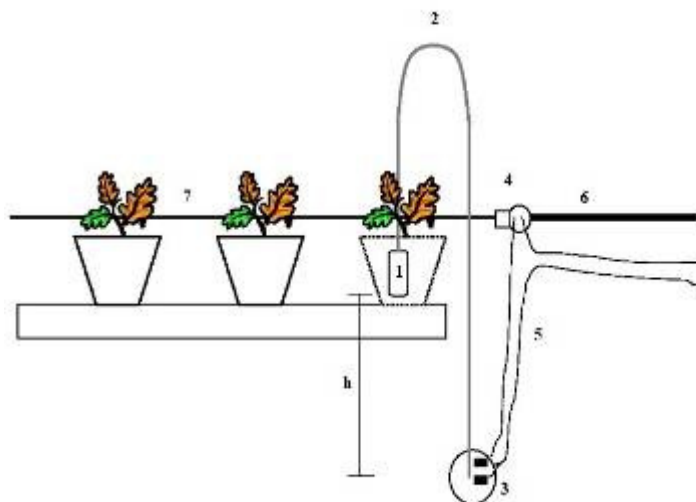


Figura 1. Esquema do acionador automático para irrigação.

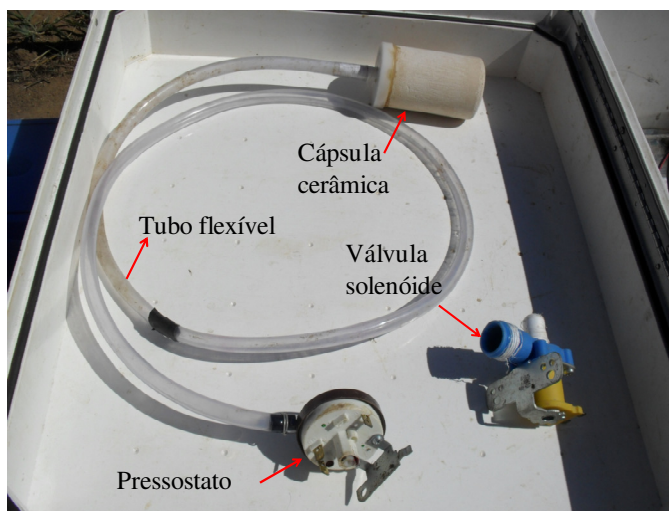


Figura 2. Componentes para a confecção do acionador.

3.2. Experimento em Casa de Vegetação

Em casa de vegetação foram realizados dois experimentos, sendo o primeiro conduzido durante quatro meses com os vasos contendo apenas dois diferentes tipos de solo. Nesta fase, pretendeu-se monitorar e avaliar o funcionamento do acionador em cada tratamento. Posteriormente, utilizando as mesmas condições empregadas no primeiro experimento, foi realizado o plantio da cultura alface (*Lactuca sativa* L.).

Os experimentos em casa de vegetação foram desenvolvidos em um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), num esquema fatorial 2 x 2 x 2, sendo os fatores: (a) 2 desníveis do pressostato (0,30 m e 0,90 m); (b) 2 tipos de textura de solo (argilosa e arenosa) e (c) 2 volumes de vaso (2,76 L e 4,81 L). As dimensões dos vasos utilizados estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões dos vasos utilizados nos experimentos em casa de vegetação.

Volume de vaso (L)	Diâmetro maior (cm)	Diâmetro menor (cm)	Altura (cm)	Área da base maior (cm ²)	Área da base menor (cm ²)
4,81	25,0	15,0	15,0	490,63	176,63
2,76	21,0	12,0	12,6	346,19	113,04

Esse esquema resultou em 8 tratamentos, e utilizando 3 repetições, totalizaram 24 vasos. A Figura 3 apresenta um esquema de montagem do experimento nesta fase.

Para todas as combinações, a cápsula cerâmica foi instalada no fundo do vaso e na posição vertical, com distância de aproximadamente 0,04 m do fundo. Teoricamente, a tensão de acionamento do equipamento foi igual, em módulo, ao desnível do pressostato e, desta forma, foram obtidas tensões de acionamento que variaram na faixa de -4,0 e -8,0 kPa.

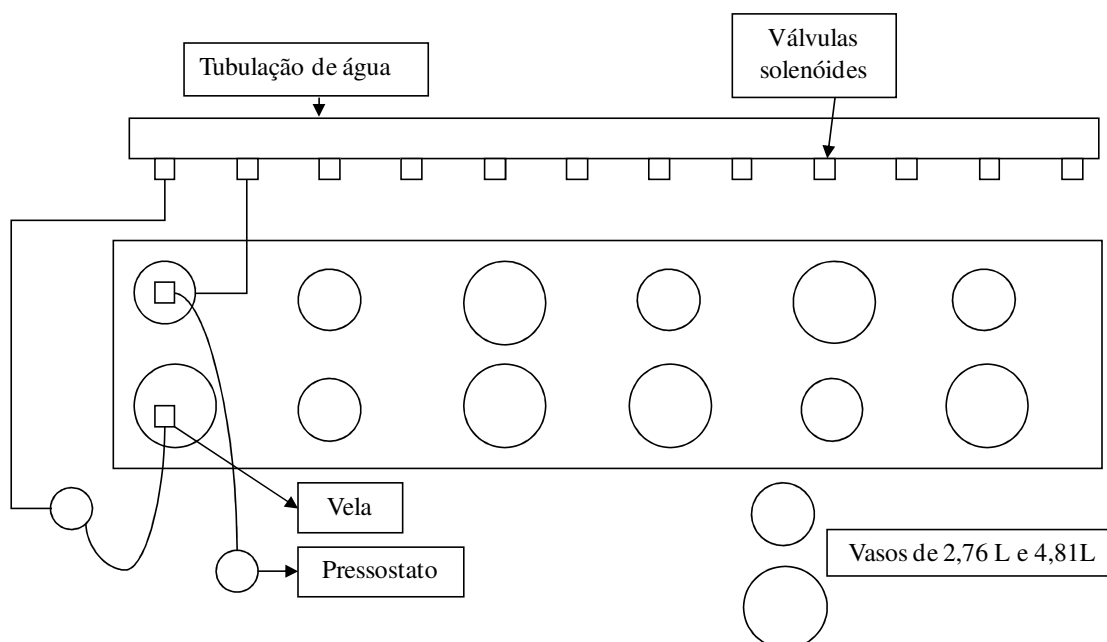


Figura 3. Esquema experimental em casa de vegetação.

Os acionadores foram ligados em paralelo à rede elétrica, possibilitando o acionamento simultâneo das válvulas solenóides, atendendo, dessa forma, a demanda evapotranspirométrica real dos 24 vasos.

A aplicação de água foi realizada com o sistema por gotejamento, com 2 emissores emissores autocompensantes externos (modelo Katif – John Deere Water) por vaso, com vazão nominal de 2,8 L h⁻¹ e a cápsula cerâmica do “acionador automático para irrigação” instalada entre eles, como recomendado por Médici et al. (2010).

3.3. Caracterização e Preparo dos Solos

Para esta etapa, foram utilizadas amostras de solo provenientes do horizonte A de um Planossolo Háptico (textura arenosa) e do horizonte B de um Argissolo Vermelho Amarelo (textura argilosa), coletados no campus da UFRRJ. Desta área, também foram retiradas amostras indeformadas em anéis volumétricos para a caracterização da curva de retenção de

água no solo, sendo as mesmas encaminhadas para o Laboratório de Solos do Campus Leonel Miranda/UFRRJ (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado da análise de retenção de água no solo (umidade em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Tipo de solo	Potencial matricial (kPa)							
	0	10	30	100	500	1000	1500	
Argissolo	(0-15 cm)	0,402	0,137	0,125	0,089	0,083	0,077	0,073
	(15-30 cm)	0,398	0,124	0,104	0,083	0,075	0,071	0,069
Planossolo	(0-15 cm)	0,343	0,072	0,054	0,035	0,029	0,027	0,025
	(15-30 cm)	0,352	0,074	0,055	0,039	0,035	0,032	0,028

Os valores apresentados na Tabela 2 foram ajustados ao modelo proposto por Van Genuchten (1980) utilizando o software “Soil Water Retention Curve, versão Beta 3.0” SWRC (Dourado Neto et al., 2000). As equações abaixo apresentam os modelos ajustados para o Argissolo (eq. 1 e 2) e Planossolo (eq. 3 e 4), para as duas diferentes profundidades.

$$\theta_{0-15} = 0,070 + \frac{0,332}{\left[1 + (3,805 \cdot \psi_m)^{2,2887}\right]^{0,1288}} \quad (r^2 = 0,996) \quad (1)$$

$$\theta_{15-30} = 0,080 + \frac{0,318}{\left[1 + (2,603 \cdot \psi_m)^{2,2711}\right]^{0,1831}} \quad (r^2 = 0,999) \quad (2)$$

$$\theta_{0-15} = 0,041 + \frac{0,302}{\left[1 + (0,0026 \cdot \psi_m)^{0,3591}\right]^{5,6141}} \quad (r^2 = 0,999) \quad (3)$$

$$\theta_{15-30} = 0,034 + \frac{0,318}{\left[1 + (2,3966 \cdot \psi_m)^{2,3230}\right]^{0,1839}} \quad (r^2 = 0,999) \quad (4)$$

em que:

θ = conteúdo da água do solo no solo, em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; e

ψ_m = potencial matricial, em kPa.

Amostras deformadas, uma de cada perfil de solo, foram retiradas para determinar textura e para análise química (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Textura ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) dos solos utilizados no trabalho.

Tipo de Solo	Argila Natural	Argila Total	Areia Total	Areia Fina	Silte
Planossolo	40	60	830	220	110
Argissolo	40	490	350	60	160

Tabela 4. Análise química dos solos utilizados no trabalho.

Tipo de Solo	Prof (cm)	pH H_2O	Al	H+Al	Ca+Mg	Ca	Mg	Na	P	K	C_{org}	MO
			----- $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ -----							mg dm^{-3}		-----%-----
Planossolo	0-20	5,8	0	1,5	4,5	2	2,2	1,2	12	62	1,4	2,4
Argissolo	0-20	5,1	0,2	2	2,5	1	1,1	1	10	44	0,9	1,6

As amostras de solo utilizadas neste experimento foram secas à sombra, destorroadas e peneiradas em peneira com malha de 2 mm (TFSA), para posterior enchimento dos vasos.

De posse dos resultados da análise química dos solos (Tabela 4) foi calculada a dose de adubação e composição química da vermicompostagem (Oliveira, 2011), sendo utilizada a dosagem de 0,25 kg de vermicompostagem por planta. A vermicompostagem utilizada foi adquirida solarizada e em sacos de 5,0 kg no SIPA. A adubação foi feita em 13/04/2011, 20 dias antes do transplantio das mudas.

Em cada vaso foi instalado uma sonda de TDR e assim, o conteúdo da água no solo do solo foi determinada a cada 2 dias, possibilitando o monitoramento do dispositivo automático de aplicação de água na irrigação. Neste trabalho foi utilizado o modelo TDR100 da Campbell Scientific (Logan – UT, EUA). Apesar de Topp (1980) ter proposto um modelo cúbico para estimar o conteúdo da água no solo com dados de constante dielétrica, resultados mais precisos são obtidos a partir de calibrações para condições locais de solo. Assim, determinou-se a equação de calibração ($\theta \times ka$) para os dois solos estudados. Para isso, amostras de solos foram condicionadas em tubos de PVC DN 100 mm e em cada um deles, foi instalada uma sonda TDR. Após saturação dos mesmos, os tubos foram submetidos à secagem natural e diariamente era realizada a leitura da ka e determinado o conteúdo de água nos vasos por meio do balanço de massa diário.

No interior da casa de vegetação foi instalado um termohigrógrafo, a fim de permitir o monitoramento das condições meteorológicas a partir de leituras de temperatura do ar e umidade relativa registradas a cada hora.

3.3.1. Preparo e cultivo das mudas

As sementes da alface lisa cultivar Regina, marca comercial Feltrin, foram semeadas em bandeja de poliestireno expandido, em condições de estufa no dia 13/04/2011. As mudas foram desenvolvidas em substrato orgânico (SO) constituído por vermicomposto, fino de carvão vegetal e 2% de torta de mamona (TM). A Tabela 5 apresenta o resultado da análise química deste substrato (Oliveira, 2011). Cada vaso do experimento recebeu uma muda de alface que foram transplantadas aos 21 dias após semeadura e uma adição de volume de 50 mL de água para uniformizar as condições de umidade do substrato que acompanhou a muda até o vaso, para evitar reposição de mudas no experimento.

Tabela 5. Resultado da análise química do substrato orgânico utilizado na produção de mudas (Oliveira, 2010).

Substrato	CE	pH	Ca	Mg	P	K	N
	(dS m ⁻¹)		----- (g kg ⁻¹) -----				
SO+2%TM	1,41	6,86	14,35	5,75	4,56	2,63	1,85

3.3.2. Colheita e análise de produção

A colheita foi feita aos 35 dias após o transplantio (DAT). As plantas foram colhidas manualmente, uma a uma, e embaladas em sacos plásticos para a análise de produção. As variáveis de produção foram avaliadas em todas as plantas do experimento, sendo elas: massa fresca, massa seca, diâmetro da cabeça, número de folhas e área foliar (Santos & Pereira, 2004; Lima Júnior, 2008).

As massas fresca e seca de cada parte da planta foram determinadas em balança analítica. A área foliar (cm²) foi determinada em integrador de área foliar, modelo LI-3100C Área Meter LICOR. O diâmetro foi mensurado com fita métrica de precisão igual a 0,005 m.

Após as mensurações, cada material foi embalado em sacos de papel e conduzido à estufa de ventilação forçada a 65 °C, por 48 horas, na Estação Experimental da Embrapa Agrobiologia, denominada Terraço.

3.3.3. Análises estatísticas

Para a contabilização do volume de água aplicado em cada vaso foi instalado, ao final de cada linha de irrigação, um terceiro emissor de mesma vazão, sendo o volume de água por ele aplicado coletado por meio de um recipiente plástico. Diariamente, pela manhã, era contabilizado em todas as parcelas experimentais, com o auxílio de uma proveta graduada, o volume de água aplicado pelos gotejadores em cada tratamento estudado.

As lâminas aplicadas monitoradas nos experimentos em casa de vegetação, e as variáveis de produção estudadas sobre a cultura foram submetidas à análise de variância (anova) e quando houve significância para interação entre os fatores, foi realizada a análise com desdobramento dos graus de liberdade pelo teste F de Snedecor. Para a análise estatística foi utilizado o programa computacional SAS (Statistical Analysis System).

3.4. Experimento em Campo

3.4.1. Caracterização e preparo dos solos

O experimento de campo foi conduzido em uma área experimental cujo solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (Almeida et al., 2003). Antes do preparo inicial, procedeu-se coleta de amostras de solo na área experimental, para a análise química (Tabela 6), nas camadas de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, que representam a profundidade efetiva do sistema radicular da alfaca. Foram coletadas também amostras para determinação da textura do solo (Tabela 7) e amostras indeformadas para densidade do solo, sendo obtidos os valores de 1,41 e 1,45 g cm⁻³, para as profundidades de 0,1 m e 0,2 m, respectivamente.

Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m para a determinação da curva de retenção de água no solo, utilizando a mesma metodologia apresentada no primeiro experimento. As equações 5 e 6 representam, respectivamente, as curvas de retenção de água no solo referentes às camadas supracitadas.

$$\theta_{0-10} = 0,113 + \frac{0,939}{\left[1 + (1,779 \cdot \psi_m)^{3,2654}\right]^{0,1873}} \quad (r^2 = 0,941) \quad (5)$$

$$\theta_{10-20} = 0,133 + \frac{0,910}{\left[1 + (1,185 \cdot \psi_m)^{3,9664}\right]^{0,1754}} \quad (r^2 = 0,954) \quad (6)$$

Tabela 6. Análise química do Argissolo Vermelho-Amarelo em duas profundidades.

Prof. (cm)	pH H ₂ O	P ----(mg dm ⁻³)---	K	Ca	Mg	Al	H + Al	Na	C
		----- (cmol _c dm ⁻³) -----			----- (cmol _c dm ⁻³) -----				(%)
0 - 10	7,1	144	117	3,6	1,0	0,0	1,6	0,06	1,17
10 - 20	7,0	153	133	4,0	1,0	0,2	1,4	0,06	1,08
Prof. (cm)	MO (g dm ⁻³)	S.B.	T	*t	**m	V	Fe	Cu	Zn
		---- (cmol _c dm ⁻³) ----			----- (cmol _c dm ⁻³) -----		(mg dm ⁻³)		
0 - 10	20,2	5,0	6,6	5,0	0	76	34,0	9,0	21,6
10 - 20	18,6	5,4	6,8	5,6	4	79	34,6	15,0	25,2

*t - CTC efetiva; **m - saturação por Al

Tabela 7. Textura do Argissolo Vermelho-Amarelo em duas profundidades.

Prof. (cm)	Argila	----- %-----			
		Areia Total	Areia fina	Areia Grossa	Silte
0 - 10	18	68	15	53	14
10 - 20	18	66	15	51	16

O solo foi preparado com uma aração e duas gradagens de nivelamento e, em seguida, com auxílio de uma encanteiradora, foram levantados os canteiros com 0,2 m de altura, 1,0 m de largura e 3,0 m de comprimento. A partir da análise química do solo, sete dias antes do transplântio, foi feita adubação orgânica utilizando esterco bovino curtido, proveniente da bovinocultura do SIPA, na dosagem de 3 kg m⁻², que foi distribuído uniformemente nos canteiros. Aos 20 dias após o transplântio (DAT) procedeu-se uma adubação de cobertura para reposição de nitrogênio (N), com uma dosagem de 50 kg ha⁻¹ N de torta de mamona.

3.4.2. Preparo e cultivo das mudas

O transplântio da cultura foi feito aos 20 dias após a semeadura (DAS), manualmente, quando as mudas apresentavam sete folhas, em média. Foram utilizadas sementes de alface lisa da cultivar Regina que produz folhas lisas, delicadas, de coloração verde amarelada, aspecto amanteigado, podendo formar ou não uma cabeça compacta (Ferreira et al., 2010).

As mudas foram produzidas em casa de vegetação, em bandejas de isopor com 200 células desenvolvidas em substrato orgânico, o mesmo utilizado para as mudas do experimento em casa de vegetação, constituído por vermicomposto, fino de carvão vegetal e torta de mamona fabricado no próprio SIPA onde foram cultivadas (Oliveira, 2011). No campo as mesmas foram espaçadas 0,25 m entre linhas e plantas e durante as três primeiras semanas foram realizadas capinas manuais na área experimental para controlar algumas ervas invasoras e duas aplicações de Dipel (*Bacillus thuringiensis*) a fim de controlar a lagarta rosca (*Diaphania hyalinata*) durante o estágio inicial da cultura.

3.4.3. Tratamentos

O experimento em campo foi desenvolvido em um delineamento experimental de blocos ao acaso (DBC), num esquema fatorial 2 x 2, sendo os fatores: (a) 2 desníveis do pressostato (0,30 m e 0,90 m) e (b) 2 profundidades de instalação da cápsula cerâmica (0,10 m e 0,20 m), resultando em 4 tratamentos com 6 blocos, totalizando 24 parcelas experimentais. A Figura 4 apresenta a instalação do acionador na área experimental no campo e a Figura 5 o croqui da área.



Figura 4. Instalação do acionador em campo.

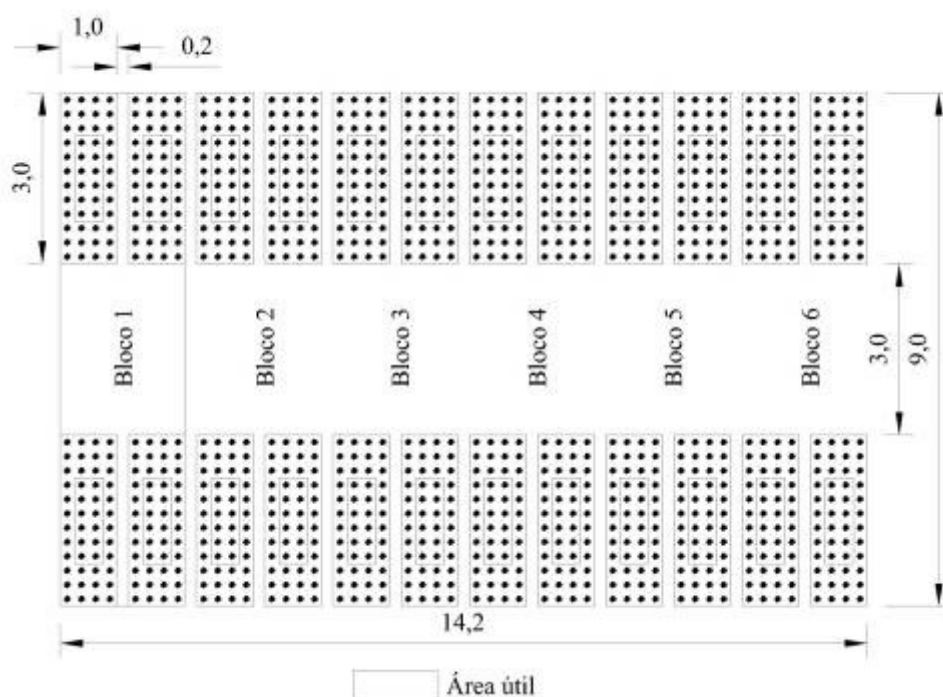


Figura 5. Croqui da área experimental no campo (dimensões em metros).

Para evitar possíveis problemas no acionador, acarretando no impedimento do fornecimento de água ao experimento, foram instalados, nos blocos 1 e 2, dois acionadores em cada tratamento, permitindo o fornecimento de água aos demais blocos, no seu respectivo tratamento (Figura 6).

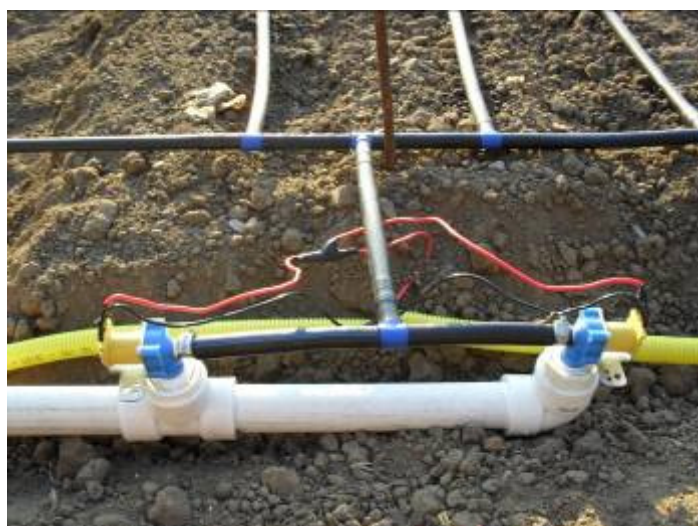
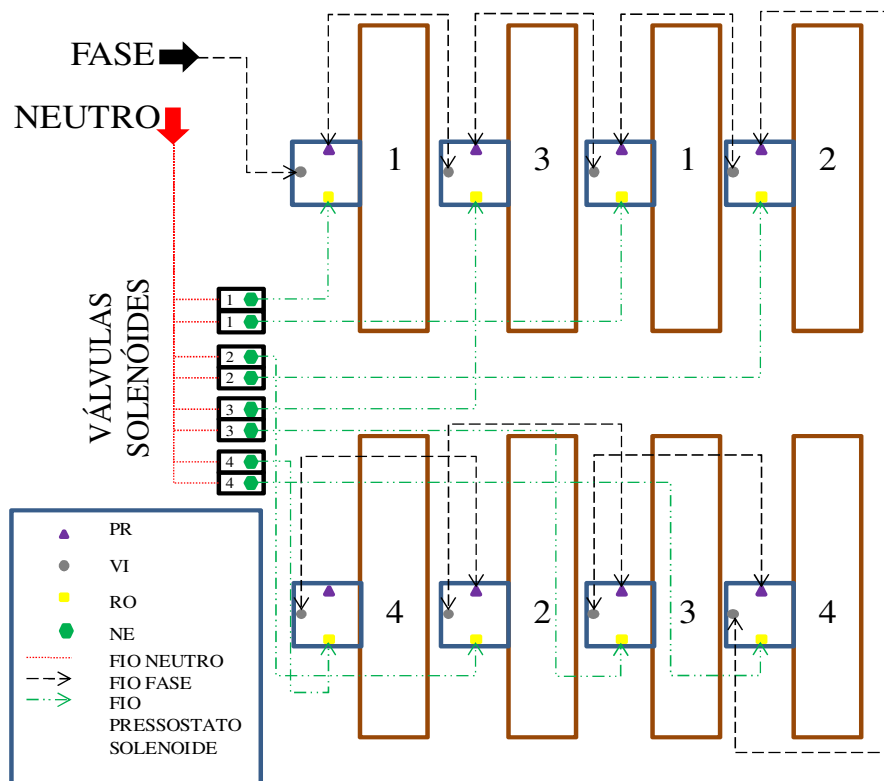


Figura 6. Instalação das válvulas solenoides no início da linha de derivação.

Ao contrário do experimento em casa de vegetação, os acionadores foram ligados em série (Figura 7), possibilitando o acionamento individual de cada tratamento. Esse procedimento foi adotado a fim de se ter melhor uniformidade na distribuição de água do sistema de irrigação em cada tratamento, tendo em vista o número de gotejadores por tratamento e a capacidade do reservatório.

3.4.4. Sistema de irrigação

A aplicação de água foi realizada com o sistema por gotejamento (vazão nominal de $2,8 \text{ L h}^{-1}$) com duas linhas laterais por canteiro. Após a realização de testes em campo foram determinadas as vazões de $2,8 \text{ L h}^{-1}$; $3,13 \text{ L h}^{-1}$; $3,15 \text{ L h}^{-1}$ e $3,42 \text{ L h}^{-1}$ para o tratamento 1 (profundidade da cápsula cerâmica a 0,1 m e desnível do pressostato a 0,3 m), 2 (profundidade da cápsula cerâmica a 0,1 m e desnível do pressostato a 0,9 m), 3 (profundidade da cápsula cerâmica a 0,2 m e desnível do pressostato a 0,3 m) e 4 (profundidade da cápsula cerâmica a 0,2 m e desnível do pressostato a 0,9 m), respectivamente. Por um período de 10 dias, antes do início da aplicação de água pelo sistema de gotejamento, a área foi irrigada por aspersão, a fim de garantir o estabelecimento das mudas de alface no campo, sendo utilizados 4 aspersores setoriais.



* Os números em cada canteiro correspondem aos tratamentos.

Figura 7. Esquema da instalação elétrica do dispositivo em campo.

Para monitorar o volume de água aplicado em cada tratamento foi instalado, em cada bloco experimental, um hidrômetro modelo Alpha mnf (FAE Tecnologia – Fortaleza – CE) de vazão nominal de $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Figura 8) de capacidade de registro compatível aos volumes aplicados por irrigação, cujas leituras eram efetuadas diariamente pela manhã.

Além disso, o conteúdo da água no solo foi também monitorado com o uso da TDR (Souza & Matsura, 2004), em intervalos de dois dias. Para isso foram instaladas horizontalmente oito sondas, duas em cada tratamento, nas profundidades 0,10 e 0,20 m, correspondentes à instalação das cápsulas cerâmicas. A exemplo do primeiro experimento foi necessária a calibração desta técnica para a condição local deste solo, sendo construída, para isso, uma bacia que após saturação, permitiu a coleta de informações do conteúdo de água do solo (método gravimétrico) e constante dielétrica (TDR) durante um período de 40 dias. Nesta bacia, foram instaladas sondas nas mesmas profundidades daquelas instaladas no experimento. De posse das constantes dielétricas (k_a) obtidas a partir da bacia de calibração e

da determinação do conteúdo de água correspondente, procedeu-se a análise de regressão ($k_a \times \theta$) a fim de obter as curvas de calibração da TDR para as profundidades 0,10 m e 0,20 m.



Figura 8. Hidrômetro utilizado no experimento.

3.5. Colheita

A colheita foi realizada manualmente aos 44 DAT, cortando a cultura rente ao solo, sendo colhida, em cada parcela, as 12 plantas centrais (Figura 5), sendo posteriormente transportadas ao Laboratório de Processamento do SIPA a fim de avaliar as variáveis de produção. Com exceção da massa seca, as medidas das variáveis de produção estudadas foram realizadas em todas as plantas da área útil, logo após a colheita.

Foi utilizada uma balança de precisão de 0,01g para massa fresca e uma fita métrica para mensuração do diâmetro. O número de folhas foi determinado destacando-as das plantas e apenas as que apresentavam tamanho maior que 0,03 m. A área foliar de cada planta foi obtida com o uso do integrador fotoelétrico modelo LI-3100C Area Meter LICOR.

Após a determinação de todas as variáveis, uma amostra de 300g de cada parcela foi levada em sacos de papel para uma estufa de ventilação forçada a 65 °C por 72h e posteriormente pesadas em uma balança de precisão de 0,01g para a obtenção da massa seca.

3.6. Eficiência no Uso da Água

A eficiência do uso da água (EUA) pela a cultura da alface foi obtida pela razão da massa fresca total da alface produzida pela lâmina aplicada em cada tratamento, conforme a equação 7:

$$EUA = \frac{P}{I + Pe} \quad (7)$$

em que:

P = produtividade da cultura, em kg ha^{-1} ;

I = lâmina aplicada pela irrigação, em mm; e

Pe = precipitação efetiva, em mm.

A partir das leituras diárias registradas pelos hidrômetros foi possível obter os volumes de água aplicados diariamente, em cada tratamento. A partir desses volumes, foram estimadas as lâminas aplicadas (I), considerando a área irrigada pelo sistema de gotejamento. Assim, com base em acompanhamento visual em campo, considerou-se uma porcentagem da área

sombreada (PAS) variável ao longo do ciclo da cultura, adotando-se os valores de 0,30; 0,50 e 1,0, respectivamente, para os períodos de 10 a 16 DAT, 17 a 27 DAT e 18 a 44 DAT.

A precipitação efetiva (P_e) foi considerada como sendo a fração da lâmina precipitada (mm), correspondente à variação do conteúdo de água do solo, e que, conseqüentemente, ocasionou a paralisação do acionamento do sistema de irrigação.

3.7. Estimativa da evapotranspiração

A evapotranspiração de referência (E_{To}) diária durante o período de cultivo foi estimada pelo método de Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998) com base em dados climáticos da Estação Agrometeorológica do SIPA, localizada nas proximidades da área experimental.

3.8. Análise Estatística

Para a análise estatística foi utilizado o programa computacional SAS (Statistical Analysis System), cujas variáveis de produção estudadas sobre a cultura foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e quando houve significância para interação entre os fatores, foi feita a análise com desdobramento dos graus de liberdade pelo teste F de Snedecor.

3.9. Avaliação de Custo do Dispositivo

Visando à avaliação de custo do sistema, foram contabilizadas todas as despesas necessárias para a construção dos protótipos, bem como uma estimativa do consumo de energia utilizada para o acionamento do sistema.

O cálculo da energia elétrica consumida foi obtido considerando o consumo de energia das válvulas solenóides e da bomba submersa (modelo MAX 127 V) que abastecia o reservatório. Para isso, foram consideradas as suas potências (340 W e 5 W, respectivamente) e seus respectivos períodos de funcionamento, além do valor do kWh cobrado pela prestadora de energia elétrica (Light Serviços de Eletricidade S.A.), que foi de R\$ 0,34.

O período de funcionamento das válvulas, para cada tratamento, foi estimado a partir dos volumes registrados nos hidrômetros, tomando como referência a vazão dos gotejadores em cada parcela experimental. Para a bomba submersa, o tempo de funcionamento foi estimado em função do volume de água necessário para repor o reservatório, ao longo de todo o experimento. Finalmente, o cálculo do consumo de energia da bomba foi realizado considerando, ainda, a altura manométrica da instalação e os dados obtidos de sua curva característica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudo do Funcionamento do Acionador em Casa de Vegetação

4.1.1. Calibração da TDR

A Figura 9 apresenta as curvas de calibração do conteúdo de água (θ) em função da constante dielétrica do solo (k_a), para os dois tipos de solo utilizados no experimento em casa de vegetação.

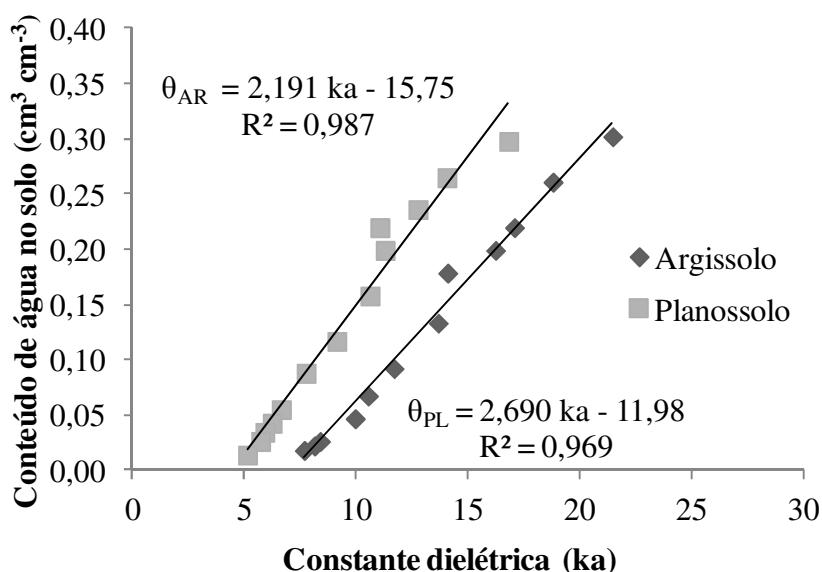


Figura 9. Curvas de calibração para o Argissolo Vermelho Amarelo (ARG) e Planossolo Háplico (PL).

Para os dois solos, a constante dielétrica (k_a) apresentou estreita relação com os valores do conteúdo de água (θ). Os coeficientes de determinação para os modelos estudados foram altos, indicando adequado ajuste dos modelos testados para a faixa do conteúdo de água no solo observada.

As equações apresentadas na Figura 9 foram usadas no monitoramento do conteúdo de água do solo, a partir da leitura das sondas instaladas nos vasos. Assim, foi possível verificar as diferenças do conteúdo de água entre os tratamentos provocados pelos desníveis da cápsula cerâmica do acionador até o pressostato. O conhecimento do conteúdo de água no solo submetido a maiores tensões de acionamento permite inferir sobre o funcionamento e a possibilidade de regulagem do dispositivo para trabalhar com tensões críticas variáveis, permitindo sua adaptabilidade a diferentes culturas e ao longo do ciclo das mesmas.

4.1.2. Monitoramento meteorológico no interior da casa de vegetação

A Figura 10 apresenta a variação dos elementos meteorológicos no interior da casa de vegetação, no período de 14 de dezembro de 2010 a 03 de março de 2011. Este período se refere ao experimento sem a cultura da alface. A maior temperatura máxima registrada no período foi de 52,1 °C, em 29 de janeiro. Nesse dia, registrou-se o menor valor de umidade relativa mínima do ar (18,1%). Em média, foram observados valores de 44,4 °C, 23,1 °C, 88,7% e 32,9%, respectivamente, para temperaturas máxima e mínima e umidades relativas máxima e mínima.

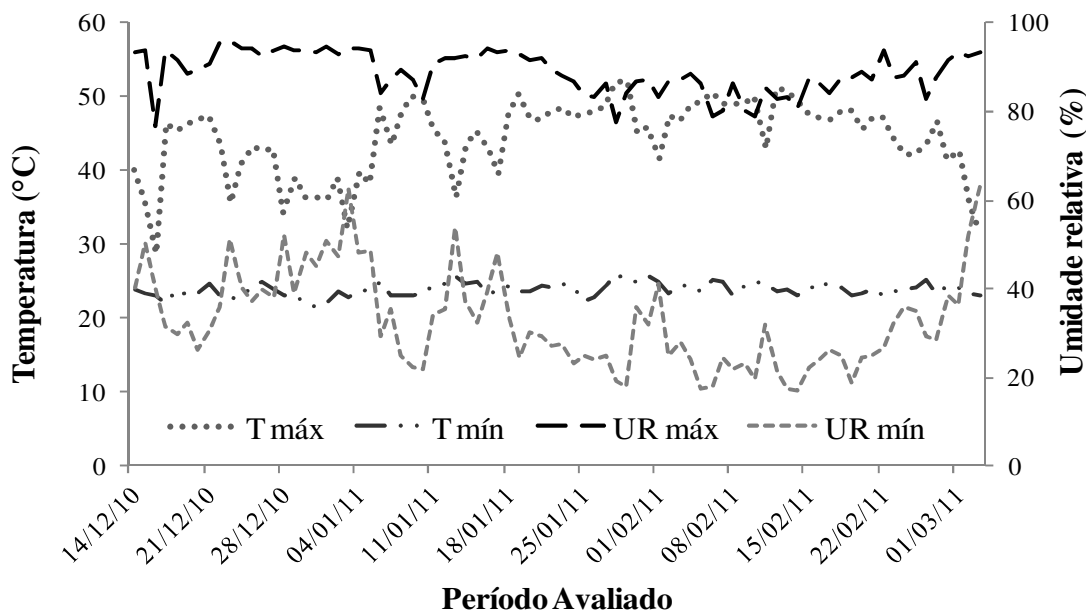


Figura 10. Variações de umidade relativa do ar e oscilações de temperatura registradas pelo termohigrógrafo no interior da casa de vegetação.

Costa et al. (2006) observaram que flutuações de temperatura do ar em casa de vegetação estão sempre associadas às da umidade relativa do ar, ou seja, quando a umidade aumenta ocorre ligeira redução na temperatura, como também observado nesse experimento.

Ao término deste experimento constatou-se a influência do aumento da taxa de evaporação nas características de acionamento do dispositivo, pois em dias com elevadas temperaturas e umidade relativa baixa, o dispositivo era acionado com mais frequência e a lâmina de aplicação de irrigação maior.

Na segunda etapa do trabalho, com cultivo de alface, realizado de 04/05 a 08/06, as temperaturas médias do ar máxima e mínima durante todo experimento foram $27,51^{\circ}\text{C} \pm 7,44^{\circ}\text{C}$ e $18,32^{\circ}\text{C} \pm 4,97^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A temperatura do ar na casa de vegetação manteve-se dentro de limites favoráveis à cultura durante todo o período de cultivo (temperatura mínima de 6°C e máxima igual a 30°C). Durante esse período, tanto as temperaturas máximas quanto as mínimas verificadas não foram prejudiciais ao desenvolvimento da cultura, pois somente em alguns dias estas ficaram acima do limite prejudicial ao crescimento e desenvolvimento da alface. Analisando as curvas de temperatura na Figura 11 é possível observar que houve duas variações expressivas de temperatura máxima durante a realização do experimento entre os dias 04 a 09/05/2011 (estágio 1) e 25 a 29/05/2011 (estágio 2).

Os valores médios diários de umidade relativa máxima e mínima foram, respectivamente, $91,95\% \pm 2,56\%$ e $63,43\% \pm 7,57\%$ (Figura 11). Segundo Lima Júnior (2008), a umidade relativa do ar necessária ao bom desenvolvimento da alface está na faixa de 60 a 80%. Assim, na maior parte do período de cultivo, os valores observados ficaram dentro do intervalo recomendado para o bom desenvolvimento da cultura da alface. Durante a noite, a umidade relativa aumentou com a diminuição da temperatura do ar, chegando a atingir 93,9% aos 25 DAT. Neste dia, a temperatura mínima foi $18,50^{\circ}\text{C}$.

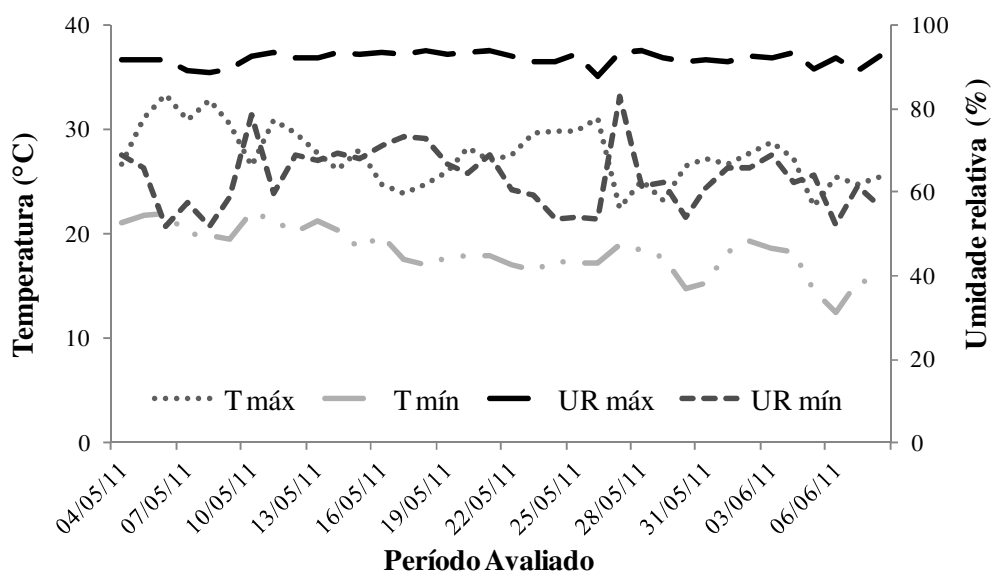


Figura 11. Monitoramento da temperatura registrada no experimento em casa de vegetação com planta cultivada.

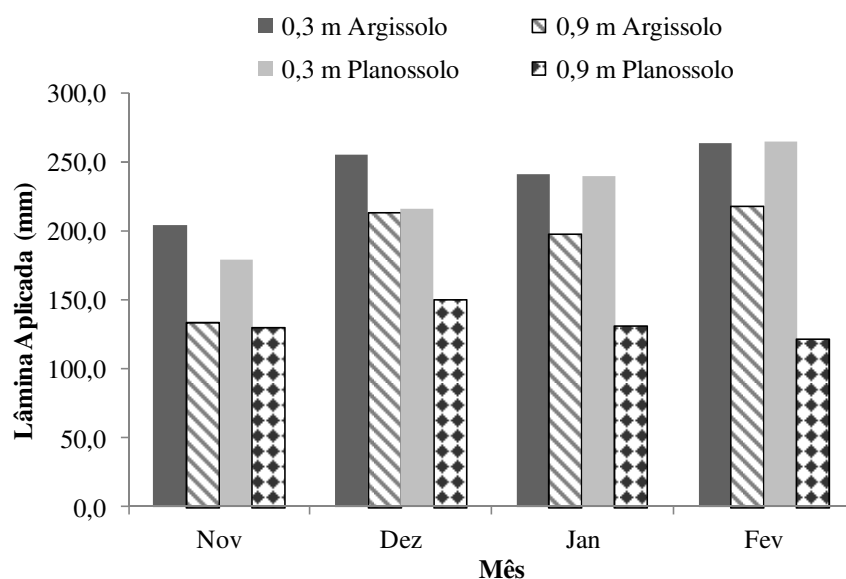
Pode-se observar também pela Figura 11 que houve bruscas variações de umidade relativa mínima entre no período de 04 a 09/05/2011 e de 25 a 29/05/2011. No período de 25 a 29/05/2011, a cultura estava no estágio 2 de desenvolvimento, que corresponde ao período de maior demanda evapotranspirométrica. Esses resultados corroboram com os de Maggi (2006) que avaliou o efeito de diferentes potenciais da água no solo na produção de três variedades de alface (lisa, crespa e americana) em ambiente protegido.

4.1.3. Lâmina de água aplicada

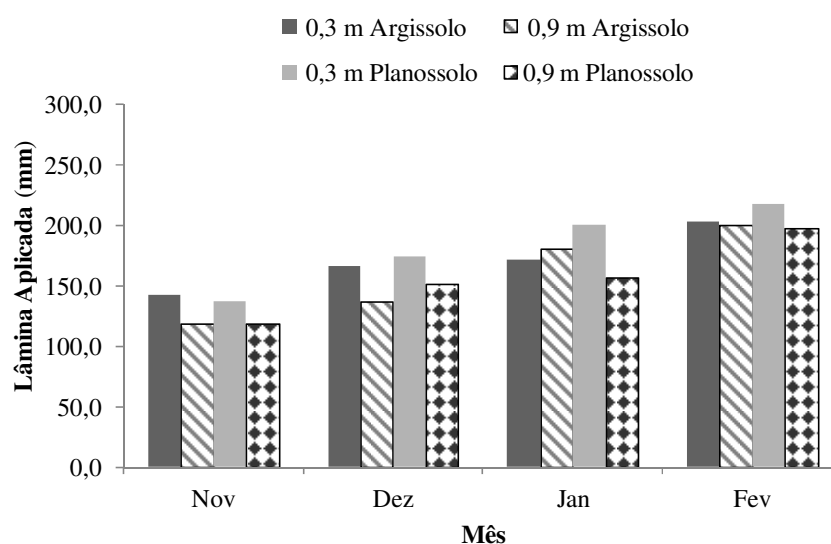
Com o acionamento automático do sistema de irrigação, diferentes volumes de água foram aplicados aos vasos com solo, sendo os mesmos proporcionais à tensão de acionamento provocada pelos desníveis do pressostato até a cápsula, e influenciados pelos tipos de solo e volumes de vaso. Estes volumes de água foram transformados em lâmina aplicada para a análise detalhada dos tratamentos em ambos os experimentos em casa de vegetação.

As irrigações realizadas automaticamente pelo acionador foram avaliadas e estão apresentadas na Figura 12b, considerando os dois tipos de solo, dois volumes de vaso e dois desníveis do pressostato em relação à cápsula cerâmica do acionador. Esses resultados se referem à primeira etapa do trabalho, quando não havia ainda o cultivo da alface.

É possível observar na Figura 12b que em ambos os volumes de vaso e tipos de solo a lâmina aplicada foi maior nos tratamentos com desnível de pressostato de 0,3 m, em todos os meses de condução do experimento. Segundo Médici et al. (2010), teoricamente a tensão de acionamento do equipamento é igual, em módulo, ao desnível do pressostato. Assim, para o menor desnível, o acionamento do dispositivo foi mais frequente quando comparado ao tratamento com desnível superior. Quando se compara os volumes de vasos, observa-se que as lâminas aplicadas foram maiores nos vasos de menor volume (2,76 L) (b), sendo uma possível explicação para isso, o fato de que os ciclos de secagem e umedecimento eram mais frequentes em comparação ao vaso de 4,81 L (Figura 12b).



a



b

Figura 12. Lâminas aplicadas mensalmente em vasos de 2,76 L (a) e 4,81 L (b) para o experimento sem planta.

A Figura 13 apresenta o balanço semanal das lâminas aplicadas para a segunda etapa deste trabalho, quando foi cultivada a cultura da alface. Os resultados são apresentados para os mesmos tipos de solo, tamanhos de vaso e desníveis do pressostato. Nesta etapa, o acionador foi avaliado no período de 04/05 a 08/06/2011.

Verifica-se que em todos os tratamentos as lâminas de água aplicadas foram maiores entre a terceira e quinta semanas, quando a cultura da alface se encontrava no estágio 2 de desenvolvimento (final do primeiro estágio até a cobertura completa da superfície do vaso) que corresponde ao período de maior demanda evapotranspirométrica.

O comportamento apresentado no primeiro experimento quando se avaliou lâmina aplicada foi também observado no segundo experimento. Percebe-se que nos vasos de 2,76 L, para ambos os solos, as lâminas aplicadas também foram maiores em relação aos de 4,81 L.

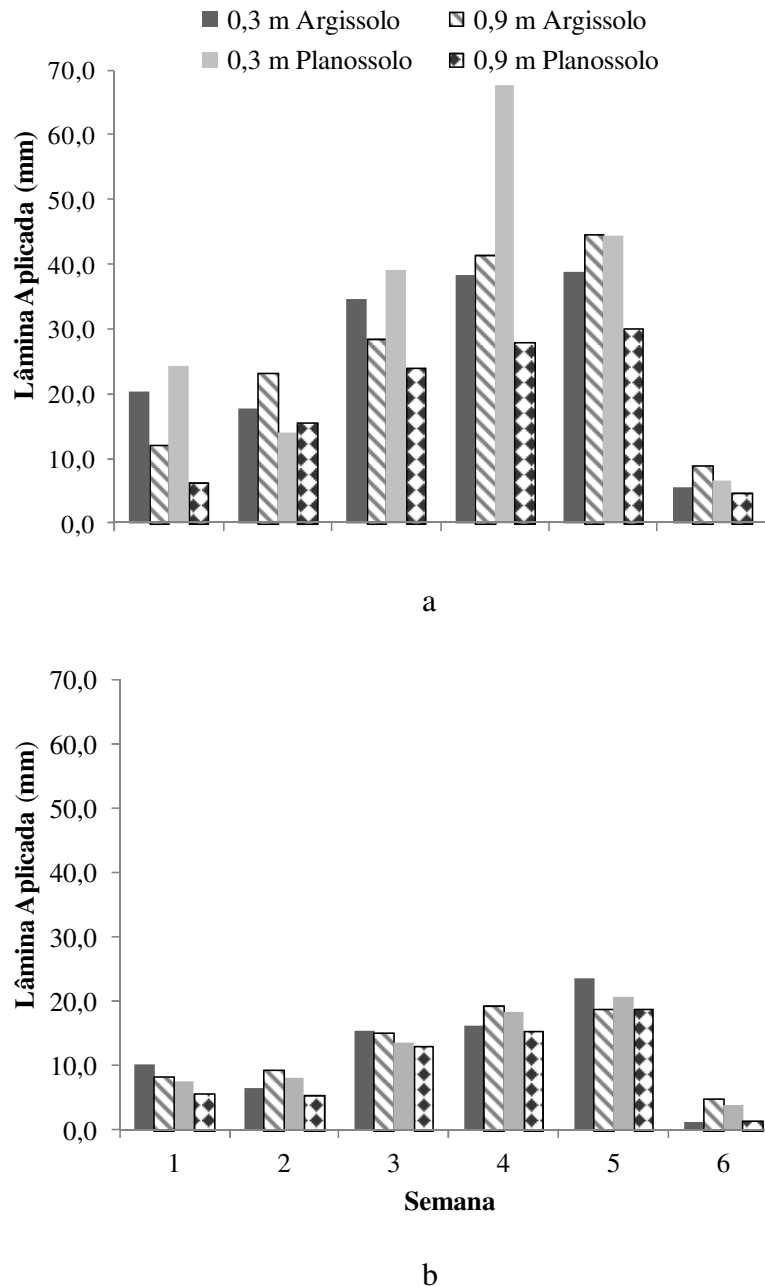


Figura 13. Lâminas aplicadas semanalmente em vasos de 2,76 L (a) e 4,81 L (b) para o experimento com planta.

4.1.4. Monitoramento do conteúdo de água

A Figura 14 apresenta o resultado do monitoramento do conteúdo de água nos vasos, no experimento sem cultivo. As variações observadas representam o comportamento do conteúdo de água em função dos desníveis da cápsula cerâmica do acionador até o pressostato.

É possível verificar que, para o Argissolo (Figura 14a e Figura 14b), o tamanho do vaso não apresentou diferença expressiva na variação do conteúdo de água. Contudo, o conteúdo de água do solo para o desnível de 0,30 m foi superior, mantendo-se praticamente constante ao longo de todo o período de experimento (29/10/2010 a 26/02/2011). Por outro lado, para o desnível de 0,9 m, o conteúdo de água do solo atingiu equilíbrio a partir da terceira semana, provavelmente devido ao fato de todos os tratamentos terem sido iniciados com a mesmo conteúdo de água. Com relação ao Planossolo (Figura 14c e Figura 14d) e em ambos volumes de vaso, o conteúdo de água no solo para desnível de 0,30 m foi superior. Entretanto, para o volume de vaso de 4,81 L a diferença entre os desníveis não foi expressiva, atingindo o equilíbrio do conteúdo de água no solo a partir da terceira semana, assim como para o Argissolo.

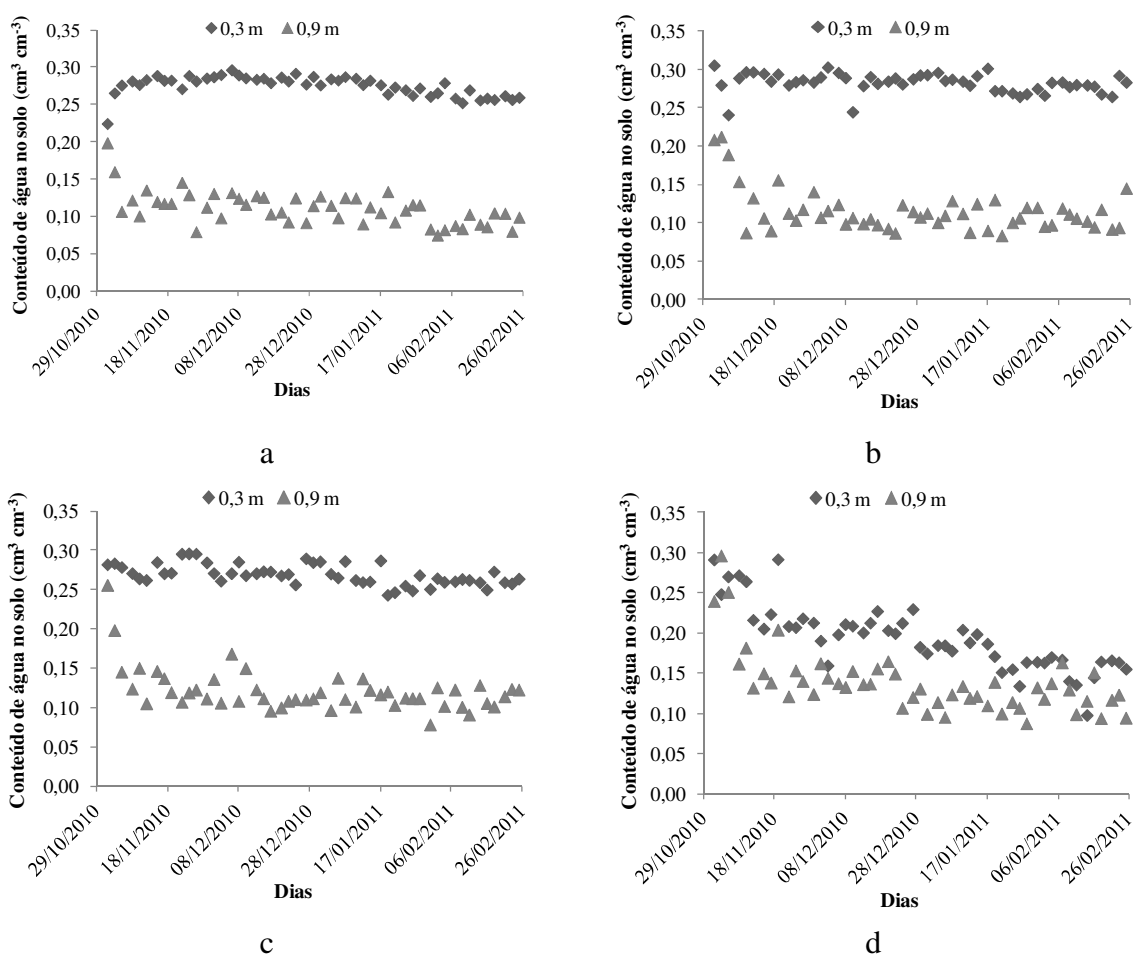


Figura 14. Variação do conteúdo de água no solo ao longo do experimento em cada tipo de solo, Argissolo (a, b) e Planossolo (c, d) durante a primeira fase (sem cultivo).

O monitoramento do conteúdo de água do solo durante o segundo experimento em casa de vegetação (com cultivo da cultura alface) é apresentado na Figura 15, para os diferentes tratamentos. Observa-se que durante todo o período deste experimento (04/05/2011 a 08/06/2011) o conteúdo de água para o desnível de 0,30 m foi superior em relação ao desnível de 0,9 m, variando de acordo com a necessidade hídrica da cultura. Em virtude disso, nota-se maiores variações no conteúdo de água no solo.

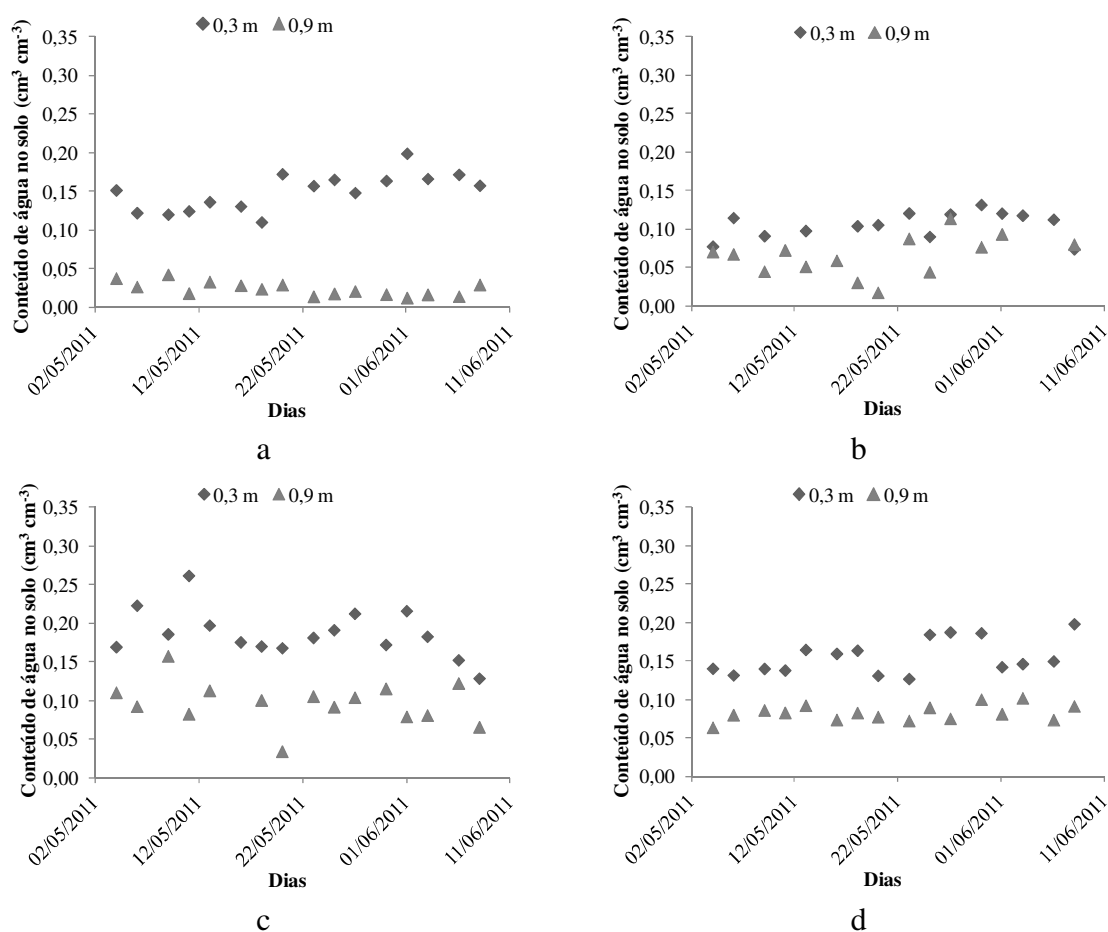


Figura 15. Variação do conteúdo de água no solo ao longo do experimento em cada tipo de solo, Argissolo (a, b) e Planossolo (c, d) durante a segunda fase (com cultivo).

4.1.5. Análise estatística dos resultados

No primeiro experimento em casa de vegetação, a análise estatística efetuada mostrou interação significativa entre o desnível do pressostato e o volume de vaso, conforme resultados apresentados na Tabela 8. A maior lâmina aplicada na combinação de desnível do pressostato 0,30 m e vaso de 2,76 L pode estar relacionada à menor altura deste vaso, proporcionando uma camada menor de solo acima da cápsula cerâmica, a qual, conseqüentemente, permanecia mais exposta à perda de água por evaporação. O desnível de 0,90 m manteve a camada superficial do solo um menor conteúdo de água, gerando, assim, um certo isolamento da cápsula com relação à atmosfera. No tratamento com desnível do pressostato de 0,30 m e vaso de 2,76 L, a camada superficial fica mais úmida, o proporcionando a manutenção de um filme contínuo de água entre a superfície do solo e a cápsula cerâmica, justificando a maior perda de água nesta combinação de desnível e tamanho de vaso.

Quando se compara as lâminas irrigadas em cada desnível observa-se que o tratamento 0,3 m apresentou maior média uma vez que a tensão na coluna d'água neste desnível é menor que no de 0,9 m proporcionando assim maior frequência de acionamento, corroborando com Médiçi et al. (2010).

Tabela 8. Lâmina (mm) aplicada correspondente aos tratamentos de desnível de pressostato com interação ao volume de vaso

Volume de vaso	Desnível	
	0,3 m	0,9 m
2,76 L	310,72 Aa*	224,74 Ab
4,81 L	234,65 Ba	208,95 Bb

*Médias seguidas por mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo Teste F de Snedecor.

Com relação à θ , foram observadas médias de $0,258 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,119 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para os desníveis de 0,3 m e 0,9 m, respectivamente, que se diferenciam estatisticamente, fato que pode ser explicado devido ao acionador regulado com 0,9 m manter o solo com tensão maior, conforme reportado por Médici et al. (2010). O conhecimento do conteúdo de água no solo submetido a maiores tensões de acionamento permite inferir sobre o funcionamento e possibilidade de regulagem do dispositivo para trabalhar com tensões críticas variáveis, permitindo sua adaptabilidade a diferentes culturas e ao longo do ciclo das mesmas.

No experimento em casa de vegetação com o cultivo da alface observou-se comportamento semelhante ao apresentado no primeiro experimento em relação ao volume de vaso, verificou-se que as lâminas aplicadas foram de 154,38 e 69,51 mm, respectivamente, para os volumes de vaso de 2,76 e 4,87 L que se diferenciam estatisticamente. Além disso, a análise estatística efetuada mostrou interação significativa entre o desnível do pressostato e o tipo de solo, conforme resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Lâmina (mm) aplicada ao longo do segundo experimento em casa de vegetação correspondente aos tratamentos de desnível de pressostato com interação ao tipo de solo.

Tipo de solo	Desnível	
	0,3 m	0,9 m
Planossolo	134,19 Aa*	83,41 Ab
Argissolo	116,2 Ba	113,97 Aa

*Médias seguidas por mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo Teste F de Snedecor.

De acordo com os resultados, supõe-se que o Planossolo, em virtude da textura mais arenosa, perde mais água por evaporação e de forma mais acentuada quando é submetido à menor tensão. Em solos com menor conteúdo de argila, são menores as forças de coesão e adesão, diminuindo a sua capacidade de retenção da água no solo. Segundo Carlesso & Zimmermann (2000) e Michelon et al. (2009), solos de textura arenosa como o utilizado neste experimento retém menos água quando comparado com os de textura argilosa, devido ao menor espaço poroso e superfície adsorptiva, o que propiciou uma maior frequência nos ciclos de secagem e umedecimento, aumentando assim a lâmina aplicada.

Houve diferença estatística também no conteúdo de água no solo para tipo de solo e regulagem do acionador. O desnível do pressostato a 0,3 m diferenciou estatisticamente do desnível de 0,9 m pelo teste F ($p < 0,0015$), apresentando um conteúdo de água médio de $15,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ enquanto que o desnível de 0,9 m este conteúdo foi de $7,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Em relação ao tipo de solo, o Planossolo (textura arenosa) apresentou uma média de $13,56 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ se diferenciando pelo teste F ($p < 0,0321$) do Argissolo (textura argilosa), que apresentou uma média de $8,94 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados para

lâminas aplicadas, onde os tratamentos com Planossolo e desnível do pressostato de 0,3 m apresentaram maiores lâminas.

Aliado às suposições apresentadas para os resultados encontrados nos experimentos em casa de vegetação, o conhecimento a cerca da continuidade de poros nos solos pode complementar as explicações. De acordo com Lanzanova et al. (2007), a infiltração de água no solo é afetada diretamente pela quantidade, diâmetro e continuidade dos poros. Segundo Hillel (1980) a capacidade de armazenamento e o movimento da água no solo são afetados pela distribuição do tamanho de poros que depende da textura e estrutura do solo. Solos com textura argilosa possuem maior continuidade de poros e assim, a evaporação da água é mais lenta no início do processo de infiltração, pois as forças de coesão e adesão são maiores. Por outro lado, nos solos arenosos o processo de evaporação torna-se menor com o passar do tempo devido à descontinuidade dos poros, fato que contribuiu para a maior retenção da água nas camadas mais profundas (Gonzales & Alves, 2005) (Figuras 14 e 15).

A Tabela 10 apresenta as médias de produção de cada variável avaliada (massa fresca, massa seca, diâmetro, altura, número de folhas da cabeça e área foliar) na cultura da alface. A análise estatística efetuada não revelou diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade para as variáveis de produção número de folhas, massa seca e área foliar. Apesar disso, é possível verificar na Tabela 10 que os maiores valores destas variáveis foram encontrados nos vasos com 4,81 L que continham material do Planossolo.

Tabela 10. Média de produção de cada variável avaliada.

Tratamentos*	Nº de folhas	Massa fresca	Massa seca	Diâmetro da cabeça (cm)	Área foliar (cm ²)
		(g por planta)			
(2,76; Argissolo; 30)	24,3	170,9	4,0	11,8	1726,3
(4,81; Argissolo; 30)	27,0	235,0	6,5	13,5	1974,9
(2,76; Planossolo; 30)	27,3	216,6	5,9	14,0	1906,8
(4,81; Planossolo; 30)	28,3	244,3	6,8	15,3	2059,4
(2,76; Argissolo; 90)	25,7	199,2	6,4	12,9	1726,8
(4,81; Argissolo; 90)	27,3	231,5	5,7	13,4	2135,5
(2,76; Planossolo; 90)	24,0	142,0	4,7	10,7	1129,1
(4,81; Planossolo; 90)	28,0	232,8	6,4	13,8	2032,7

*(volume de vaso (L); tipo de solo; desnível do pressostato (cm))

A cultura da alface apresentou diâmetro da cabeça maior na regulação 0,30 m em relação ao tratamento 0,90 m, quando cultivada no Planossolo. Para o Argissolo, no entanto, esta diferença não foi significativa (Tabela 11).

Tabela 11. Diâmetro da cabeça da alface (cm) cultivado em casa de vegetação correspondente aos tratamentos de desnível de pressostato com interação ao tipo de solo.

Tipo de solo	Desnível	
	0,3 m	0,9 m
Planossolo	14,65 Aa*	12,38 Ab
Argissolo	13,00 Ba	13,13 Aa

*Médias seguidas por mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo Teste F de Snedecor

De acordo com os dados já apresentados, o material do Planossolo com regulagem de 0,3 m apresentou maiores lâminas aplicadas e conteúdos de água maiores foram mantidos, o que pode resultar do fato que a alface responde positivamente a irrigação, como salientam Bandeira et al. (2011). A literatura apresenta vários trabalhos mostrando a alface ser uma das hortaliças mais exigentes em água durante todo o seu ciclo, onde a quantidade e a qualidade da mesma influenciam na produtividade e na qualidade comercial.

O menor diâmetro encontrado na combinação desnível do pressostato 0,9 m e o o material do Planossolo pode ser explicado devido à tensão de acionamento ser menor nesta regulagem e assim a frequência de irrigação era menor, conforme Medici et al. (2010). Aliado a esta suposição, o conhecimento a cerca do bulbo molhado do solo que é a distribuição de água no volume molhado por gotejamento, pode complementar esta explicação. Em solos de textura arenosa o movimento da água é maior na direção vertical devido às forças capilares serem menos acentuadas. Assim, o bulbo tende ser mais profundo e pouco extenso lateralmente (Souza et al., 2007) influenciando no desenvolvimento da cultura que possui o sistema radicular ramificado quando é transplantada como foi neste experimento.

A massa fresca foi maior nos vasos de 4,81 L, apresentando média de 235,89 g por planta se diferenciando estatisticamente dos vasos 2,76 L de solo, com média 200,83 g por planta, pelo teste F ($p < 0,0051$). Tal fato pode estar associado ao maior volume de solo para explorar e se desenvolver e que pode ter contribuído para melhor nutrição mineral das plantas. Para a variável massa seca o mesmo não foi observado em nenhum dos tratamentos.

4.2. Estudo do Funcionamento do Acionador em Campo

4.2.1. Calibração da TDR

A Figura 16 apresenta o resultado das curvas de calibração da TDR geradas para as profundidades 0,10 m e 0,20 m. Para a faixa de conteúdo de água no solo observada, os coeficientes de determinação foram altos, indicando adequado ajuste dos modelos testados. As equações apresentadas na Figura 16 foram utilizadas para o monitoramento do conteúdo de água no solo, a partir da leitura das sondas instaladas em cada profundidade no campo. Utilizando, ainda, as informações obtidas na calibração da TDR foram encontrados os valores de 0,14 e 0,25 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente, para os conteúdos de água no solo correspondentes à capacidade de campo, nas profundidades de 0,10 e 0,20 m.

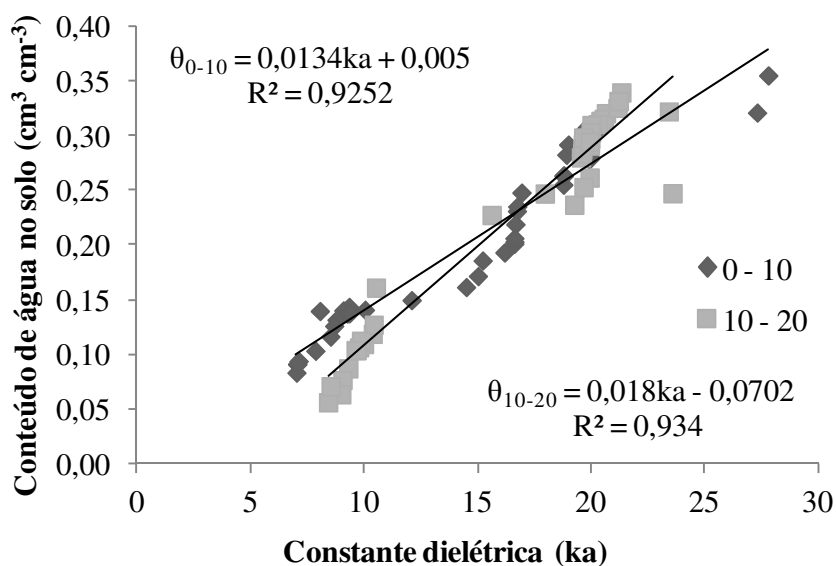


Figura 16. Curva de calibração para cada camada de solo analisada.

4.2.2. Condições meteorológicas

A cultura da alface é muito sensível a condições ambientais, tornando-se importante o monitoramento meteorológico. A Figura 17 apresenta os valores de temperaturas máxima e mínima, umidades relativas do ar, a precipitação e lâmina precipitada e evapotranspirada acumulada ao longo do ciclo da cultura no campo.

As condições climáticas foram favoráveis para o bom desenvolvimento da alface. Ao longo do ciclo da cultura, as precipitações foram relativamente baixas e bem distribuídas, o que favoreceu a aplicação e avaliação do efeito dos tratamentos. Os valores de umidade relativa e de temperaturas máximas e mínimas encontrados estão dentro da faixa favorável para a cultura conforme apresentado por Lima Junior (2008) no qual relata que a temperatura máxima não deve ultrapassar 30 °C e a mínima 6,0 °C, sendo a faixa de umidade relativa do ar de 60 a 80% adequada para um bom desenvolvimento da cultura.

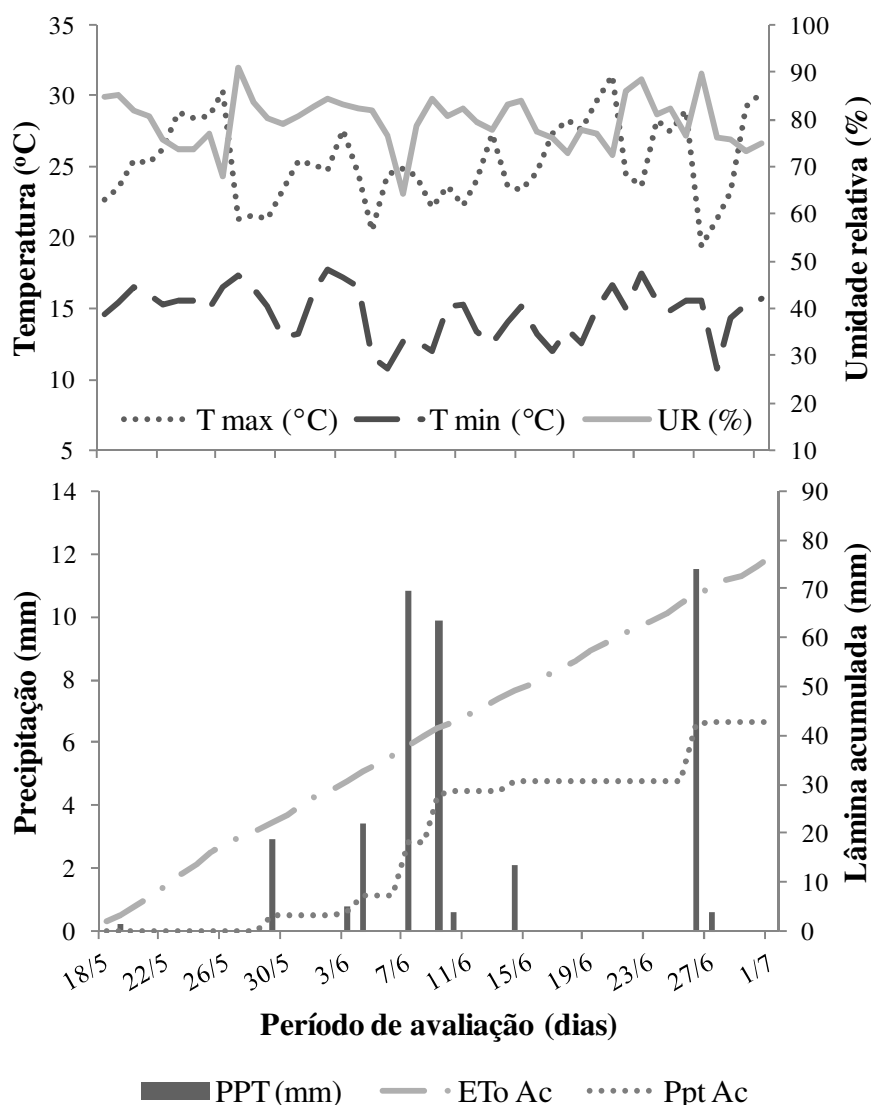


Figura 17. Dados meteorológicos observados durante o experimento em campo.

Durante os 44 dias de cultivo ocorrem chuvas cuja lâmina de água precipitada foi de 42,6 mm de um total de nove eventos de precipitação. O maior valor registrado foi de 11,5 mm no dia 26 de junho de 2011 na fase final da cultura, observa-se (Figura 17) que as chuvas

foram relativamente poucas e bem distribuídas ao longo do ciclo da cultura, o que favoreceu a aplicação e avaliação do efeito dos tratamentos. Do total precipitado, foi considerada como precipitação efetiva 13,77 mm, 13,77mm, 14,17 mm e 14,75 mm para os tratamentos com a cápsula cerâmica instalada a 0,1 m de profundidade e pressostato a 0,3 m, cápsula cerâmica instalada a 0,1 m de profundidade e pressostato a 0,9 m, cápsula cerâmica instalada a 0,2 m e pressostato a 0,3 m e cápsula cerâmica instalada a 0,2 m e pressostato a 0,9 m, respectivamente.

A ETo acumulada no período foi de 76,6 mm, com média de 1,70 mm d⁻¹.

4.2.3. Lâmina aplicada de água

A Figura 18 apresenta, para cada tratamento, as lâminas aplicadas nos períodos de estabelecimento da cultura (Le) e de avaliação do acionador (Li), e a precipitação efetiva (Pe). Verifica-se que o tratamento cuja cápsula cerâmica estava instalada a 0,20 m no canteiro e com desnível do pressostato de 0,90 m (cáps. cerâm. – 20; pres – 90) recebeu a menor lâmina de água entre os tratamentos uma vez que a tensão submetida foi maior e a frequência de acionamento menor (Médici et al., 2010). Além disso, a cápsula cerâmica estava mais profunda fazendo com que houvesse uma maior superfície seca do solo reduzindo a evaporação do solo.

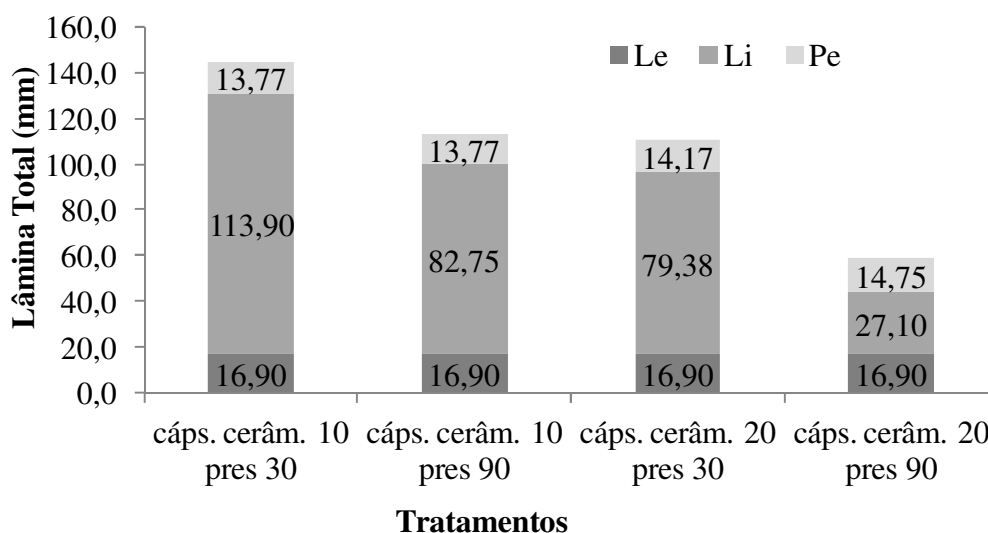


Figura 18. Lâminas de água recebidas em cada tratamento.

De posse dos valores de lâmina aplicadas, foram considerados os percentuais de reposição destas em relação à ETo e assim foi possível verificar que quando a cápsula cerâmica estava instalada a 0,20 m de profundidade, houve reposição de 77 % e 144 % da ETo acumulada no período, para os desníveis do pressostato de 0,90 m e 0,30 m, respectivamente. Para a profundidade de 0,10 m, a reposição da ETo acumulada foi de 148 % e 189 % para os desníveis do pressostato de 0,90 e 0,30 m, respectivamente.

4.2.4. Monitoramento do conteúdo de água no solo

A variação do conteúdo de água no solo ao longo do período de cultivo da alface é apresentada na Figura 19 para as profundidades de 0,10 (a) e 0,20 m (b). Conforme as Figuras, os maiores valores do conteúdo de água do solo na superfície foram verificados no tratamento cuja cápsula estava instalada a 0,10 m de profundidade e o desnível do pressostato a 0,3 m, tendo em vista a maior frequência de aplicação de água. O mesmo comportamento

foi também verificado neste tratamento, para a sonda instalada a 0,20 m. Estes resultados validam aqueles apresentados para lâmina aplicada.

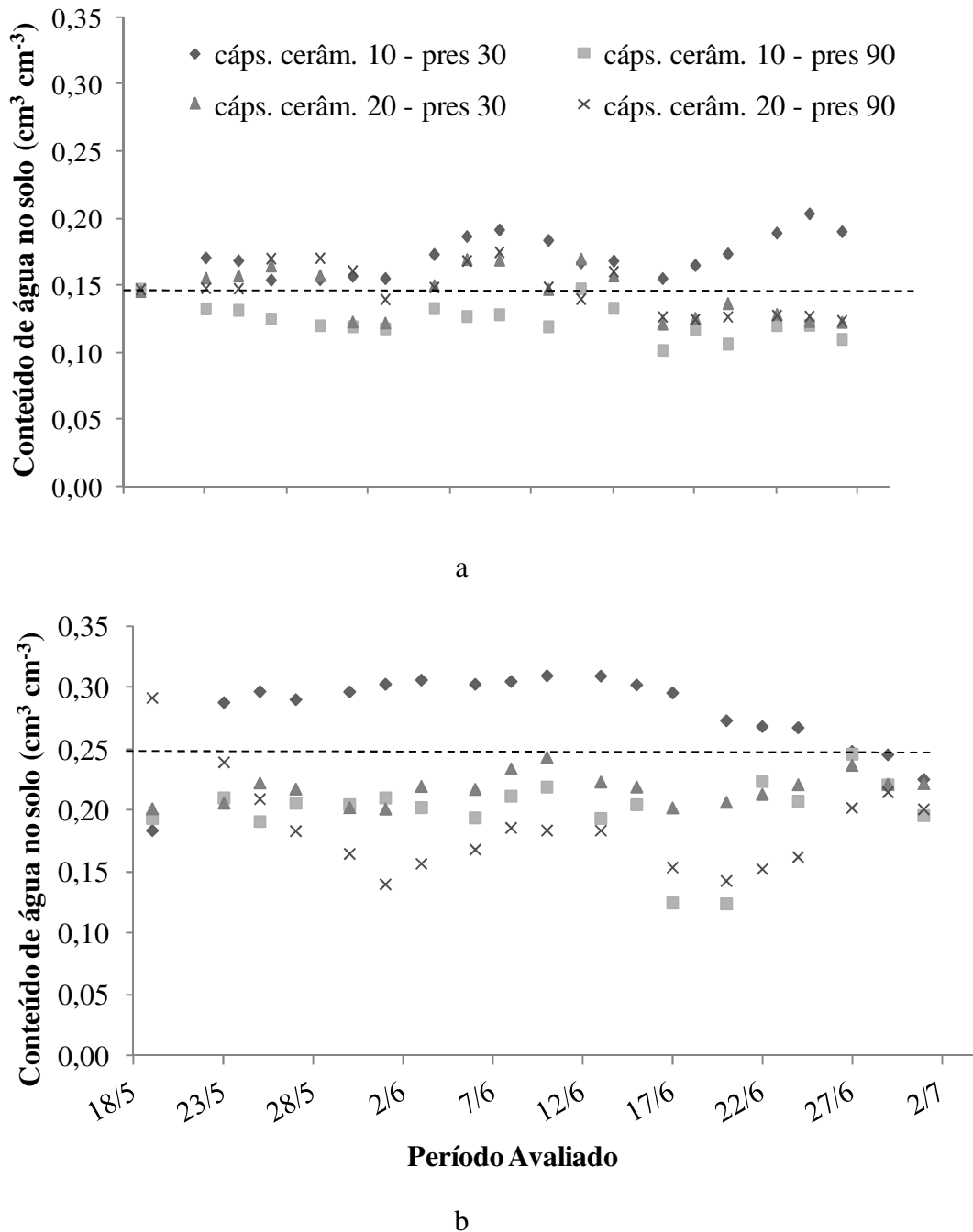


Figura 19. Conteúdo de água no solo ao longo do experimento na profundidade de 0,10 m (a) e 0,20 m (b).

Por meio da correlação dos valores de constante dielétrica e conteúdo de água no solo obtidos, em campo, na bacia de calibração, foram obtidos os valores de 0,14 e 0,25 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para os conteúdos de água no solos correspondentes à capacidade de campo, respectivamente, nas profundidades de 0,10 m e 0,20 m. Esses valores correspondem às linhas tracejadas na Figura 19. Percebe-se que o tratamento com a cápsula cerâmica instalada a 0,10 m e desnível do pressostato a 0,3 m manteve o conteúdo de água acima da capacidade de campo praticamente durante todo o período avaliado nas duas profundidades. Os respectivos

conteúdos de água do solo nessas profundidades foram de 0,17 e 0,30 cm³ cm⁻³, correspondendo a potenciais matriciais de -5,16 e -4,67 kPa, respectivamente. O tratamento com a cápsula cerâmica instalada a 0,20 m e pressostato a 0,90 m foi o que apresentou menor conteúdo de água médio na profundidade de 0,20 m (0,18 cm³ cm⁻³), correspondendo a um ψ_m de -6,04 kPa. Na profundidade de 0,10 m, o conteúdo de água médio foi de 0,15 cm³ cm⁻³ (ψ_m = -12,50 kPa).

4.2.5. Variáveis de produção da cultura da alface avaliadas

A análise estatística efetuada não revelou diferenças significativas nas variáveis de produção em relação à profundidade na qual se encontrava a cápsula cerâmica no canteiro (10 e 20 cm) ao nível de 5% de probabilidade. A Tabela 12 apresenta as médias de produção de cada variável avaliada (massa fresca, massa seca, diâmetro, altura, número de folhas da cabeça e área foliar). Apesar de não ter sido encontradas diferenças estatísticas, exceto a massa fresca e seca, os valores médios são maiores nos tratamentos com o pressostato posicionado a 0,9 m de profundidade em relação à cápsula cerâmica.

Tabela 12. Média de produção de cada variável avaliada.

Tratamento*	Nº de folhas	Massa Fresca	Massa seca	Diâmetro da cabeça (cm)	Área Foliar (cm ²)
		(g por planta)			
(10, 30)	35,167	274,566	10,146	25,196	2.172,787
(10, 90)	37,771	308,851	10,828	26,527	2.215,240
(20, 30)	36,667	252,267	9,575	26,134	2.108,217
(20, 90)	37,396	294,800	10,892	26,955	2.282,314

* (cm), pressostato (cm)

Quando se avaliou o desnível do pressostato (0,3 m e 0,9 m), as variáveis massas fresca e seca apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade. Pela Tabela 13, é possível verificar que a produção de alface foi maior para o desnível do pressostato de 0,9 m.

Tabela 13. Variáveis de produção massa fresca e massa seca.

Desnível (m)	Massa fresca (g por planta)	Massa seca (g por planta)
0,9	301,83 A*	10,86 A
0,3	263,42 B	9,86 B

*As médias seguidas das mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo Teste F

Como em outras culturas, a alface exige uma quantidade diferenciada de água no solo. Vários trabalhos têm mostrado ser a tensão de água no solo indicada para estimar a lâmina necessária de irrigação a ser aplicada na cultura e não apenas para determinar o momento de irrigar. Villas Boas et al. (2007) estudaram o efeito das lâminas de irrigação sobre o desenvolvimento da alface crespa utilizando a tensão da água no solo de -15 kPa como referência para o momento para irrigar e encontraram um valor médio de massa fresca da planta igual a 268,18 g.

Santos & Pereira (2004) avaliaram o efeito de diferentes tensões da água no solo sobre o comportamento produtivo da alface tipo americana, em ambiente protegido, e de posse dos resultados concluíram que as irrigações devem ser realizadas quando as tensões estiverem em

torno de -15 kPa, pois há uma tendência em obter plantas mais altas, com maior peso de matéria fresca comercial, folhas mais tenras e uma melhor eficiência no uso da água sob esta tensão.

Marouelli et al. (2010) recomendam que para a cultura da alface em sistema por gotejamento no campo, a tensão da água no solo seja de -15 kPa quando usa o Irrigas® para o monitoramento do conteúdo de água do solo.

Medici et al. (2010) estudaram o “acionador simplificado para irrigação” em potes preenchidos com substrato orgânico comercial ou solo no cultivo *Coleus* sp e observaram que entre os desníveis do pressostato de 0,30 a 0,90 m, a tensão da água variou de -1 a -8 kPa para o substrato comercial e de -4,0 a -13,0 kPa para o solo. Conforme Tabela 13, neste estudo foi obtida produção satisfatória de alface mesmo quando o acionador foi ajustado para 0,90 m abaixo da cápsula, indicando o fornecimento adequado de água para o desenvolvimento da cultura com uma tensão da água de -12,50 kPa.

Para o desnível do pressostato de 0,3 m, a produção de alface foi menor, sendo a manutenção de níveis do conteúdo de água do solo acima da capacidade de campo, na região do sistema radicular e durante praticamente todo o desenvolvimento da cultura, uma possível explicação para este fato. O excesso de água pode ter induzido a planta a um menor desenvolvimento do sistema radicular proporcionando menor exploração do solo. Este fato reduz a absorção de nutrientes e afeta o desenvolvimento da planta. Lima et al. (2009) avaliando o desempenho da cultura da alface cultivada sob diferentes lâminas de irrigação com níveis variando de 25 a 115% da evapotranspiração da cultura, em solo com e sem cobertura observaram que para todas as variáveis de produção avaliadas houve um decréscimo das mesmas para o nível de irrigação de 115%, ou seja, quando o solo estava mais úmido.

No tratamento com desnível de 0,9 m o estresse hídrico moderado pode ter propiciado um desenvolvimento do sistema radicular em busca de nutrientes e água propiciando um melhor desenvolvimento da cultura. Morgan (1984) comenta que as plantas, em resposta às reduções nos valores de potencial hídrico do solo, podem acumular biomassa no tecido vegetal, seja na folha, caule ou raiz. Correia & Nogueira (2004), avaliando o efeito do estresse hídrico sobre o crescimento de amendoim, constataram que as plantas desenvolveram estratégias para tolerar ambientes com restrições hídricas, intensificando a alocação de biomassa para o sistema radicular não afetando o seu desenvolvimento.

4.2.6. Eficiência no uso da água

Na Tabela 14 são apresentados os valores da eficiência no uso da água (EUA) considerando os diferentes tratamentos, que proporcionaram diferentes lâminas de água aplicadas. A maior EUA encontrada (802,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹) considerando a irrigação total, incluindo a irrigação no período de estabelecimento das mudas, foi observada no tratamento em que a cápsula cerâmica estava a 0,20 m e o desnível do pressostato a 0,90 m.

Tabela 14. Produtividade e eficiência do uso da água (EUA) no cultivo da alface, nos diferentes tratamentos.

Tratamento (cápsula cerâmica, pressostato) (cm)	Produção (kg ha ⁻¹)	EUA (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
(10, 30)	43.930,5	303,8
(10, 90)	49.416,1	435,6
(20, 30)	40.362,8	365,3
(20, 90)	47.168,0	802,5

Andrade Junior & Klar (1997), trabalhando com o mesmo sistema de irrigação adotado neste estudo, cultivaram alface americana em casa de vegetação e encontraram valores de EUA variando de 438 a 920 kg ha⁻¹ mm⁻¹, com níveis de irrigação correspondentes a 100 e 25% da evaporação do tanque Classe A, estes resultados de acordo com os encontrados. O mesmo comportamento foi observado por outros autores como Lima (2007) e Santos & Pereira (2004).

4.3. Avaliação de custo do dispositivo

O “acionador simplificado para irrigação”, como já citado, caracteriza-se por ser de fácil construção e possuir baixo custo, pois é confeccionado com utensílios domésticos simples e de fácil aquisição no mercado (Medici et al. 2010).

A Tabela 15 apresenta a discriminação dos materiais utilizados na montagem do dispositivo e seus respectivos custos.

A Tabela 16 apresenta o resultado do custo de energia das válvulas solenóides, para cada tratamento estudado. Em virtude do baixo consumo de energia das mesmas, o custo total para o funcionamento das válvulas nas diferentes condições de instalação pode ser considerado insignificante.

Quanto à bomba que abastecia o reservatório, estimou-se um consumo de 0,9901 kWh, totalizando um custo de energia elétrica de R\$ 0,34.

Tabela 15. Discriminação dos materiais utilizados na montagem do dispositivo e seu valor unitário.

Discriminação de material	Custo unitário (R\$)
Válvula solenóide	4,78
Pressostato	5,15
Cápsula cerâmica	3,99
Tubo flexível (m)	1,10
Total	15,02

* orçamento realizado em dezembro/2011

Tabela 16. Consumo de energia de elétrica pelo sistema em cada tratamento.

Tratamento (cápsula cerâmica, pressostato) (cm)	Válvula solenóide Consumo (kWh)	Tarifa total (R\$)
(10, 30)	0,0070	0,0024
(10, 90)	0,0078	0,0026
(20, 30)	0,0058	0,0020
(20, 90)	0,0022	0,0007

5. CONCLUSÕES

O dispositivo acionador apresentou desempenho satisfatório para os diferentes tipos de solo e condições de operação, possibilitando a manutenção de diferentes níveis do conteúdo de água no solo, seja em vaso ou em campo.

Em casa de vegetação, a produção foi influenciada pelo solo, volume de vaso e desnível do pressostato, sendo melhor no solo de textura arenosa, em vasos de 4,81 L e com o desnível do pressostato a 0,3 m.

Em campo, a produção média de massa fresca da alface foi influenciada pelo o desnível do pressostato, sendo maior para o desnível de 0,9 m representando uma reposição de 77% da ETo acumulada durante o período de cultivo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, C.A.B.; CUNHA, F.F.; RAMOS, M. M.; SOARES, A.A.; PIZZILOLO, T. A.; OLIVEIRA, R. A. Análise da automação em um sistema de irrigação convencional fixo por miniaspersão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.15, n.2, p. 109-118, Abr./Jun., 2007.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, Rome: FAO, n.56, 301p., 1998.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. & KLAR, A.E. **Manejo da irrigação da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) através do Tanque Classe A**. Sci. Agric., Piracicaba, v. 54, n. 1-2, jan./ago. 1997.
- AZEVEDO, H.J.; et al.. Influência de elementos do clima e da pressão de operação do aspersor no desperdício de água, em um sistema de irrigação por alta pressão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.4, p.53-62, 1999.
- BANDEIRA, G.R.L.; PINTO, H.C.S.; MAGALHÃES, P.S.; ARAGÃO, C.A.; QUEIROZ, S.O.P.; SOUZA, E.R.; SEIDO, S.L. Manejo de irrigação para cultivo de alface em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 29, n. 2, abr.- jun. 2011.
- BLONQUIST, J.M., JONES, S.B., ROBINSON, D.A. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. **Journal of Hydrology**, n.314, p.235–245, 2005.
- BOUTRAA, T.; AKHKHA, A.; ALSHUAIBI, A.; ATTA, R. Evaluation of the effectiveness of an automated irrigation system using wheat crops. **Agriculture and Biology Journal of North America**, p.80-88, 2011. <http://scialert.net/abstract/?doi=ja.2010.1.8>
- CALBO, A.G. & SILVA, W.L.C. Irrigas: novo sistema para o controle da irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11, 2001, Fortaleza. Anais. Fortaleza: ABID, p.177-182, 2001.
- CALZADILLA, A., REHDANZ, K.; TOL, R.S.J. The economic impact of more sustainable water use in agriculture: A computable general equilibrium analysis. **Journal of Hydrology**, n.384, p.292-305, 2010.
- CARDENAS-LAILHACAR, B. & DUKES, M.D. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. **Agricultural Water Management**, n.97, p.666–672, 2010.
- CARDENAS-LAILHACAR, B. **Sensor-based automation of irrigation of Bermuda grass**. 2006. 224p. M.S. Thesis. University of Florida, Gainesville, FL. Disponível: http://etd.fcla.edu/UF/UFE0015863/cardenaslailhacar_b.pdf. Acesso em: 20 out 2010.
- CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M.D.; Miller, G. L. Sensor-based automation of irrigation on bermudagrass, during wet weather conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p.120 – 128, 2008.
- CARLESSO, R. & ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo: Parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM, 88p. 2000.
- CARVALHO, D. F.; NETO, D. H. O.; RIBEIRO, R. L. D.; GUERRA, J. G. M.; ROUWS, J. R. C. Manejo da irrigação associada a coberturas mortas vegetais no cultivo orgânico da beterraba. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.2, p.269-277, mar./abr. 2011

- CEASA – Centrais de Abastecimento de Campinas SA. Disponível em http://www.ceasacampinas.com.br/padronizacao_alface.htm. Acesso em 10 ago 2011.
- CHOPART, J. L.; MÉZINO, M; AURE, F.; MÉZO, L. LE; MÉTÉ, M.; VAUCLIN, M. OSIRI: A simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments. **Agricultural Water Management**, n.87, p.128-138, 2007.
- CLARK, G.A.; STANLEY, C.D.; MAYNARD, D.N. Tensiometer control vs. tomato crop coefficients for irrigation scheduling. St. Joseph, MI: **ASAE**. ASAE Meeting Paper, p.94-2118, 1994.
- COELHO, E. F.; CALDAS, R. C.; SANTOS, D. B.; LEDO, C. A. DA S. Número e espaçamento entre hastes de guia de onda para medida do conteúdo de água do solo com TDR. Campina Grande, PB: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.215-220, 2003.
- COELHO, E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE** 39, p.2007- 2016, 1996.
- CORREIA, K. G. & NOGUEIRA, R. J. M. C. Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido a déficit hídrico. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v.4, n.2, 2004.
- COSTA, D. M. A. DA; MELO, H. N. DE S.; FERREIRA, S. R. Influência da salinidade na taxa de evaporação da água. **HOLOS**, Ano 22, dezembro 2006.
- COSTA, E. V. Medidas da Umidade Relativa do Ar em um Ambiente Fechado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 3, setembro 2003.
- CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSCULA, F. J. F.; SANTOS, C. S.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.33-45, jan./fev. 2010.
- DALTON, F.N.; Van GENUCHTEN, M.T. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. **Geoderma**, v. 38, p. 237-250, 1986.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W. et al. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n.1, p.191-2, 2000.
- DUKES, M. D.; SIMONNE, E.H.; DAVIS, W.E.; STUDSTILL, D.W.; HOCHMUTH, R. Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. In **Proceedings 2nd International Conference on Irrigation and Drainage**, Phoenix, AZ: p.665-674, 2003.
- DUKES, M.D. & J.M. SCHOLBERG. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. **Applied Engineering in Agriculture**, n.21, p.89-101, 2005.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Alface, 2009. Disponível em: <http://www.cnph.embrapa.br/pagina/dicasaoconsumidor/alface.html>. Acesso em: 08 ago 2011.
- EMATER - EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola – ASPA, Estado do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.emater.rj.gov.br/tecnica.asp>. Acesso em: 26 dez 2011.
- FARIA, M.A. **Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998.

Poços de Caudas. Simpósio Manejo de Irrigação. Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, p.133-238, 1998.

FERNANDES, A.A.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; FONSECA, M.C.M. Produtividade, acúmulo de nitrato e estado nutricional de cultivares de alface, em hidroponia, em função de fontes de nutrientes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.20, n.2, p. 195-199, 2002.

FERREIRA, F. R. L.; SOUZA, R.J.; CARVALHO, J.G.; NETO, S.E.A.; MENDONÇA, V.; WADT, P.G.S. Avaliação de cultivares de alface adubadas com silicato de cálcio em casa-de-vegetação. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1093-1101, set./out., 2010.

FIGUERÊDO, S. F. Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão de água no solo para a cultura do feijoeiro. 1998. 94p. Piracicaba: ESALQ, Dissertação Mestrado, 1998.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2ª ed., UFV, 2003.

FLECHA, P. A. N. **Sensibilidade das culturas da batata (*Solanum tuberosus* L.) e da alface (*Lactuca sativa* L.) ao excesso de água no solo**. 2004. 68p. Dissertação (Mestrado). Piracicaba: ESALQ, 2004

FREITAG, A.S. **Frequências de irrigação para *Eucalyptus Grandis* e *Pinus Elliottii* em viveiro**. 2007. 60p. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS. 2007.

FREITAS, G. A. de. **Avaliação de substratos e proporção de casca de arroz carbonizada para produção de mudas de alface**. 2010. 68p. Dissertação (mestrado em produção vegetal). Fundação universidade federal do Tocantins. Gurupi – TO. 2010.

GOMES, E. P. Cultivo da alface (*Lactuca sativa* L.) sob diferentes lâminas de água aplicada através de irrigação por gotejamento superficial e subsuperficial. 2001.71p. Dissertação (mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista. Botucatu – SP. 2001.

GONZÁLEZ, A. P. & ALVES, M. C. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície, em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.1, p.45-50, 2005.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press. 413p. 1980.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. Censo Agropecuário: Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/brasil_2006/Brasil_censoagro2006.pdf Acesso 24 ago 2011.

KLEIN, V. A. Uma proposta de irrigação automática controlado por tensiômetros. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.7, n. 3, p.231-234, set-dez, 2001.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. DA S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C. A.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 1131-1140, 2007.

LAURENT J.P.; RUELLE, P.; DELAGE, L.; ZAIRI, A.; NOUNA, B. B.; ADJMI, T. Monitoring Soil Water Content Profiles with a Commercial TDR System: Comparative Field Tests and Laboratory Calibration. **Vadose Zone Journal**, v.4, p.1030-1036, november, 2005.

- LIMA JÚNIOR, J.A.; **Análise técnica e econômica da produção de alface americana irrigada por gotejamento**. 2008. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras - MG, 2008.
- LIMA, H. A.; SANTOS, L. P. S.; ALVES, G. V. A.; DIAS, T.T.; LEITE, D. S. **Manejo da água no cultivo de alface irrigado pelo sistema de microaspersão**. V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. 2010. CD-ROM
- LIMA, M. E. de. **Avaliação do desempenho da cultura da alface (*Lactuca sativa*) cultivada em sistema orgânico de produção, sob diferentes lâminas de irrigação e cobertura do solo**. 2007. 92p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2007.
- LIMA, M. E. DE; CARVALHO, D. F. DE; SOUZA, A. P. DE; GUERRA, J. G. M.; RIBEIRO, R. L. D. Desempenho da alface em cultivo orgânico com e sem cobertura morta e diferentes lâminas d'água. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 6, p. 1503-1510, nov./dez., 2009.
- LIMA, M. E. **Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e produtividade da cultura da berinjela (*Solanum melongena* L.) sob diferentes lâminas de irrigação na região de Seropédica-RJ**. 2009. 92p. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica- RJ. 2009.
- MACEDO, A.B.M; MIRANDA, F.R.;FILHO, R.R.G.; TEXEIRA, A.S; CAVALCANTE, J.A.H.; ARAUJO, H.F. Desempenho de um sistema de irrigação automatizado através da tensão de água no solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.78–81, 2010.
- MAGGI, M.F. **Espacialização da evaporação e produção de três variedades de alface sob diferentes lâminas de irrigação em ambiente protegido**. 2006. 78p. (Tese, Doutorado em Agronomia-Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2006.
- MAROUELLI, W. A.; CALBO, A. G.; CARRIJO, O. A. Viabilidade do uso de sensores do tipo Irrigas® para o manejo da irrigação de hortaliças cultivadas em substratos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.21, n.2, p. 286, 2003.
- MAROUELLI, W. A.; FREITAS, V. M. T.; COSTA JÚNIOR, A. D. C.; **Guia Prático para uso do Irrigas® na produção de Hortaliças**. EMBRAPA HORTALIÇA, Brasília – DF, 36p., 1 ed. 2010.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5 ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 72 p. 1996.
- MEDICI, L.O. Acionador automático de sistemas de irrigação. **Revista da Propriedade Industrial**, Rio de Janeiro, n.1399, s.p., 1997.
- MEDICI, L.O.; ROCHA, H. S.; CARVALHO, D. F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola**, (Piracicaba, Brazil.), v.67, n.6, p.727-730, November/December, 2010.
- MICHELON, C. J., CARLESSO, R., PETRY, M. T., MELO, G. L., SPOHR, R. B., ANDRADE, J. G. DE. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n.1; v.13, p.39-45, 2009.
- MORGAN, J. M. Osmoregulation and water stress in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 35, p. 299-319, 1984.

- MUÑOZ-CARPENA, R. & DUKES, M.D. Automatic irrigation based on soil moisture for vegetable crops. *Rep. ABE356, Institute of Food and Agricultural Sciences, Univ. of Florida, Gainesville, 2005.*
- MUÑOZ-CARPENA, R.; BRYAN, H.; KLASSEN, W.; DUKES, M.D. Automatic soil moisture-based drip irrigation for improving tomato production. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, n.116, p.80-85, 2003.
- MUÑOZ-CARPENA, R.; DUKES, M.D.; LI, Y.; KLASSEN, W. Field comparison of tensiometer and granular matrix sensor automatic drip irrigation on tomato. **Hort Technology**, n.15, p.584-590, 2005.
- NADLER, A.; DASBERG, S. & LAPID, I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 938-943, 1991.
- NOBLE, A.; HEMA, P.S.; SARITHA, E.K.; SUBRAMANNIAN, S. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. **Agricultural Water Management**, n.45, p.145-157, 2000.
- NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; BRITO, M. E. B.; SILVA, L. A. Crescimento da alface sob saturação temporal do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, p. 890-898, 2009.
- NOGUEIRA, L.C.; DUKES, M.D.; HAMAN, D.Z.; SCHOLBERG, J.M.; CORNEJO, C. Data acquisition and irrigation controller based on CR10X datalogger and TDR sensor. **Proceedings Soil and Crop Science Society of Florida. Florida**, n.62, p.38-46, 2002.
- ONU – Organização das Nações Unidas. A ONU e a população mundial. Disponível em <http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-e-a-alimentacao/> Acesso 03 nov 2011.
- OLIVEIRA, E.A.G.; **Desenvolvimento de substratos orgânicos, com base na vermicompostagem, para produção de mudas de hortaliças em cultivo protegido**. 2011. 79p., Dissertação (mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2011.
- OR, D., WRAITH, J.M. Soil water content and water potential relationships. In: Warrick, A.W. (Ed.), **Soil Physics Companion**, vol. 1. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, p. 49–84. 2002.
- PALOMINO MONTES, D.R. **Evapotranspiração da cultura da alface dentro e fora de ambiente protegido**. 2008. 96p. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2008.
- PARIZI, A. R. C. **Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob as culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e milho (*Zea mays* L.) na região de Santiago, RS**. 2007. 125p. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2007.
- PAZ, V.P.S; TEODORO, R.E.F.; MENDONCA, F.C.. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande: v. 4, n.3, p. 465-473, 2000.
- POZZEBON, E. J.; CUNHA, P.; CAVALCANTE, A.C.; CARRARI, E.; SILVA, L.M.C. Demanda hídrica para agricultura irrigada e sua influência nas análises de pedidos de outorga de direito de uso da água. **XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Curitiba, PR, p.1-20, 2003.

- QUALLS, R.J.; SCOTT, J.M.; DEOREO, W.B. Soil moisture sensors for urban landscape irrigation: effectiveness and reliability. **Journal of the American Water Resources Association**, v.37, n.3, p.547-559, 2001.
- QUEIROZ, T. M.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de *Software e Hardware* para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.44-54, jan./mar. 2008.
- QUEIROZ, T. M.; CARVALHO, J. A.; RABELO, G.F.; ANDRADE, M. J. B. Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25 n.3, p. 632-641, 2005.
- QUEIROZ, T.M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 141p., 2007.
- REICHARDT, K. & TIMM L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP. Ed. Manole, p.323-340, 2004.
- RESENDE, V. F.; SAMINÊZ, T. C. O.; VIDAL, M. C.; SOUZA, R. B.; CLEMENTE, F. M. V. Cultivo de Alface em Sistema Orgânico de Produção. **Circular Técnica 56**. EMBRAPA HORTALIÇA. Brasília – DF. Novembro, 2007.
- ROCHA, R.P.; **Manejo da podridão de sclerotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) e míldio (*Bremia lactucae*) na cultura da alface**. 2007. 97p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Agricultura). Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa-PR, 2007.
- ROQUE, M. W. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo cultivado com feijão irrigado submetido a diferentes sistemas de preparo**. 2007. 225p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Campinas. 2007.
- ROSENFELD, B.R.; DÍAS, H.; GENOVA, L. Avances operativos del sistema de riego ecológico autónomo. In. **Avances en Ingenieria Agrícola**. Cadir 2000. Buenos Aires, p. 399-404, 2000.
- RYDER, E.J.; WHITAKER, T.N. Lettuce. In: Simmonds, N. W. (Ed.), Evolution of crop plants. Longman London, p. 39-41. 1976.
- SAKAI, R. O. **Dinâmica do nitrogênio e disponibilização de nutrientes no cultivo consorciado de adubos verdes com alface**. 2008. 76p. Dissertação (Mestrado em agricultura tropical e subtropical), Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas. 2008.
- SANCHEZ, S.V. **Avaliação de cultivares de alface crespa produzidas em hidroponia tipo NFT em dois ambientes protegidos em Ribeirão Preto (SP)**. 2007. 63f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. 2007.
- SANTANA, G. S.; COELHO, E. F.; SILVA, T. S. M. S. Estimativa da Condutividade elétrica da solução do solo a partir do teor de água e da condutividade elétrica aparente do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.3, p.672-685, set./dez. 2006.
- SANTOS, S. R. & PEREIRA, G. M. Comportamento da alface tipo americana sob diferentes tensões da água no solo, em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 569-577, set./dez. 2004.
- SHOCK, C.C.; FEIBERT, E.B.G.; SAUNDERS, L.D.; ELDREDGE, E.P. **Automation of subsurface drip irrigation for crop research**. In: Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources. F.S. Zazueta and J. Xin eds. Iguacu Falls, Brazil. p. 809-816, 2002.

- SILVA, W.A.; MEDICI, L.O.; CARVALHO, D.F.; CEDDIA, M.B.; PEREIRA, M.G. Avaliação de sistema automático de baixo custo para manejo da irrigação. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.12 n. único, p.29-34, 2001.
- SMAJSTRLA, A.G. & R.C. KOO. Use of tensiometers for scheduling of citrus irrigation. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, n.99, p.51-56, 1986.
- SMAJSTRLA, A.G. & S.J. LOCASCIO. Irrigation cutback effects on drip-irrigated tomato yields. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, n.107, p.113-118, 1994.
- SMITH, J. O. **Plantas de cobertura e doses de torta de mamona no cultivo orgânico de alface sob plantio direto**. 2009. 133p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras. 2009.
- SOUZA, C. F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento**. 2002. 124p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Campinas. 2002.
- SOUZA, E. A.; EUGÊNIO FERREIRA COELHO, E. F.; PAZ, V. P. S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1161-1166, jul./ago., 2007.
- SOUZA, V. F.; FRIZZONE, J. A.; FOLEGATTI, M. V.; VIANA, T. V. A. Eficiência do uso de água pelo maracujazeiro amarelo sob diferentes níveis de irrigação e doses de potássio. Campina Grande, PB: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 302-306, 2006.
- SOUZA, A. P.; PEREIRA, J. B. A.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e eficiência do uso da água da cultura do pimentão em diferentes sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p.15-22, 2011.
- TEIXEIRA, A. S. & COELHO, S. L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.367-376, maio/ago. 2005.
- 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.1145-54, 2001.
- TOPP, G.C. State of the art of measuring soil water content. **Hydrological Processes**, n.17, p.2993-2996, 2003.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, p.574-582, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.
- VILAS BOAS, R. C. V.; CARVALHO, J.A.; GOMES, L.A.A.; SOUZA, K.J.; RODRIGUES, R.C.; SOUSA, A. M. G. Avaliação técnica e econômica da produção de duas cultivares de alface tipo crespa em função de lâminas de irrigação. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 525-531, mar./abr., 2008.
- VILAS BOAS, R. C. V.; CARVALHO, J.A.; GOMES, L.A.A.; SOUZA, K.J.; RODRIGUES, R.C.; SOUSA, A. M. G. Efeito da irrigação no desenvolvimento da alface crespa, em ambiente protegido, em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n.4; v.11, p.393-397, 2007.