



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ANTONIO DIMAS SIMÃO DE OLIVEIRA

MEDIDA DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO POR UM SENSOR CAPACITIVO E
APLICAÇÃO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DA MELANCIA

FORTALEZA – CEARÁ

2012

ANTONIO DIMAS SIMÃO DE OLIVEIRA

**MEDIDA DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO POR UM SENSOR
CAPACITIVO E APLICAÇÃO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DA
MELANCIA.**

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra.

Coorientador: Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

O45m Oliveira, Antonio Dimas Simão de.
Medida de atributos físicos do solo por um sensor capacitivo e aplicação no
manejo da irrigação da melancia / Antonio Dimas Simão de Oliveira – 2012.
114 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências
Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2012.

Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra.

Coorientador: Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira.

1. Coeficiente de cultivo (kc). 2. Balanço hídrico. 3. Agricultura de precisão. I.
Título.

ANTONIO DIMAS SIMÃO DE OLIVEIRA

**MEDIDAS DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO POR UM SENSOR CAPACITIVO E
APLICAÇÃO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DA MELANCIA.**

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de doutor em Engenharia Agrícola.

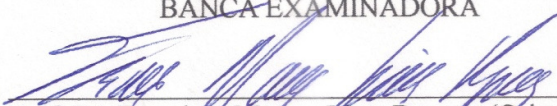
Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

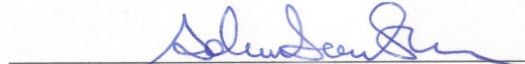
Orientador: Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra.


Coorientador: PhD. Adunias dos Santos Teixeira

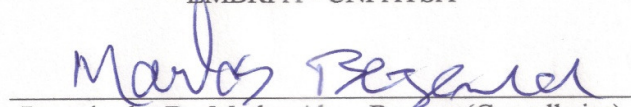
Aprovada em: 16/08/2012


BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC


Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC


Pesquisador. PhD. Luis Henrique Bassoi (Conselheiro)
EMBRPA - CNPATSA


Pesquisador Dr. Marlos Alves Bezerra (Conselheiro)
EMBRPA - CNPAT


Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior (Conselheiro)
Universidade Federal do Ceará - UFC

A meus pais, José Freire e Maria José.
A minha esposa, filha e familiares em geral.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos dá força para superar as dificuldades cotidianas e inspiração para buscarmos novas conquistas.

A meus familiares, que incentivaram minha carreira de estudante e ajudaram das mais variadas formas a vencer os desafios.

Aos professores Marcus Bezerra e Adunias dos Santos, por terem me aceitado como orientado e terem disponibilizado condições favoráveis de estudo, durante todo o curso.

À Universidade Federal do Ceará, através do DENA, por ter fornecido conteúdo de qualidade para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos e colegas destes doze anos de convivência dentro da universidade, que no intuito de não cometer a injustiça de esquecer o nome de alguém vou me guardar o direito de não citar nomes.

A FUNCAP e CAPES por me propiciarem a bolsa de estudo, o que permitiu uma maior dedicação ao mesmo.

Aos membros da banca por terem aceitado, de pronto, o convite para avaliarem meu trabalho e contribuírem para as melhorias necessárias.

Ao Banco do Nordeste do Brasil e CNPq, pelos financiamentos dos projetos de pesquisas financiados ao Centro de Ciências Agrárias, que possibilitou a instalação e condução dos trabalhos de campo.

RESUMO

OLIVEIRA, A.D. S. **Medida de atributos físicos do solo por um sensor capacitivo e aplicação no manejo da irrigação da melancia**. Orientador: Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra. Fortaleza: UFC. 114f. (Tese). 2012.

Nos últimos anos, com a evolução explosiva da informática e da eletrônica, a comunidade científica mundial tem intensificado os estudos no sentido de desenvolver e aplicar pesquisas baseada no aprimoramento da alta precisão. Os avanços na área de informática, principalmente na elaboração de interfaces com sensores eletrônicos, permitiram o desenvolvimento e aplicação de vários transdutores na Engenharia Agrícola. No que diz respeito à agricultura irrigada uma grande preocupação é com o enorme volume de água utilizado. Segundo a FAO até 2030 será necessário um incremento de 14% da água potável, na irrigação, a fim de suprir a demanda provocada pelo crescimento da população mundial. No intuito de aprimorar o uso da água na irrigação, vários trabalhos foram e estão sendo desenvolvidos, principalmente na busca de se avaliar, economicamente, a conversão da água em alimento e a real necessidade hídrica das culturas para seu desenvolvimento pleno. O kc é um fator que relaciona a necessidade hídrica da cultura em estudo e a necessidade hídrica de uma cultura hipotética. O balanço hídrico do solo contabiliza todas as adições e retiradas de água que realmente ocorrem em certo volume de solo, utilizado na produção agrícola, permitindo avaliar a situação hídrica pela qual uma cultura passa. Pelo exposto acima, o presente trabalho teve como objetivo geral a avaliação do uso do sensor capacitivo FDR em substituição ao tensiômetro para o cálculo do coeficiente de cultivo (kc), por meio do balanço hídrico do solo. O experimento foi realizado no Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú – Ceará, em uma área de 1,0 ha, em dois ciclos com a cultura da melancia nos anos de 2009 e 2010. Os sensores foram calibrados, em laboratório, através de análise de regressão entre umidade da amostra e frequência produzida pelo sensor, e entre esta última e a tensão verificada em um tensiômetro com mercúrio partindo do ponto de saturação até aproximadamente 8,0% de umidade volumétrica. A avaliação da equação de calibração ocorreu através da comparação entre os dados dos sensores e os dados dos tensiômetros para umidade e tempo de irrigação. A equação de calibração tanto para a umidade, como para tensão foi do tipo exponencial. A comparação entre as tensões medidas e estimadas, pela equação de ajuste, alcançou desempenho forte e/ou ótimo em todos os itens analisados. A validação em campo, das equações de ajuste, deu-se através de uma análise comparativa entre as tensões obtidas pelos sensores FDR e pelos tensiômetros, além das umidades atuais, estimadas por ambos os equipamentos, no primeiro ano de cultivo. Para o segundo ciclo produtivo fez-se uso da técnica do papel filtro que retornou as seguintes equações de ajuste para as curvas de retenção da água no solo: $\theta = 0,3843 * T^{-0,381}$ (1ª camada), $\theta = 0,4381 * T^{-0,372}$ (2ª camada) e $\theta = 0,4103 * T^{-0,34}$ (3ª camada), e a técnica do perfil instantâneo para avaliação da condutividade hidráulica. Aplicaram-se variações de umidade do solo, com tratamento, a fim de verificar algumas respostas fisiológicas da cultura. Os tratamentos apresentaram diferença estatística para transpiração e condutância estomática, sendo o T4 ($\Theta = 1,3$ da capacidade de campo) superior aos demais ao nível de confiança de 0,05. Os valores de kc variaram entre os tratamentos de 0,74 a 1,06 (18° DAP), 0,98 a 1,52 (45° DAP) e 0,67 a 0,85 (59° DAP). A produção variou de 13,019 a 25,867 Mg entre os tratamentos. O uso eficiente de água variou de 4,17 a 6,95 kg m⁻³. O uso do sensor permite medir o potencial da água no solo e a umidade em tempo real, possibilitando o monitoramento e a tomada de decisões de forma mais segura.

Palavras-chave: Coeficiente de cultivo (kc). Balanço hídrico. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

OLIVEIRA, A.D. S. **Measurement of soil physical properties by a capacitive sensor and application in irrigation management of watermelon.** Advisor: Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra. Fortaleza: UFC. 114p. (Tese). 2012.

In recent years, with the explosive development of information technology and electronics, the scientific community worldwide has intensified research to develop and implement research-based improvement in precision application. Advances in information technology, especially in the developing of interfaces with electronic sensors, allowed for the development and application of various transducers in Agricultural Engineering. With respect to irrigated farms there is a major concern with the large volume of water used. According to FAO by 2030 it will be required an increase of 14% of drinking water used by irrigation, in order to meet the demand caused by population growth worldwide. In order to improve water use in irrigation, several studies have been and are being developed, especially focused on evaluating, economically, the conversion of water into food and the actual requirement of crops for their full development. The k_c is a factor that relates crop water requirement of a real crop to the water requirement of a hypothetical culture. The soil water balance accounts for all additions and withdrawals of water that actually occur in a certain volume of soil used in agricultural production, allowing to access the water situation in which a culture is. From the above, this study aimed to evaluate the use of a capacitive FDR sensor to replace tensiometer in the process of obtaining the crop coefficient (k_c) through the soil water balance. The experiment was conducted at the Low Acaraú Irrigation District - Ceará, in an area of 1.0 ha, into two cycles with of watermelon, in the years 2009 and 2010. The sensors were calibrated in the laboratory using regression analysis between soil moisture from a soil sample and frequency produced by the sensor, and between it and the tension found in a mercury based tensiometer, from saturation to approximately 8.0% volumetric water content. The evaluation of the calibration equation occurred by comparing the sensor data and data from tensiometers for moisture and irrigation timing. The calibration equation for both moisture and for the tension was exponential. The comparison between the estimated and measured tensions using the fitted equation produced a strong performance and/or great on all items analyzed. Field validation of the fitted models was conducted by comparative analysis between the frequencies obtained from the FDR sensors and the tensiometers during the first harvesting year. For the second harvesting year, the technique of filter paper was tested. It resulted in the following equations to fit the water retention curves for the soil: $\theta = 0,3843 * T^{-0,381}$ (1st layer), $\theta = 0,4381 * T^{-0,372}$ (2nd layer) and $\theta = 0,4103 * T^{-0,34}$ (3rd layer). In addition, the instantaneous profile method for evaluating the hydraulic conductivity was applied. Were application depth was applied as a treatment for analyzing some physiological characteristics of the crop. The treatments showed statistical differences for stomatal conductance and transpiration, T4 ($\Theta = 1.3$ of field capacity) being superior to the others to a 0.05 confidence level. k_c values ranged between treatments from 0.74 to 1.06 (18 DAP), 0.98 to 1.52 (45 DAP) and 0.67 to 0.85 (59 DAP). Crop yield ranged from 13.019 to 25.867 Mg between treatments. The efficiency of water use ranged from 4.17 to 6.95 kg m⁻³. The use of the sensor allows for real time measurement of soil water potential and soil moisture, enabling a more secure monitoring and decision making.

Keywords: Crop coefficient (k_c). Water balance. Precision Agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Produção mundial de melancia, para os anos de 2007 e 2009	33
Figura 1.2 – Localização do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú e da área experimental	36

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Visão periférica do sensor FDR	46
Figura 2.2 – Sensor pronto para instalação	46
Figura 2.3 – Estrutura utilizada como balança e visão da amostra sobre a mesma	48
Figura 2.4 – Equipamentos utilizados para capturar os dados da célula de carga	49
Figura 2.5 – Sistema de aquisição de dados via hiper-terminal	50
Figura 2.6 – Identificação da área experimental	53
Figura 2.7 – Croqui da área experimental para validação da equação de calibração	54
Figura 2.8 – Perspectiva de instalação dos sensores FDR	55
Figura 2.9 – Valores de umidade do solo (Θ , $m^3 m^{-3}$) medidas e estimadas pelas equações exponencial e polinomial, em função da frequência (kHz)	58
Figura 2.10 – Dados de tensão (kPa), medidos e estimados em função da frequência (kHz)	59
Figura 2.11 – Dados de umidade do solo (Θ , $m^3 m^{-3}$) medidos e estimados em função da tensão	61
Figura 2.12 – Valores de tensão medidos por tensiômetros com mercúrio e sensores, durante o ciclo da cultura da melancia nas camadas de 0 – 15; 15 – 30 e 30 – 45 cm	64
Figura 2.13 – Valores de umidade do solo, com base nas medidas dos tensiômetros e sensores, nas camadas de 0 – 15; 15 – 30 e 30 – 45 cm, durante o ciclo da cultura da melancia	65

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 –	Amostras submetidas ao processo de saturação por capilaridade	72
Figura 3.2A–	Detalhe do papel filtro sendo colocado sobre a amostra de solo	73
Figura 3.2B–	Amostra envolvida com papel alumínio	73
Figura 3.3 –	Tubo de PVC contendo sensores e tensiômetros, para determinação da condutividade hidráulica do solo	74
Figura 3.4 –	Cobertura do tubo de PVC com plástico preto, para garantir a anulação da evaporação	75
Figura 3.5 –	Croqui da área experimental, com disposição dos tratamentos	76
Figura 3.6 –	Polinização natural realizada por abelha africanizada	78
Figura 3.7 –	Vista da estação meteorológica do Perímetro Irrigado	79
Figura 3.8 –	Umidades e respectivas tensões, para cada tempo de secagem amostrado	82
Figura 3.9 –	Curva de retenção de umidade, para a camada de 0 a 15 cm (calculado) e 0 a 30 cm (ALMEIDA et al., 2011), a partir do método do papel filtro	83
Figura 3.10 –	Comportamento da umidade do solo, por camada, durante o período de monitoramento de secagem do solo	85
Figura 3.11 –	Potenciais da água no solo, por camada, durante o período de monitoramento de secagem do solo	86
Figura 3.12 –	Valores de condutividade hidráulica, segundo a umidade	87

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 –	Croquis da área experimental, com disposição dos tratamentos	97
Figura 4.2 –	Foto do cavalete e respectivas válvulas de controle	98
Figura 4.3 –	Medidor de gás infravermelho a ser utilizado na pesquisa	98
Figura 4.4 –	Realização de leitura com o IRGA, na área experimental	99
Figura 4.5A–	Sensores instalados	100
Figura 4.5B–	Tensiômetros de mercúrio	100
Figura 4.6 –	Potencial da água no solo, no momento das leituras com o IRGA	101
Figura 4.7 –	Valores de Etc, para os tratamentos aplicados	107
Figura 4.8 –	Produção de melancia por m ³ de água utilizada	110

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Escala do coeficiente de determinação, coeficiente de correlação de Pearson e do Índice de Confiança	52
Tabela 2.2 – Densidade, capacidade de campo e Ponto de murcha para as diferentes camadas de solo da área experimental	53
Tabela 2.3 – Adubação utilizada na cultura da melancia durante em experimento	57
Tabela 2.4 – Frequência, tensão e umidade durante o período de calibração dos sensores em laboratório	58
Tabela 2.5 – Análise de variância para calibração do sensor, para determinação da umidade com base na frequência emitida pelo mesmo	59
Tabela 2.6 – Análise de variância para determinação da umidade do solo com base na tensão calculada por meio do tensiômetro de mercúrio	60
Tabela 2.7 – Valores de tensão (kPa) e da respectiva umidade (Θ), nas três camadas de solo avaliadas de outubro a novembro de 2009, com base nos sensores FDR	62
Tabela 2.8 – Valores de tensão (kPa) e da respectiva umidade (Θ), nas três camadas de solo avaliadas de outubro a novembro de 2009, com base nos tensiômetros	63

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Adubação utilizada na cultura da melancia durante em experimento	77
Tabela 3.2 – Massa úmida (m_u) e massa seca (m_s) dos cilindros de papel, massa de água ($m_{\text{água}}$) e respectivas porcentagens de água e potencial, para diferentes tempos acumulados (T_{ac}) durante a secagem das amostras de solo camada de 0 – 15 cm	80
Tabela 3.3 – Massa úmida (m_u) e massa seca (m_s) dos cilindros de papel, massa de água ($m_{\text{água}}$) e respectivas porcentagens de água e potencial, para diferentes tempos acumulados (T_{ac}) durante a secagem das amostras de	81

	solo camada de 15 – 30 cm	
Tabela 3.4 –	Massa úmida (m_u) e massa seca (m_s) dos cilindros de papel, massa de água ($m_{\text{água}}$) e respectivas porcentagens de água e potencial, para diferentes tempos acumulados (T_{ac}) durante a secagem das amostras de solo camada de 30 – 45 cm	81
Tabela 3.5 –	Tempo de monitoramento, frequência observada e tensão estimada na camada de solo de 0 – 15 cm	84
Tabela 3.6 –	Tempo de monitoramento, frequência observada e tensão estimada na camada de solo de 15 – 30 cm	84
Tabela 3.7 –	Tempo de monitoramento, frequência observada e tensão estimada na camada de solo de 30 – 45 cm	85
Tabela 3.8 –	Condutividade hidráulica e fator de correlação de Pearson, em relação a umidades simuladas, de acordo com as equações 3.6; 3.7 e 3.8 e as equações apresentadas por Moreira (2009)	88
Tabela 3.9 –	Valores dos parâmetros meteorológicos e da evapotranspiração de referência (E_o) para os dias 23/10, 19/11 03/12/2010	89
Tabela 3.10–	Valores de lâminas, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os sensores	89
Tabela 3.11–	Valores de lâminas, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os tensiômetros	90

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 –	Valores de g_s , E e A , medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 18 dias após o plantio	102
Tabela 4.2 –	Valores de g_s , E e A , medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 32 dias após o plantio	103
Tabela 4.3 –	Valores de g_s , E e A , medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 45 dias após o plantio	103
Tabela 4.4 –	Valores de g_s , E e A , medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 59 dias após o plantio	104
Tabela 4.5 –	Análise de variância para transpiração, na cultura da melancia	104
Tabela 4.6 –	Teste de média, para transpiração, entre os tratamentos	105

Tabela 4.7 – Análise de variância para condutância estomática, na cultura da melancia	105
Tabela 4.8 – Teste de média, para condutância estomática, entre os tratamentos	105
Tabela 4.9 – Análise de variância para fotossíntese, na cultura da melancia	106
Tabela 4.10– Teste de média, para fotossíntese, entre os tratamentos	106
Tabela 4.11– Valores de laminas para atingir a capacidade de campo, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os sensores	108
Tabela 4.12– Valores de laminas para atingir 1,3 da capacidade de campo, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os sensores	108
Tabela 4.13– Valores de kc dos tratamentos 1 e 2 em comparação aos relatados por outros autores para os mesmos dias após o plantio da melancia	109
Tabela 4.14– Valores de produção (Mg), segundo a classificação dos frutos, alcançada pelos tratamentos aplicados	110

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
INTRODUÇÃO GERAL	16
HIPÓTESES E OBJETIVOS	17
a) Hipóteses	17
b) Objetivos	17
b1) Geral	17
b2) Específicos	17
1. CAPÍTULO 1 – Eletrônica e o coeficiente de cultura (kc)	18
1.1 Os avanços da informática	18
1.1.1 O transdutor	18
1.2 O coeficiente de cultura	20
1.2.1 Evapotranspiração de referência (ET _o)	22
1.2.2 Evapotranspiração potencial da cultura (ET _{pc})	23
1.2.3 Balanço hídrico do solo	24
1.3 O solo	25
1.4 A umidade	26
1.4.1 Curva característica da água no solo	28
1.4.2 Movimento da água no solo	29
1.4.3 Condutividade Hidráulica do solo K(θ)	30
1.5 A cultura da melancia (<i>Citrullus lanatus</i>)	32
1.5.1 Distribuição do sistema radicular da melancia	33
1.6 As análises estatísticas	34
1.6.1 Análise de variância	34
1.6.2 Análise de regressão	35
1.6.3 Coeficiente de correlação de Pearson	35
1.6.4 Localização da Área de estudo	35
REFERÊNCIAS	
CAPÍTULO 2 – Uso do sensor FDR em substituição ao tensiômetro de mercúrio	44
RESUMO	44
ABSTRACT	45
2.1 INTRODUÇÃO	46

2.2 MATERIAL E MÉTODOS	47
2.2.1 Calibração dos sensores	47
a) Coleta e preparação das amostras de solo para calibração do sensor	47
b) Calibração da balança	48
c) Obtenção da umidade do solo	49
d) Obtenção da tensão da água no sol	50
e) As análises estatísticas	50
2.2.2 Validação da equação de calibração, a campo, do sensor FDR para tensão	52
a) Área de estudo experimental	52
b) Instalação dos sensores FDR	54
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
2.3.1 Calibração dos sensores	56
a) Análises estatísticas das calibrações	57
2.3.2 Validação da equação de calibração, a campo, do sensor FDR para tensão	61
2.4 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	
CAPÍTULO 3 – Uso do sensor FDR na determinação do coeficiente de cultura da melancia	69
RESUMO	69
ABSTRACT	70
3.1 INTRODUÇÃO	71
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	72
3.2.1 Determinação da curva característica de retenção de água do solo	72
3.2.2 Avaliação da condutividade hidráulica do solo	73
3.2.3 Determinação dos tratamentos	75
3.2.4 Avaliação do sistema de irrigação da área experimental com melancia	76
3.2.5 Manejo cultural e fitossanitário	77
3.2.6 Obtenção da evapotranspiração de referência pela estação meteorológica automatizada	78
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
3.3.1 Determinação da curva característica de retenção de água do solo	80
3.3.2 Avaliação da condutividade hidráulica do solo	83
3.3.3 Avaliação do sistema de irrigação da área experimental com melancia	88

3.3.4 Obtenção da evapotranspiração de referência via estação meteorológica (Eto)	89
3.3.5 Cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc)	89
3.3.6 Cálculo do coeficiente de cultura (kc)	90
3.4 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS	
CAPÍTULO 4 – Efeito de diferentes potenciais de água no solo, sobre a fisiologia da cultura da melancia	94
RESUMO	94
ABSTRACT	95
4.1 INTRODUÇÃO	96
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	97
4.2.1 Distribuição e instalação dos sensores e tensiômetros no campo	99
4.2.2 Conversão dos dados	100
4.2.3 Obtenção da evapotranspiração de referência pela estação meteorológica automatizada	100
4.3 RESULTADOS	101
4.4 CONCLUSÕES	112
4.5 RECOMENDAÇÕES	113
REFERÊNCIAS	

INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, com a evolução da informática e da eletrônica, a comunidade científica mundial tem intensificado os estudos no sentido de desenvolver e aplicar resultados de pesquisas com vistas ao aprimoramento da agricultura de precisão. No que diz respeito à agricultura irrigada uma grande preocupação é com o volume de água utilizado o qual é responsável por 85% do total de água consumida. Tal insumo, antes com valor banalizado, hoje é considerado como escasso e a tendência é que a situação seja agravada pelos impactos causados pelo homem à natureza.

Segundo dados da FAO (2007), será necessário, até 2030, um incremento de 14% da água doce na irrigação para suprir a demanda por alimentos, devido o crescimento na população mundial. O fato de menos de 1% da água do Planeta ser potável e estar disponível na superfície da Terra, torna a água um bem de conflito. Tal embate se dará entre a água necessária para incrementos de produção de alimentos e a quantidade da mesma para sedentação humana e animal e atividades industriais.

No intuito de aumentar a eficiência no uso da água na irrigação, várias pesquisas foram e estão sendo desenvolvidos principalmente na busca de se avaliar, economicamente, a conversão da água em alimento e a real necessidade hídrica das culturas para seu desenvolvimento pleno.

Neste sentido vários pesquisadores buscam conhecer os coeficientes de cultura (kc) em várias regiões e sob várias condições climáticas. Para tanto, um dos métodos mais utilizados é o balanço hídrico do solo. Os tensiômetros com mercúrio, utilizado nesse método para mensurar o potencial matricial da água no solo, possuem alguns percalços no que diz respeito ao manuseio, devido o mercúrio ser altamente poluente e a morosidade na leitura, pela necessidade do equilíbrio com a solução do solo. O uso do sensor capacitivo FDR eliminará o risco de contaminação ambiental e ampliará a velocidade de resposta dos parâmetros de interesse.

HIPÓTESES E OBJETIVOS

a) Hipóteses

- a) Os kc_s determinados com apenas uma irrigação por dia pode fornecer valores subestimados, caso haja estresse hídrico.
- b) A utilização de sensores capacitivos apresenta melhores resultados em solos arenosos, em comparação ao tensiômetro de mercúrio, para a determinação da ETc.

b) Objetivos

b1) Geral

Avaliar o uso do sensor capacitivo FDR, em substituição ao tensiômetro, para o cálculo da tensão da água no solo, por meio do balanço hídrico do solo.

b2) Específicos

1. Validar em campo a equação de calibração para tensão, obtida em laboratório, tomando como base o balanço hídrico do solo;
2. Comparar os parâmetros obtidos com os existentes na literatura;
3. Avaliar a influência de diferentes teores de água do solo na fisiologia da cultura e no cálculo do kc ; e
4. Quantificar a conversão de água em alimento utilizando diferentes kc .

CAPÍTULO 1 – Eletrônica e o coeficiente de cultura (kc)

1.1 Os avanços da informática

Os avanços na área da informática, principalmente na elaboração de interfaces com sensores eletrônicos, permitiram o desenvolvimento e aplicação de vários transdutores na Engenharia Agrícola. Transdutores foram definidos por Horowitz e Hill (1989) como sensores que convertem grandezas como temperatura, luminosidade, magnetismo, peso, aceleração, intensidade do som, em grandeza elétrica, gerando sinais que podem ser manipulados por circuitos eletrônicos.

A elaboração dessas interfaces requer de seus criadores conhecimentos sobre o comportamento da grandeza a ser estudada, pois, via de regra, fazem-se necessárias calibrações específicas, e caso não haja conhecimento de causa, pode-se inferir decisões equivocadas.

1.1.1 O transdutor

O transdutor, do tipo capacitivo, tem comportamento eletrostático similar ao de um capacitor de placas planas. Assim, um campo elétrico é formado entre as suas placas e quando qualquer material entra nesse campo, ocorre uma perturbação causando uma variação na oscilação, que se mantém enquanto esse material permanecer dentro do campo. O material que preenche o espaço entre as placas de um capacitor é chamado de dielétrico e possui um valor específico, que varia de acordo com a sua composição.

A constante dielétrica (ϵ_r) de um material pode ser definida quando esse material dielétrico preenche todo o espaço entre as placas do capacitor e é uma propriedade fundamental, que independe da geometria do condutor (RESNICK et al., 1992).

Qualquer material puro ou composto pode ser definido por suas características físicas (massa, volume, temperatura, umidade, entre outras). Desta forma, o comportamento dielétrico de um dado material é descritível pela sua permissividade (ϵ ($F m^{-1}$)), ou como é mais conhecida, permissividade relativa (ϵ_r). Tommaselli (1997 apud TRINTINALHA, 2001) apresenta a constante dielétrica dos componentes do solo: ar dos poros $\epsilon_r= 1$; partículas sólidas $\epsilon_r= 3$ a 5 ; água $\epsilon_r= 80$.

Como a constante dielétrica é uma propriedade do material isolante utilizado em capacitores, sua ação influirá na capacitância total do dispositivo e, a partir do seu efeito,

poderá, então, determinar a umidade ao medir a capacitância entre dois eletrodos implantados dentro do solo. Salienta-se que, quanto maior o valor de ϵ_r mais fácil o material será detectado (SIEMENS, 2003).

A sonda de capacitância determina a constante dielétrica do solo medindo diretamente a capacitância de uma configuração especial de eletrodos (PLATER, 1955; THOMAS, 1966), ou mede o avanço de frequência em comparação com um controle (WOBSHALL, 1978). Segundo Ruth (1999), nestes dispositivos o solo funciona como parte do material dielétrico do capacitor.

Os sensores capacitivos têm por base o uso de um capacitor e frequencímetro em um circuito RC, onde a frequência de oscilação do circuito depende do teor de água no solo onde o mesmo está inserido.

Considerando um capacitor de placas paralelas e planas, obtem-se a capacitância pela equação 1.1.

$$C = \xi * \frac{ab}{d}, \quad (1.1)$$

Sendo: ab , a área das placas (m^2); d , a distância que as separa (m); e ξ , a permissividade do meio.

A capacitância é medida em Farads ($C V^{-1}$ ou $C^2 (N m)^{-1}$). A unidade de capacitância é o Farad (F), pois a permissividade é medida em $F m^{-1}$ (DURNEY, 1985; HICKEY, 1961).

Cary e Fisher (1983) relatam que sensores baseados na medição da constante dielétrica por reflectometria no domínio do tempo (TDR) ou por sondas capacitivas são bastante atrativos, pois esses dispositivos podem ser automatizados e deixados a campo de forma segura e sem a exigência de cuidados especiais. A sonda capacitiva possui propriedades bem mais interessantes que o TDR para a instrumentação quando as medições são automatizadas. Os eletrodos das sondas podem ser facilmente instalados na profundidade requerida sem perturbar o solo com escavações de buracos. A dimensão da esfera de influência depende do tamanho do eletrodo. Gaudu et al. (1993) apud Chanzy et al., (1998) demonstraram experimentalmente que o volume explorado pela sonda capacitiva está limitado a alguns centímetros em torno dos eletrodos.

Além disso, existe a necessidade da disponibilização de dispositivos para medir a umidade do solo com acurácia, a preços acessíveis e estrategicamente convenientes, que substituam o uso da sonda de nêutrons (NADLER e LAPID, 1996). Em resumo,

características como equipamentos mais leves, instalação permanente, rápida resposta, ausência de efeitos radioativos e pouco erro aleatório de contagem associado, tornam os sensores capacitivos bem mais vantajosos que os nucleares tradicionais.

Segundo Yoder et al. (1998) o desenvolvimento de sensores para monitoramento da umidade do solo seguiu um critério que demandou pouco esforço no manuseio, não requerendo amostragem destrutiva (depois de instaladas no solo) e adaptação às medições elétricas e ao registro dos dados.

Silva et al. (2005) desenvolveram um sensor usando uma sonda capacitiva capaz de monitorar a umidade do solo, tornando-se uma ferramenta confiável e pouco exposta a influências exteriores e obtiveram a curva de calibração da sonda e verificou a influência da temperatura.

Cruz (2007) avaliou esse sensor capacitivo em condições de laboratório, através da avaliação do tempo de resposta, do efeito da temperatura e sensibilidade a mudanças de umidade, concluindo que o sensor apresenta resposta à variação de umidade do solo, com comportamento linear, permitindo, assim a sua utilização no monitoramento da irrigação.

Oliveira (2008) avaliou o uso do sensor FDR no manejo da irrigação, além de validar em campo a equação de calibração para umidade. Avaliou também a influência das distâncias de instalação dos sensores em relação aos emissores do sistema de irrigação e quantificou o número ideal de sensores por hectare, concluindo que o sensor permite medir a umidade em tempo real e acompanhar a mesma de forma contínua, possibilitando desta forma, o perfeito fracionamento da irrigação. O mesmo autor verificou também que a distância entre o sensor e o emissor tem influência direta na resposta do mesmo.

1.2 O coeficiente de cultura

O coeficiente de cultura (k_c) relaciona a necessidade hídrica da cultura em estudo e a necessidade hídrica de uma cultura hipotética. A necessidade hídrica ou demanda hídrica, representa as perdas de água pelo solo (evaporação), assim como as perdas da própria cultura (transpiração) ambas para a atmosfera. A junção destas duas perdas é denominada de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

O valor do k_c varia com o estágio fenológico da cultura. Para maioria dos cultivos o valor de k_c para o período total de crescimento está entre 0,85 e 0,9 sendo ligeiramente

superior para banana, arroz, café e cacau, e um pouco inferior para os citros, videira, sisal e abacaxi (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

O k_c é um indicador de grande significado físico e biológico, uma vez que depende da área foliar, arquitetura da planta (parte aérea e sistema radicular), cobertura vegetal e transpiração da planta (FAVARIN et al., 2002).

Devido às variações nas características ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, os k_c das culturas variam desde a semeadura até a colheita. Doorenbos e Pruitt (1992) propuseram uma metodologia para estimativa do k_c ao longo do ciclo da cultura, dividindo-o em quatro estádios:

- a) Estádio inicial – da semeadura à emergência completa das folhas definitivas, perfazendo mais ou menos 10% da superfície do solo;
- b) Estádio de crescimento – do final do estágio inicial até a cobertura de 80% da área e/ou início da floração;
- c) Estádio intermediário – do final do estágio de crescimento até o início da maturação;
- d) estágio final – do final do estágio intermediário até a colheita.

De acordo com a metodologia, somente três valores de k_c são necessários para descrever e construir uma curva de variação do k_c da cultura: os dos estádios inicial ($k_{c_{ini}}$) e intermediário ($k_{c_{med}}$), que têm valores constantes ao longo dos respectivos estádios, e um terceiro valor para o período de colheita ($k_{c_{fim}}$). O k_c no estágio de crescimento tem um valor crescente linear entre o $k_{c_{ini}}$ e $k_{c_{med}}$ e, no estágio final, linearmente decrescente entre o $k_{c_{med}}$ e $k_{c_{fim}}$ (ALBUQUERQUE et al., 2002).

O k_c relaciona experimentalmente a evapotranspiração potencial de cultura (ET_{pc}) e a evapotranspiração de referência (ET_o) como mostra a equação 1.2.

$$K_c = \frac{ET_{pc}}{ET_o} \quad (1.2)$$

Diferenças na anatomia foliar, características dos estômatos, propriedades aerodinâmicas e no albedo determinam as diferenças da ET_{pc} em relação à ET_o sob as mesmas condições climáticas (ALBUQUERQUE et al., 2002).

Santos (1985), em experimento realizado em Pentecoste, CE, encontrou um coeficiente de cultivo de 0,82 para a cultura do melão. Bezerra e Oliveira (1999), trabalhando em Fortaleza – CE com tensiometria, em um solo com textura franco-argilo-arenosa, encontraram os seguintes valores de coeficientes de cultura: 0,32; 0,67; 1,27; 1,18 e 0,95 respectivamente para os estádios inicial, desenvolvimento das ramas, floração, enchimento

dos frutos e maturação. Soares et al. (2001) ao compararem os valores de kc para o estágio de desenvolvimento inicial, sob as mesmas condições climáticas e de irrigação, verificaram que o solo de textura fina apresentou maior kc em comparação ao solo de textura grossa. Carvalho et al. (2007) trabalhando com lisímetro de drenagem em um Argisolo Vermelho Amarelo, em Fortaleza-Ce, para determinação da evapotranspiração da melancia, encontraram valores de coeficiente de cultivo da ordem de 0,38; 0,52; 0,98 e 0,58 para os estádios inicial, vegetativo, intermediário e final respectivamente. Miranda et al. (2004), utilizando o lisímetro de pesagem para determinação da evapotranspiração, obtiveram coeficientes de cultivo da melancia irrigada por gotejamento em Paraipaba, CE, no período de julho a setembro 1998, para a fase intermediária próximo de 1,4.

1.2.1 Evapotranspiração de referência (ET_o)

Os principais parâmetros climáticos que afetam a evapotranspiração são a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Para uma cultura de referência, essa é denominada evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998).

A ET_o pode ser obtida por medidas diretas ou por estimativas. As medidas diretas feitas em lisímetro em geral são de alto custo, limitando o seu uso na propriedade agrícola. Os métodos de estimativa da ET_o que podem ser divididos de acordo com os princípios envolvidos em cinco categorias: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação turbulenta. Alguns dos métodos são adaptados a determinadas condições locais onde foram desenvolvidos, tendo o seu uso limitado em maior escala. Outros, em função do seu embasamento técnico-científico, como é o caso do método de Penman-Monteith, são adotados universalmente (PEREIRA et al., 1997).

Para Moreira (1992), nas áreas que possuem dados de temperatura, umidade, vento e radiação, sugere-se a equação de Penman, por apresentar resultados satisfatórios para avaliar os efeitos do clima sobre as necessidades de água pelas plantas.

A ET_o pode ser calculada a partir de dados meteorológicos. Como resultado de uma consulta de peritos, realizada em maio de 1990, o método FAO Penman-Monteith passou a ser recomendado como o único método padrão para a definição e cálculo da evapotranspiração de referência. O método Penman-Monteith FAO (eq. 1.3), requer como dados climáticos a radiação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

A ET_o pelo método padrão da FAO (1993) possui como superfície de referência hipotética uma cultura de grama com uma altura de 0,12 m, uma resistência de superfície fixa

de 70 m s^{-1} e um albedo de 0,23. A superfície de referência se assemelha a uma extensa superfície de grama verde, bem regada e com altura uniforme, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo. A resistência da superfície fixa de 70 m s^{-1} implica em um solo moderadamente seco, resultante de um turno de rega semanal (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34\mu_2)} \quad (1.3)$$

Onde: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}), R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), T é a temperatura média diária a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m.s^{-1}), e_s é a pressão de saturação do vapor (kPa), e_a é a pressão atual de vapor (kPa), γ é a constante psicrométrica, e Δ é o gradiente da curva de pressão vapor vs temperatura ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}$).

O conceito de ET_o , assim definido, foi introduzido para estudar a demanda evaporativa independente do tipo de cultura e sua fase de desenvolvimento e das práticas de manejo (SILVA, 2004).

1.2.2 Evapotranspiração potencial da cultura (ETpc)

A evapotranspiração potencial da cultura em condições normais, denominado ET_{pc} , é a evapotranspiração da cultura livre da doença, bem adubada, cultivadas em grandes áreas, sob condições de água no solo ideal para atingir plena produção (ALLEN et al. 1998). Ainda segundo os autores, a evapotranspiração da cultura sob condições não padrão ($ET_{c \text{ adj}}$) é a evapotranspiração das culturas cultivadas sob gestão e condições ambientais diferentes das condições normais.

A evapotranspiração potencial da cultura é o termo mais comum usado para definir a perda de vapor d'água para a atmosfera através de efeito combinado dos processos de evaporação da água das superfícies do solo e de transpiração da planta (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Segundo Allen et al. (2005), em geral, três características principais distinguem ET de uma cultura de ET da superfície de referência: rugosidade da cultura; resistência geral no dossel da cultura e do solo para o fluxo de calor e vapor de água, e de reflexão da cultura e do solo à radiação de ondas curtas.

A ET_{pc} pode ser calculada a partir de dados climáticos e integrar diretamente os fatores referentes à resistência da cultura, ao albedo e à resistência do ar no método Penman-Monteith, usado para estimar a evapotranspiração da cultura de referência.

A taxa de evapotranspiração é fortemente condicionada pela quantidade de água disponível na zona radicular, ou seja, a evapotranspiração de uma cultura está diretamente relacionada à umidade do solo em sua zona radicular. Para Alves (1997), a umidade do solo pode afetar a fotossíntese, o crescimento vegetativo, a emissão de folhas e o crescimento de órgãos reprodutivos, além do secamento das folhas mais velhas que pode ocorrer mesmo em déficits temporários.

A quantidade de água evapotranspirada pela planta depende, essencialmente, da energia que chega à superfície considerada e da resistência que o solo e a planta oferecem à passagem do fluxo de água (REICHARDT, 1987). A disponibilidade de energia depende do local (latitude, altitude e topografia) e época do ano. Esta disponibilidade de energia juntamente com a demanda atmosférica, suprimento de água às plantas e as características de cada cultura controlam a evapotranspiração. Para Pereira et al. (1997), a demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar, quanto mais seco o ar maior será a demanda.

Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), a relação entre evapotranspiração real (ET_r) e ET_{pc} fornece uma importante informação sobre a condição hídrica da planta. De acordo com eles, quando a relação é menor que um, deve-se considerar que a planta não produziu fotoassimilados no seu nível máximo, indicando que perdas ocorrerão, seja ela na produtividade ou no crescimento. Por outro lado, quando a relação for igual a unidade, considera-se que ela está produzindo fotoassimilados ao máximo e que portanto, ela produzirá ou crescerá potencialmente.

1.2.3 Balanço hídrico do solo

O conceito de balanço hídrico avalia o solo como um reservatório fixo, no qual a água armazenada, até o máximo da capacidade de campo, somente será removida pela ação das plantas (THORNTHWAITE, 1948).

O movimento cíclico da água na lavoura começa com a sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (HILLEL, 1980).

Segundo Reichardt (1987), o nome balanço deixa explícito, a contabilização de todas as adições e retiradas de água que realmente ocorrem em dada área, utilizada na produção agrícola, permitindo avaliar a situação hídrica pela qual uma cultura passa fornecendo critérios mais precisos para definir quando e quanto irrigar.

Para Libardi (1999), o balanço hídrico de uma cultura em estudo é a contabilização das entradas e saídas de água num dado volume de solo, durante certo período de tempo. Segundo o autor o balanço hídrico pode ser estudado em diferentes escalas.

Através do plano de superfície do solo, tem-se a adição da chuva (P) e/ou irrigação (I), e as perdas por evapotranspiração (ETc) e enxurradas (RO). As eventuais perdas por drenagem profunda (DP) e ganhos por ascensão capilar (AC), devem ocorrer à profundidade L, que deve estar abaixo da zona radicular. A contabilidade de todos estes “componentes” do balanço reflete a quantidade de água que fica contida na camada do solo, medida através do armazenamento de água ΔA_L (Equação 1.4).

$$\Delta A_L = P + I - ETc - RO - DP - q \downarrow + q \uparrow \quad (1.4)$$

Sendo, ΔA_L a variação do armazenamento (mm) indicando, simplesmente, que a adição dos componentes é a variação do armazenamento de água na camada 0-L.

A evapotranspiração da cultura, juntamente com as características físico-hídricas do solo (textura, capacidade de campo, ponto de murcha, densidade do solo, etc.) e as características do sistema de irrigação são fatores fundamentais na determinação da lâmina de irrigação pelo balanço hídrico.

O balanço de água em uma cultura é o resultado da interação estabelecida ao longo do sistema solo-planta-atmosfera (CUNHA e BERGAMASCHI, 1992). Para Silva (2004), as influências recíprocas entre estes três meios básicos formam um sistema dinâmico e fortemente interligado e a combinação dos fatores inerentes a estes segmentos reflete diretamente na condição hídrica da cultura.

1.3 O solo

O solo é um dos componentes que possui ação direta na eficiência de irrigação, pois suas características físicas e químicas influenciam tanto na armazenagem como na disponibilização da água às plantas. A qualidade estrutural do solo tem sido comumente analisada por parâmetros como a densidade e a porosidade. Essas propriedades são de fácil

determinação e possibilitam a verificação do efeito de sistemas de manejo sobre a estrutura do solo.

O solo é um material natural, sólido e poroso, que abriga em seus poros quantidades variáveis de uma solução aquosa composta de vários eletrólitos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.) e outros componentes, denominada água ou solução do solo, além de uma solução gasosa denominada ar do solo composta principalmente de N_2 , O_2 , vapor d'água, CO_2 e pequenas quantidades de outros gases (LIBARDI, 1999).

O aumento pronunciado da superfície exposta com a diminuição do diâmetro da partícula é o ponto-chave para designar as propriedades do solo, o que terá influência direta nas propriedades de retenção de água e de nutrientes (REICHARDT, 1987).

Basicamente, existem dois processos que explicam a retenção de água pelos solos; no primeiro a retenção ocorre nos microporos dos agregados e pode ser ilustrada pelo fenômeno da capilaridade, porém não se pode afirmar que o solo é um simples tubo capilar e sim, uma composição irregular de poros e canais formados pelos sólidos. No segundo processo, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo devido à adsorção. De acordo com Libardi (1999), é sempre possível expressar a retenção da água pelo solo como equivalente a uma altura de ascensão da água no tubo capilar.

Segundo Dufranc *et al.* (2004), o estado de agregação do solo é de grande importância para as atividades agrícolas, uma vez que está relacionado com a aeração do solo, desenvolvimento radicular, suprimento de nutrientes, resistência mecânica do solo à penetração, retenção e armazenagem de água.

1.4 A umidade

Segundo Libardi (1999), a umidade do solo é o indicador quantificador mais básico da água em uma dada amostra de solo e, tradicionalmente, tem sido expressa a base de massa (θ) e a base de volume (Θ).

A umidade do solo pode ser relacionada de forma relativa a parâmetros como: massa de sólidos, massa do solo, volume de sólidos, volume do solo e volume dos poros. A equação 1.5 representa a relação entre volume de água do solo e o volume total do solo (KLAR, 1988):

$$\theta = \frac{V_{\text{água}}}{V} \quad (1.5)$$

Sendo, θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), $V_{\text{água}}$ o volume de água contido em uma amostra de solo (m^3) e V o volume total da amostra de solo (m^3).

O uso da umidade volumétrica em detrimento da umidade a base de massa, torna-se mais conveniente devido ao fato de ser mais adaptável a contabilização dos fluxos e as adições e subtrações de água ao solo. Outra razão é o fato do θ representar a razão de lâmina de água do solo, ou seja, a lâmina de água por unidade de profundidade de solo (HILLEL, 1980).

O monitoramento da umidade do solo é um dos fatores mais importantes para manejo correto da irrigação, contribuindo de forma direta para a determinação de quando e quanto irrigar. A determinação da umidade do solo também é essencial para estudos de movimento e disponibilidade de água no solo, erosão, manejo da irrigação e muitos outros processos (BERNARDO, 1989). A umidade do solo é extremamente variável com o tempo, aumentando com a chuva ou com a irrigação e diminuindo com a drenagem ou com a evapotranspiração (REICHARDT, 1987). Os parâmetros do solo, as práticas culturais e de manejo do solo, a quantidade e intensidade de aplicação de água e o estágio de desenvolvimento das culturas também são fatores que afetam a umidade do solo (PALTINEANU e STARR, 1997).

São diversos os métodos utilizados na determinação da umidade do solo, embora, nenhum deve ser considerado como o melhor e a escolha do método dependerá dos objetivos desejados pelo pesquisador e/ou produtor, da instrumentação disponível, do nível de precisão desejada, e outros fatores que possam limitar a sua escolha (COELHO, 2003).

Os métodos utilizados na determinação da umidade do solo apresentam limitações, ou quanto à precisão, ou por serem dispendiosos, ou excessivamente morosos (Klar, 1988).

Libardi (1999) também enumera o elevado nível de complexidade de alguns métodos.

Segundo Miranda e Pires (2001), a escolha do método irá depender de suas limitações que podem ser a baixa precisão, alta complexidade, ou exigência de equipamentos que não estejam disponíveis. Estes autores classificam os métodos em diretos e indiretos.

No método da tensiometria utiliza-se o tensiômetro, que determina diretamente a tensão de água no solo e indiretamente a sua porcentagem de água em função da curva de retenção de água no solo. O seu princípio de funcionamento é baseado no equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do tensiômetro, sendo regulado por uma cápsula porosa. No entanto, a sua capacidade para leituras é restringida a tensões de 0,75 atm e dessa

forma ele somente cobre uma parte da água disponível no solo, em torno de 70 % em solos arenosos e 40 % em argilosos (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

1.4.1 Curva característica da água no solo

A curva de retenção de água no solo é de suma importância para o entendimento do movimento de água no solo, pois expressa o volume de água retido no solo em diferentes tensões. As modificações na estrutura, distribuição do tamanho de poros e teor de carbono orgânico, em função do preparo do solo, provocam alterações nas forças de retenção e disponibilidade de água às plantas.

A sucção (diferencial de pressão negativa) normalmente é dividida em dois componentes: o componente matricial (dependente da estrutura e da composição do solo), definido como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos vazios e que tende a desaparecer com a saturação, e o componente osmótico (dependente da concentração química da água do solo). A sucção total é soma da sucção matricial e da sucção osmótica, considerando-se os outros potenciais desprezíveis (MIGUEL et al. 2006).

Para Presa (1982) uma forma de avaliar as variações de sucção matricial de um solo é por meio da curva característica de sucção, que representa uma relação gráfica entre a sucção matricial ou total e o teor de água (gravimétrico ou volumétrico) ou grau de saturação do solo. Essa curva permite obter a capacidade de retenção de água no solo.

Quando uma amostra, saturada, de solo fica exposta a sucções crescentes, inicia-se o fluxo da água para fora da amostra a partir de um determinado valor de sucção matricial. Esse fato se dá quando o maior poro se esvazia e o valor de sucção matricial, nesse momento, é denominado de valor de entrada de ar ou sucção matricial crítica (HILLEL, 1971).

Existem vários modelos matemáticos que podem ajustar a curva de retenção, um dos mais utilizados é o modelo van Genuchten descrito pela equação 1.6, que relaciona a umidade à base de volume (θ) ao valor absoluto do potencial matricial (ψ_m) (LIBARDI, 2004).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha\psi_m|^n\right]^m} \quad (1.6)$$

em que, θ é a umidade a base de volume ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_r é a umidade residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s é a umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ψ_m potencial mátrico (kPa) e α , n , m são parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten.

Dentre os métodos para obtenção de umidade e tensão, o método do papel filtro, em laboratório, vem sendo bastante difundido e segundo Chandler e Gutierrez (1986), mostrou-se bastante promissor na determinação do potencial do solo, alcançando faixas bem elevadas de potencial em comparação com outras técnicas. Este método de medição de potencial dos solos baseia-se no princípio de absorção de umidade por papel filtro até a ocorrência de equilíbrio de potencial.

O uso do papel-filtro para medir o potencial matricial da água no solo baseia-se no princípio de que, quando solo úmido é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de adsorver água, esta será transferida do solo para esse material até que o equilíbrio seja alcançado. No estado de equilíbrio, os potenciais matriciais da água no solo e no material poroso igualam-se, apesar de as respectivas umidades serem diferentes (MARINHO e OLIVEIRA, 2006).

Almeida et. al. (2011), testando o método do papel filtro em comparação com o método da câmara de pressão de Richards em conjunto com o funil de Haines para a obtenção das curvas características, de um solo do Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú no Ceará, afirmaram que o método do papel filtro se mostra mais vantajoso por demandar mesmo tempo e com a mesma precisão do método de Richards (1965).

1.4.2 Movimento da água no solo

Toda vez que nos sistemas em consideração houver diferença de potencial total da água, pode haver movimento de água.

O fluxo da água em solo não saturado, na região do sistema radicular dos cultivos é muito pouco estudado. No entanto, o seu conhecimento é de fundamental importância no entendimento dos processos de infiltração, redistribuição e suprimento de água às culturas (KLEIN e LIBARDI, 2002).

As características físicas do solo, como a textura e a estrutura, determinam o fluxo de água no solo. Nesse sentido, ELLIES *et al.* (1997) destacam a importância da funcionalidade do sistema poroso do solo, englobando propriedades como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Todas estas propriedades do espaço poroso, que influenciam a condutividade, podem ser reunidas no termo único “geometria porosa dos solos” (LIBARDI 1999).

Para determinar a densidade do fluxo de água no solo utiliza-se a equação de Darcy – Buckingham que leva em consideração a condutividade hidráulica não saturada do solo e o gradiente de potencial (Equação 1.7):

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta\psi}{\Delta Z} \quad (1.7)$$

sendo, q a densidade de fluxo de água em (mm h^{-1}), $\Delta\psi$ a variação do potencial total entre dois pontos considerados (mca), ΔZ é a distancia entre esses dois pontos considerados (m).

1.4.3 Condutividade Hidráulica do solo $K(\theta)$

Além do potencial total da água ψ_t , a condutividade hidráulica, afeta também o movimento da água no solo. A condutividade hidráulica é um parâmetro que mede a facilidade com a qual o solo transmite água. Portanto, quanto maior a condutividade hidráulica, maior a facilidade com que a água se move em um solo (REICHARDT, 1987).

Para um dado solo, a condutividade é tanto maior quanto maior sua umidade θ . O valor máximo da condutividade é quando o solo se encontra saturado ($\theta = \theta_s$), e é denominada de condutividade hidráulica saturada K_0 . Quando o solo se encontra em secamento, isto é, com o decréscimo de θ , a condutividade hidráulica diminui drasticamente até que seu valor chegue a ser praticamente zero para um solo seco. A condutividade é função da umidade do solo e denominada de condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$.

A condutividade hidráulica, no entanto, se apresenta como uma incógnita altamente variável espacialmente, independente da metodologia ou do local de sua determinação. Tal variabilidade segundo Hurtado (2004) ocorre devido a diferenças naturais existentes no solo e dificuldades metodológicas para sua determinação, que podem induzir a erros. Para a análise das propriedades físicas do solo, normalmente presumem-se distribuições normais ou log-normais, embora algumas vezes não ajustem os valores tão perfeitamente, não deixando de ser uma aproximação do fenômeno segundo Warrick e Nielsen (1980).

O estudo da variabilidade espacial das propriedades hidráulicas de solo é essencial para a obtenção de valores médios de áreas maiores, que possam ser representativos nos estudos de dinâmica da água no solo (CADIMA et al., 1980). Entretanto, para condutividade hidráulica, o uso de valores médios ou extrapolados pode trazer erros consideráveis na sua estimativa (STOCKTON e WARRICK, 1971; VAN LIER e LIBARDI, 1999).

Várias propriedades físicas do solo são responsáveis pela variabilidade da condutividade hidráulica, haja vista ser esta uma propriedade diretamente ligada à distribuição, ao tamanho e a forma dos poros da matriz do solo, tais como densidade, textura, estrutura e porosidade.

De acordo com Beltrán (1986), K_0 depende da fluidez da água, que é proporcional a sua viscosidade e densidade, e da macroporosidade do solo que, por sua vez, é função da textura e da estrutura. Back et al. (1990) afirmam que a condutividade hidráulica depende da textura, do arranjo das partículas (estrutura), da dispersão das partículas finas e da sua densidade, e da massa sólida. Os solos argilosos mostram que a condutividade hidráulica sofre pequenos acréscimos quando o solo é drenado (EL-MOWELLHI e van SHILFGAARDE, 1982) porque há um aumento na atividade biológica, gerando aumento na porosidade estrutural.

Scherpinski et al. (2010) trabalhando com variabilidade espacial da condutividade hidráulica e infiltração de água no solo, observaram que, em média, a condutividade hidráulica do solo saturado obtida foi de $0,19692 \text{ m h}^{-1}$, com desvio-padrão de $0,21708 \text{ m h}^{-1}$ e coeficiente de variação de 110,24%. Os resultados obtidos para a condutividade hidráulica do solo saturado evidenciam a alta heterogeneidade dos dados na área em estudo. Jury et al. (1991) indicaram que o coeficiente de variação para a condutividade hidráulica em solo saturado pode variar de 48 a 320%. Abreu et al. (2003) encontraram o valor de 62,7% para o coeficiente de variação da condutividade hidráulica no solo saturado, determinada em campo com a utilização do permeâmetro de Guelph, na profundidade de 0,15 m. A condutividade hidráulica do solo saturado depende do espaço poroso, e este parâmetro varia bastante de solo para solo e, também, para o mesmo solo em função das variações estruturais.

Existem diversos métodos para determinar a condutividade hidráulica em solos não saturados, subdivididos em métodos de campo (perfil instantâneo, camadas impermeáveis), de laboratório (drenagem interna, permeâmetros de carga constante e variável, ar quente) e empíricos, baseados na distribuição do tamanho dos poros (PREVEDELLO, 1996).

De acordo com Carvalho et al. (2007) o perfil instantâneo é o método mais exato por quantificar diretamente cada componente da equação de Richards. Esse é um método de campo que foi inicialmente desenvolvido por WATSON (1966), aperfeiçoado por HILLEL et al. (1980) e simplificado por LIBARDI et al. (1980). Dentre as vantagens, pode-se citar a obtenção de medidas diretas no campo ou local de estudo, apresentando uma maior precisão dos valores de condutividade hidráulica, quando comparados aos de laboratório. Como

desvantagens podem-se destacar o consumo elevado de tempo e mão de obra, tornando-se um dos grandes problemas para solos que apresentam camadas adensadas ou compactadas, onde o processo de drenagem é muito lento (VAN LIER e LIBARDI, 1999).

O método do perfil instantâneo procura uma solução para a equação de Richards (equação 1.8), na direção vertical, durante o processo de redistribuição da água, após a saturação de um perfil de solo e a prevenção do fluxo de água através de sua superfície.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_t}{\partial z} \right] \quad (1.8)$$

em que, θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), t é o tempo de redistribuição (h), z é a coordenada vertical de posição (mm), ψ_t é o potencial total da água no solo (cm.c.a) e $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica K em função da umidade θ .

Montenegro (2002) usou o método do perfil instantâneo em um solo arenoso e encontrou a função representativa da condutividade como sendo $K(\theta) = 0,0013e^{77,668\theta}$ mm dia^{-1} para camada de 0 a 60 cm. Moreira (2009) utilizando a metodologia de Hillel et al. (1972), em um Neossolo Quartzarênico, encontrou as seguinte equações de $K(\theta)_{7,5} = 0,0001e^{38,564\theta}$; $K(\theta)_{22,5} = 0,0004e^{48,136\theta}$; $K(\theta)_{37,5} = 0,0007e^{43,76\theta}$ e $K(\theta)_{52,5} = 0,0041e^{34,438\theta}$ mm dia^{-1} nas camadas de 0 a 15 cm; 15 a 30 cm; 30 a 45 cm e 45 a 60 cm, respectivamente.

1.5 A cultura da melancia (*Citrullus lanatus*)

A melancia é bastante explorada em muitos países do mundo, como a Índia, Irã, Itália e os Estados Unidos. No Brasil, destacam-se como regiões produtoras o Sudeste, o Centro-Oeste e o Nordeste, na microrregião do Médio São Francisco, principalmente nos municípios de Petrolina e Juazeiro (SOARES et al., 2002).

O desenvolvimento da cultura ocorre em locais com solos leves e bem drenados, temperaturas médias entre 20 e 30 °C e baixa umidade relativa. Tais condições são encontradas durante a maior parte do ano em quase todos os Estados do Nordeste.

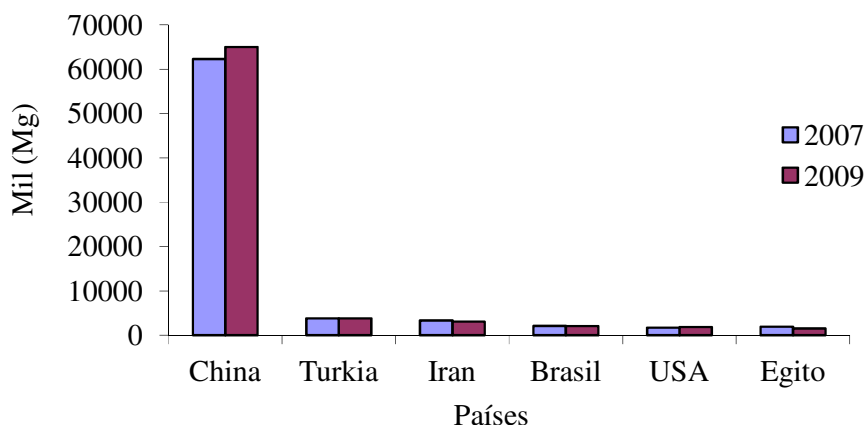
A melancia tem sua produção comprometida quando o déficit hídrico ocorre no período da frutificação até o início da maturação. No período da maturação até a colheita, a exigência hídrica é bem menor. O excesso de água, nesta fase, ocasiona rachadura nos frutos, presença de frutos insípidos e com podridões (CASALI et al., 1982).

De acordo com dados da FAO, em 2006, a produção mundial de melancia foi de cerca de 95,2 milhões de Mg, sendo os maiores produtores a China, Turquia, Irã, Estados

Unidos, e o Egito, que respondem no conjunto por mais de 82% da produção mundial (FAO, 2007). Já segundo os dados de produção mundial de 2009, houve uma mudança de posição entre o Egito e os USA, como pode ser observada na Figura 1.1.

A época ideal para a produção de melancia no Ceará inicia-se no fim da quadra invernal e estende-se até o mês de dezembro. Neste período os frutos se apresentam com qualidade superior e a ocorrência de pragas é menor, fatores estes que favorecem a exploração do comércio exterior.

Figura 1.1 – Produção mundial de melancia, para os anos de 2007 e 2009.



Fonte: FAO (2010)

Nas áreas irrigadas do Estado, o cultivo de melancia vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, em virtude de alcançar bons preços, tanto no mercado interno como no externo, com o aumento de 5% em sua área plantada no biênio 1994-1995 (BEZERRA e OLIVEIRA, 1999).

Segundo o IBGE (2008), a produção nacional de melancia foi de 1.995.206 Mg em uma área plantada de 89.333 ha. O Nordeste representou 30,47% da produção e 35,17% da área plantada.

1.5.1 Distribuição do sistema radicular da melancia

O conhecimento da distribuição do sistema radicular de uma cultura é essencial no dimensionamento e manejo racional da irrigação, orientando na localização dos sensores de umidade e emissores. A identificação de zonas com maior concentração de raízes permite ainda a aplicação localizada de fertilizantes e corretivos, elevando sua eficiência e

proporcionando, conseqüentemente, redução nos custos e nos impactos ambientais (MONTENEGRO et al., 2004).

A distribuição do sistema radicular depende de muitos fatores relativos ao solo onde a cultura está inserida, como a resistência mecânica, a umidade, a aeração e a fertilidade. Para fins de irrigação, a profundidade efetiva das raízes é um dos parâmetros básicos para projetos e manejo da água na cultura. A profundidade efetiva representa a camada desde a superfície do solo até onde se concentra a maior parte das raízes absorventes. Bassoi et al. (2000) recomendam essa profundidade para o monitoramento da água do solo visando ao manejo de irrigação.

Em estudo para determinação do consumo de água e distribuição radicular de goiabeira, em Petrolina, Ferreira (2004) considerou que o sistema radicular das culturas é importante para definição das profundidades para instalação de sensores de umidade do solo e contribui para o adequado monitoramento de água de irrigação e nutrientes na cultura, práticas que vão melhorar as técnicas de manejo, abrir novas perspectivas de estudos mais complexos e precisos das interações raiz-solo e da influência de diferentes práticas culturais em condições de campo.

Oliveira (2008), trabalhando com sensores de umidade do solo na cultura da melancia, identificou a profundidade efetiva das raízes de 30,0 cm.

1.6 As análises estatísticas

As análises estatísticas tem por objetivo conhecer o modo como as unidades experimentais respondem aos testes aplicados.

1.6.1 Análise de variância

Essa análise inicial objetiva testar as hipóteses estatísticas de nulidade ou igualdade.

Segundo Benzatto e Kronka (2006 (apud BERTOLDO et al., 2008)) a análise de variância é uma técnica que consiste na decomposição da variância total e dos graus de liberdade em partes, atribuindo suas causas aos fatores controlados e porção residual.

1.6.2 Análise de regressão

A análise de regressão, de acordo com Rodrigues (2011), consiste em ajustar uma curva aos dados obtidos em experimentos cujos tratamentos são de natureza quantitativa, descrevendo o nível de significância entre uma variável explanatória e a variável resposta.

Segundo Pimentel (1987), quando os tratamentos quantitativos têm mais de dois níveis, é essencial considerar a equação de regressão.

A análise de regressão é uma das técnicas mais utilizadas para modelar o relacionamento existente entre variáveis explicativas e variável resposta.

1.6.3 Coeficiente de correlação de Pearson

O coeficiente de correlação simples de Pearson é uma medida de associação linear entre duas variáveis aleatórias. De forma teórica, tal coeficiente é definido da seguinte maneira.

$$\rho = CORR(X, Y) = \frac{COV(X, Y)}{\sqrt{VAR(X)} \times \sqrt{VAR(Y)}} \quad (1.9)$$

Sendo uma medida de associação o valor ρ é medido a partir de uma amostra. Karl Pearson propôs um estimador de produtos de momentos (r) e que sempre está no intervalo fechado $[-1, 1]$ e que segundo Bassanazi (2004), o valor zero significa que não há relação linear e os valores -1 e 1 indicam uma relação linear perfeita.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta m_i - \bar{\theta m})(\theta e_i - \bar{\theta e})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta m_i - \bar{\theta m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta e_i - \bar{\theta e})^2}} \quad (1.10)$$

1.6.4 Localização da Área de estudo

O estudo foi conduzido no Perímetro Irrigado Baixo Acaraú (Figura 2), localizado na região norte do estado do Ceará, compreendendo parte dos Municípios de Marco, Bela Cruz e Acaraú (Latitude: 3°01' e 3°09' S, Longitude: 40°00' e 40°08' W). O clima da região é Aw' (tropical chuvoso) segundo a classificação de Köppen. O perímetro possui um potencial imediato para a irrigação de mais de 8.000,0 ha, além de mais 4.000,0 ha da ampliação, através do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), em fase de conclusão.

Figura 1.2 – Localização do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú e da área experimental.



Fonte: Adaptado de CHAVES (2006)

A malha hidráulica do perímetro é composta por canais e condutos fechados. O sistema de bombeamento está situado, no rio Acaraú, às margens da barragem Santa Rosa, que possui a função de manter o nível da água adequado ao sistema de bombeamento. A água é bombeada ao canal principal que está a uma cota suficiente para que a grande proporção do perímetro seja abastecida por gravidade. A água segue dos canais para os lotes através de tubos de ferro e/ou PVC.

O solo do perímetro apresenta elevada capacidade de infiltração e baixa capacidade de retenção de água, o que favorece a perda de água por percolação profunda. A consequência ambiental desta percolação é a lixiviação para o lençol freático de nutrientes, além da própria ascensão do lençol, conforme verificado por Chaves et al. (2006).

A escolha do perímetro como área de estudo, deu-se pelo fato de não possuir nenhuma estratégia de manejo de irrigação, levando os irrigantes ao manejo pelo total empirismo de outras experiências, sem levar em consideração as peculiaridades locais.

O Perímetro possui atualmente três estações meteorológicas, sendo uma fornecida pelo Departamento de Obras Contra as Secas (DNOCS), que para pleno funcionamento necessitaria de um “upgrade”; uma instalada no ano de 2009 pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMETE) e que disponibiliza seus dados pela internet e uma terceira, de

última geração, adquirida através de uma parceria entre a Universidade Federal do Ceará e o Banco do Nordeste do Brasil.

Apesar da disponibilização dos dados meteorológicos, são raros os casos de produtores que usufruem destes dados para monitorar a irrigação de suas plantações. O não uso dos dados meteorológicos se justifica pela falta de assistência técnica e pelo perfil dos produtores. Tal fato não é uma peculiaridade da área escolhida para realização deste trabalho, não raras são as notícias de perímetros irrigados com áreas salinizadas, por manejo inadequado da irrigação.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grão de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, p. 275-282, 2003.
- ALBUQUERQUE, J. S. ; COSTA, A. A. ; OLIVEIRA, J. C. P. et al. **Modelagem atmosférica da porção Norte do Nordeste brasileiro utilizando dados do projeto EMAS**. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2002, Foz do Iguaçu, 2002.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma, FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L. **FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 131, No. 1, February 1, 2005.
- ALMEIDA; E. L.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA FILHO, F. C.; CRUZ, T. M. L.; LIMA, R. M. M. **Obtenção de curvas características de retenção de água no solo obtidas por diferentes métodos**. IN: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 2011, Uberlândia. 2011.
- ALVES, E. J. **A cultura da banana: Aspectos técnicos, sócio-econômicos e agroindustriais**. Brasília: EMBRAPA – SPI; Cruz das Almas: EMBRAPA CNPMF, 1997. 585p.
- BASSANAZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática**. 2. ed., São Paulo: Editora Contexto, 2004. 389p.
- BASSOI, L. H.; SILVA, J. A. M.; ALENCAR, C. M.; JORGE, L. A. C.; HOPMANS, J. W. **Digital image analysis of root distribution towards improved water and soil management: grapevine and date palm study cases**. (compact disk) In: ASAE INTERNATIONAL ANNUAL MEETING, Milwaukee, 2000. Technical paper St. Joseph: ASAE, 2000.
- BELTRÁN, J.M. **Drenaje agrícola**. Madrid: Ministerio da Agricultura, Pesca y Alimentacion, 1986. v.1. 239p.
- BERTOLDO, J. G.; COIMBRA, J. L. M.; GUIDOLIN, A. F.; MANTOVANI, A.; VALE, N. M. do. Problemas relacionados com o uso de testes de comparação de médias em artigos científicos. **Revista Biotemas**, Lavras, v.38, n.4, p.1145 – 1148, jul., 2008.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1989.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. Ed. Viçosa, MG:UFV, 2006. 625 p.
- BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.173-177, 1999. Campina Grande, PB.

CADIMA, A.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho Amarelo textura média, no campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4. p. 63-66, 1980.

CARY, J.W.; FISHER, H.D. Irrigation decisions simplified with electronics and soil water sensors. **Soil Science Society of American Journal**, v. 47, n. 6, p. 1219-1223, 1983.

CARVALHO, L. C. C; BEZERRA, F. M. L; CARVALHO, M. A. R. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da melancia sem sementes. **Ciência Agrônômica**, v.39, n.1, p.53-59, Jan – Mar., 2007.

CASALI, V. W. M.; SONNENBERG, P.E. e Pedrosa, J.F. **Melancia: Cultivares e métodos culturais**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.8, n.85, p.29-32, 1982.

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Geotechnique**, v.36, p.265-268, 1986.

CHANZY, D. K.; CHADOEUF, J.; GAUDU, J-C.; MOHRATH, D.; RICHARD, G.; BRUCKLER, L. **Soil moisture monitoring at the field scale using automatic capacitance probes**. European journal of soil science, Avignon, v. 49, n. 4, p. 637-648, 1998.

CHAVES, L. C. G.; ANDRADE, E. M.; CRISOSTOMO, L. A.; NESS, R. L. L.; LOPES, J. F. B. Risco de degradação em solo irrigado do Distrito de Irrigação do Perímetro Araras Norte, Ceará. **Ciência Agrônômica**, v.37, n.3, p.292-298, 2006.

COELHO, S. L. **Desenvolvimento de um tensiômetro eletrônico para monitoramento do potencial de água no solo**. 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará.

CRUZ, T. M. L; **Avaliação de um sensor capacitivo para o monitoramento da umidade do solo**. 2007. 87. p. Monografia (Agronomia), Universidade Federal do Ceará.

CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre. Editora da UFRGS, 1992. p. 85-97.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H. et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome; FAO, 1977. 194p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 1992.

DUFRANC, G.; DECHEN, S. C. F.; FREITAS, S. S. e CAMARGO, O. A.. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2004, vol.28, n.3, pp. 505-517. ISSN 0100-0683.

DURNEY, C. H. **Circuitos elétricos: teoria e aplicação em engenharia**. Rio de Janeiro: Campus, 1985. 485 p.

ELLIES, A., GREZ, R., RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, v.5, p.51-56, 1997.

EL-MOWELLHI, N.M.; van SHILFGAARDE, J. **Computation of soil hydrological constants from field drainage experiments in some soils in Egypt**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.25, p.77-79. 1982.

FAO. **Sustainable management of water resources for agricultural development**. In: The world of agriculture. Hong Kong: FAO, 1993. p.110-112.

FAO. **Es necesario mejorar las prácticas agrícolas**. Março de 2007. Disponível em: https://www.fao.org.br/vernoticias.asp?id_noticia=46. Acesso em: 19 de outubro de 2007.

FAO (Roma, Italy). **Agricultural production, primary crops**. Disponível: FAO. URL: <http://apps.fao.org/page/collections Subset=agriculture>. Consultado em 18 abril de 2010. 2006.

FAVARIN, J.L.; VILLA NOVA, N.A.; ANGELOCCI, L.R.; DOURADO-NETO, D.; BERNARDES, M.S. Estimativa do consumo hídrico do cafeeiro em função de parâmetros climatológicos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p.235-240, 2002.

FERREIRA, M. N. L. **Distribuição radicular e consumo de água de goiabeira (*Psidium guajava L*) irrigada por microaspersão em Petrolina-PE**. 2004. 106 f, Tese (Doutorado em irrigação): Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

HICKEY, H. V. **Elements of electronics**. New York: McGraw-Hill, 1961. 549 p.

HILLEL, D. **Soil water-physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971. Cap 1-5.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring hydraulic characteristics “in situ”. **Soil Science**, v. 144, p. 395-400, 1972.

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

HOROWITZ, P.; HILL, W. **The Art of Electronics**. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 450 p.

HURTADO, A. L. B. **Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial**. Piracicaba, SP. 2004. 94 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2004.

IBGE. **Censo agropecuário**. 2008. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/>. Acesso em 18 de abril de 2010. 2009.

JURY, W.A.; GARDNER, W.R., GARDNER, W.H. **Soil physics**. 5 ed. Ney York: John Wiley; Sons, 1991. 328p.

KLAR, A.E. **Água no sistema**. 2ª ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

KLEIN, Vilson Antonio e LIBARDI, Paulo Leonel. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Cienc. Rural** [online]. 2002, v. 32, n. 6, pp. 945-953. ISSN 0103-8478.

LIBARDI, P.L. et al. Simple field methods for estimating hydraulic conductivity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.3-7, 1980.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no Solo**. Editado pelo autor, 1999. 497 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2.ed. Piracicaba: O próprio, 2004. 509 p.

MARINHO, F.A.M. OLIVEIRA, O.M. **The filter paper method revisited**. *Geotech. Test. J.*, 29:1-9, 2006.

MIGUEL, M. G. TEIXEIRA, R. S. PADILHA, A. C. C.; Curvas Características de sucção do solo laterítico da região de Londrina/PR. **Revista de Ciência e Tecnologia**. V. 12, n. 24, p. 63 – 74, 2006.

MIRANDA, J.H.; PIRES, C.M.P. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001. 410p.(Série Engenharia Agrícola, 1).

MIRANDA, F. R.; OLIVEIRA, J. J. G.; SOUZA, F. Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultivo para a cultura da melancia irrigada por gotejamento. **CE. Rev. Ciência Agrônômica**. vol. 25 n.1. jan.-jun. p. 36-43. Fortaleza. 2004.

MONTENEGRO, A. A. T.; **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do mamoeiro obtidos através do método do balanço hídrico para região litorânea do Ceará**. 2002. 76p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade federal do Ceará.

MONTENEGRO, A. A. T.; GONDIM, R. S.; BEZERRA, M. A.; COSTA, C. A. G.; SABINO, K. V. **Distribuição do sistema radicular da bananeira na microrregião do Baixo Jaguaribe, Ceará**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Fruticultura, 2004, Florianópolis. XVIII Congresso Brasileiro de Fruticultura. Florianópolis : SBF, 2004.

MOREIRA, H.J.C.; **Manual prático para o manejo da irrigação**. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação – SENIR, Projeto BRA/87/008 – PNUD/OMN. Brasília, 86 p. 1992.

MOREIRA, L. C. J.; **Avaliação do Algoritmo SEBAL na Melancia Irrigada através do monitoramento da evapotranspiração usando Balanço Hídrico e Eddy Correlation**. Fortaleza, CE. 2009. 79 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

NADLER, A.; LAPID, Y. **An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture**. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 34, n. 3, p. 361-368, 1996.

- OLIVEIRA, A. D. S. de.; **Avaliação do sensor de umidade FDR no manejo da irrigação.** Fortaleza, CE. 2008. 65 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.
- PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. **Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration.** Soil Sci. Soc. Am. J., Madison-WI, v. 61, 1576-1585, nov-dec, 1997.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- PIMENTEL GOMES, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária.** Piracicaba: POTAFOS, 1987. 160p.
- PLATER, C.V. **A portable capacitance-type soil moisture meter.** Soil Science, v. 80, p. 391- 395, 1955.
- PRESA, E.P. **Deformabilidade de las Arcilas Expansivas bajo Succión Controlada.** Tese Doutorado, E. T. S. de Ing. de caminos canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 1982.
- PREVEDELLO, C.L. **Física do solo. Com problemas resolvidos.** Curitiba. 446 p. 1996.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Editora Manole, 1987. 188 p.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 3.** 4ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 1992. 303 p.
- RICHARDS, L. A., **Physical conditions of water in soil.** In: C. A. BLACK, D. D. EVANS, J. L. WHITE, L. E. ENSMINGE and F. E. CLARK, ed. Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASA-SSSA, 1965. p.128-152.
- RODRIGUES, J. **Uma revisão da análise de experimentos unifatoriais com tratamentos de natureza quantitativa: Comparações Múltiplas ou Análise de Regressão.** 2011. 140p.: II. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.
- RUTH, B. **A capacitance sensor with planar sensitivity for monitoring soil water content.** Soil Sci. Soc. Am. J., v. 63, p. 48-54, 1999.
- SANTOS, G. A. de S. **Uso consultivo da cultura do melão (Cucumis melo L.)** 1985. 71f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 1985.

SCHERPINSKI, C; URIBE-OPAZO, M.A.; VILAS BOAS, M.A.; SAMPAIO, S.C.; JOHANN, J.A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.32, p.7-13, 2010

SIEMENS. **Sensores e redes de sensoriamento – AS interface**. Seminários Técnicos, Engenheiros e Projetistas, 56 p. Maio de 2003. Disponível em: <http://mediaibox.siemens.com.br/upfiles/1750.pdf>. Acesso em: 17 de Maio de 2007.

SILVA, E. N. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da bananeira pelo método do balanço hídrico nas condições do Vale do Curu**. 2004. 68 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará.

SILVA, I. O. ; TEIXEIRA, A. S. ; CANAFISTULA, F. J. F.; LEÃO, R. A. O. **Development of a capacitive sensor for monitoring soil moisture**. In: 2005 ASAE Meeting, 2005, Tampa Bay. Proceedings of the 2005 ASAE Meeting. St. Joseph : ASAE, 2005.

SOARES, J. I.; COSTA, R. N. T.; SILVA, L. A. C.; GONDIM, R. S. Função de resposta da melancia aos níveis de água e adubação nitrogenada, no Vale do Curu, CE. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** v.6 n.2. Campina Grande. 2002.

STOCKTON, J. G.; WARRICK, A. W. Spatial variability of unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of American Proceedings**, v. 35, p. 847-848, 1971.

THOMAS, A.M. **In situ measurement of moisture in soil similar substances by ‘fringe’ capacitance**. J. Sci.Instrum., v. 43, p. 21-27, 1966.

THORNTHWAITTE, C. W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geographical Review, v.38, p.55-94, 1948.

TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; TORMENA, C. A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. **Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um nitossolo vermelho distroférico**. Acta Scientiarum, Maringá, vol. 23, nº 5, p. 1165-1171, 2001.

VAN LIER, J. Q.; LIBARDI, P. L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 23: p. 1005-1014, 1999.

WARRICK A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.

WATSON, K.K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, Washington, v.2, p.709-715, 1966.

WOBSHALL, D. 1978. **A frequency shift dielectric soil moisture sensor**. IEEE Trans. Geoscience Electronics 16: 112-118.

YODER, R.E.; JOHNSON, D.L.; WILKERSON, J.B.; YODER, D.C. **Soil water sensor performance**. American Society of Agricultural Engineers, v. 14, n. 2, p. 121-133, 1998.

CAPÍTULO 2 – Uso do sensor FDR em substituição ao tensiômetro de mercúrio

RESUMO

A crescente preocupação em produzir mais, utilizando menos recursos naturais tem direcionado as pesquisas para o desenvolvimento de produtos cada vez mais precisos. Como exemplo se pode citar os dispositivos eletrônicos utilizados na agricultura de precisão. Os sensores de umidade do solo utilizados são os do tipo capacitivo, produzidos no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA), pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC). Os sensores foram calibrados, para umidade do solo, através de uma análise de regressão entre as leituras de frequências emitidas e as respectivas umidades das amostras de solo e também para tensão através de regressão entre a frequência e a tensão observada em um tensiômetro de mercúrio instalado na amostra na mesma profundidade do sensor. A validação em campo deu-se através de uma análise comparativa entre as tensões obtidas pelos sensores FDR e pelos tensiômetros, além das umidades, estimadas por ambos os equipamentos. A análise de regressão, para umidade em função da frequência ($\theta = 0.528873949 * e^{(-0,000579231 \times f)}$) apresentou um R² ajustado de 0,9973 e um erro padrão de 0,0242. A análise de regressão, para tensão em função da frequência ($T = 0.557984019 * e^{(0,001465478 \times f)}$) apresentou um R² ajustado de 0,9474. A comparação entre as tensões medidas e estimadas, pela equação de ajuste, alcançou desempenho forte e/ou ótimo em todos os itens analisados. A análise de regressão, para umidade em função da tensão ($\theta = 0.4082 * T^{(-0,371)}$) medida apresentou um R² ajustado de 0,9704. O teste de média (student), entre as tensões medidas em campo, por ambos os equipamentos, para as diferentes camadas de solo não rejeitou a hipótese de nulidade, pois os valores de t calculado 0,0001; 0,0079 e 0,0036 respectivamente para as camadas 0 – 15; 15 – 30 e 30 – 45 cm foram menores que o tabelado (t=2,779) com 26 graus de liberdade e $\alpha=0,01$ unilateral. Pode-se concluir através das análises dos parâmetros estatísticos durante as etapas de calibração em laboratório e validação em campo, que o uso de sensores FDR é perfeitamente aplicável para a substituição dos tensiômetros de mercúrio, no que tange o monitoramento do potencial da água no solo e conseqüentemente a umidade com o auxílio da curva característica de retenção da água no solo.

Palavras-chave: Sensor FDR. Agricultura de precisão. Eletrônica na agricultura.

ABSTRACT

A growing concern in producing more while using less natural resources has driven research to develop products that are more accurate. As an example, one can cite the electronic devices used in precision agriculture. The soil moisture sensors used are the capacitance type, produced in the Laboratory of Electronics and Mechanical Agricultural (LEMA), Department of Agricultural Engineering (DENA) belonging to the Federal University of Ceará (UFC). The sensors were calibrated for soil moisture, using regression analysis between the frequencies emitted and its respective values of moisture and also between frequencies and water tension observed on a mercury type tensiometer installed in the sample at the same depth as the sensor. Field validation was accomplished through a comparative analysis between the tensions obtained by the FDR sensors and by the tensiometers, besides the values of soil moisture estimated by both devices. The regression analysis for moisture as a function of frequency ($\theta = 0.528873949 * e^{(-0.000579231 \times f)}$) showed an adjusted R² of 0.9973 and a standard error of 0.0242. The regression analysis for tension as a function of frequency ($T = 0.557984019 * e^{(0.001465478 \times f)}$) showed an adjusted R² of 0.9474. The comparison between the measured and estimated tensions, for the adjustment equation, achieved a strong and / or optimum performance on all items analyzed. The regression analysis for moisture as a function of tension ($\theta = 0.4082 * T^{(-0.371)}$) produced an adjusted R² of 0.9704. The student test applied to tensions measured in the field, both for equipments and the different soil layers did not reject the null hypothesis, as can be notice, the computed t values of 0.0001, 0.0079 and 0.0036, respectively to layers 0-15, 15-30 and 30 - 45 cm were lower than the tabulated values (t = 2.779) with 26 degrees of freedom and $\alpha = 0.01$ one sided test. One can conclude, by analysis of the statistical parameters during calibration steps in laboratory and field validation, that FDR sensors are suitable for replacing standard mercury tensiometers for monitoring soil water potential and, consequently, soil moisture with the help of soil water retention curve.

Palavras-chave: FDR Sensor. Precision Agriculture. Electronics in agriculture.

2.1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação em produzir mais, utilizando menos recursos naturais tem direcionado as pesquisas para o desenvolvimento de produtos cada vez mais precisos. Como exemplo se pode citar os dispositivos eletrônicos utilizados na agricultura de precisão.

Os sensores de umidade do solo utilizados são os do tipo capacitivo, produzidos no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA), pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC). São confeccionados na forma retangular em placas de circuito impresso (fibra de vidro, com uma fina camada de cobre em um dos lados), com espessura, largura e tamanho aproximados de 0,2 cm, 3 cm e 15 cm, respectivamente (Figura 2.1). As placas são posicionadas paralelamente definindo os eletrodos do capacitor, separadas em 0,5 cm e cobertas por um verniz que serve tanto para evitar oxidação das placas de cobre, devido o contato com o solo, como para eliminar o efeito da condutância elétrica da carga através do dielétrico (RENDE e BIAGE, 2002). A área da placa que constitui o campo elétrico é de 25,48 cm². O sensor é composto de um oscilador, cuja frequência é definida pelo capacitor que pode variar o dielétrico e por um resistor fixo de 10 k Ω . O sensor pode ser observado na Figura 2.2.

Figura 2.1 – Visão periférica do sensor FDR



Figura 2.2 – Sensor pronto para instalação



Fonte: Produção do próprio autor

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos preliminares para o uso do sensor FDR, em substituição ao tensiômetro com mercúrio, começaram em 2008 no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará. No ano de 2009 ocorreu a primeira fase de experimentos, em campo, para validação das equações de calibração.

2.2.1 Calibração dos sensores

Os sensores foram calibrados, para umidade do solo, através de uma análise de regressão entre as leituras de frequências emitidas e as respectivas umidades das amostras de solo e também para tensão através regressão entre a frequência e a tensão observada em um tensiômetro de mercúrio instalado na amostra na mesma profundidade do sensor.

a) Coleta e preparação das amostras de solo para calibração do sensor

Para calibração dos sensores as amostras de solo, da área experimental, foram coletadas na camada de solo de 0 – 30 cm, em um recipiente de PVC com altura de 30,0 cm e diâmetro de 25,0 cm. O recipiente possuía, em sua parte inferior, uma manta para evitar a perda de solo.

As amostras foram retiradas de modo a evitar a deformação das mesmas. O processo de retirada se deu com o solo previamente umedecido e o recipiente foi introduzido, com o auxílio de peso de metal.

As amostras foram levadas ao Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, e submetidas à saturação por capilaridade. O processo de saturação por capilaridade deu-se através da utilização de uma caixa de água, com capacidade de 1.000 L, onde as amostras foram colocadas. A coluna de água na caixa foi elevada de forma a ficar aproximadamente 5,0 cm abaixo da borda da amostra. O processo de saturação deu-se por um período superior a 24 horas.

O passo seguinte foi colocar as amostras, uma a uma, em uma balança composta por uma estrutura de metal para apoio da amostra e por uma célula de carga da ALFA Instrumentos, com capacidade máxima de 50,0 kg (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Estrutura utilizada como balança e visão da amostra sobre a mesma.



Fonte: Produção do próprio autor

b) Calibração da balança

A calibração da balança foi realizada adicionando-se paulatinamente peças de metal, com peso obtido em balança com precisão de 0,01 g, e as leituras da célula de carga que foram capturadas através de uma placa de aquisição de dados modelo TD40, da empresa TERN. O programa hiperterminal do Windows transformava as leituras em arquivo do tipo txt (Figura 2.4). Os dados foram processados através de uma análise de regressão no Software Excel, obtendo-se assim a equação de melhor ajuste entre leitura da célula de carga e o peso real ao qual a balança era exposta.

Figura 2.4 – Equipamentos utilizados para capturar os dados da célula de carga e leitura do sensor



Fonte: Produção do próprio autor

c) Obtenção da umidade do solo

Após a saturação do solo, o mesmo sofreu processo de secagem. Como o único fator de diferenciação nos dados adquiridos pela célula de carga foi a perda de água por evaporação e drenagem, os valores de umidade do solo foram obtidos através da diferença entre as leituras realizadas durante o processo de secagem do solo.

A umidade foi determinada primeiramente em base de massa e posteriormente transformada em base de volume, usando a densidade realtiva do solo que é a densidade do solo em relação à densidade da água a 4 °C.

Encontrado o valor da massa da água, calculou-se o volume da mesma fazendo-se uso da Equação 9 para o cálculo da densidade da água.

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a}, \quad (2.1)$$

onde: ρ_a é a densidade da água (kg dm^{-3}) e V_a é o volume da água (dm^3).

Deduzindo-se a Equação 9, tem-se então a Equação 8 para o volume da água.

$$V_a = \frac{m_a}{\rho_a} \quad (2.2)$$

O volume da amostra será determinado através do volume do recipiente de coleta utilizando-se da Equação 10.

$$V_s = \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) \times h, \quad (2.3)$$

onde: V_s é o total da amostra (m^3) e D é a diâmetro do recipiente (m).

d) Obtenção da tensão da água no solo

Nas amostras de solo saturadas instalou-se um sensor FDR e um tensiômetro de mercúrio a 15,0 cm de profundidade, representando assim, a faixa média da amostra. O sensor e a célula de carga foram ligados a um computador, através de uma porta serial. As leituras coletadas no computador foram realizadas a cada três segundos, formando assim um banco de dados que foi posteriormente analisado (Figura 2.5). As frequências também foram anotadas em planilhas, juntamente com as respectivas leituras da célula de carga e do tensiômetro de mercúrio, que foram coletadas manualmente. Inicialmente, na primeira hora, as leituras no tensiômetro foram tomadas a cada 10 min e depois a cada meia hora, no primeiro dia, nos dias seguintes as leituras foram coletadas duas vezes por dia até que a leitura do tensiômetro atingisse 75,0 kPa.

Figura 2.5 – Sistema de aquisição de dados via hiper-terminal.



Fonte: Produção do próprio autor

e) As análises estatísticas

Os dados coletados foram analisados por análises de regressão entre umidade da amostra de solo e entre frequência emitida pelo sensor e também entre as tensões e

frequências, por meio do software SAEG 9.1 da Universidade Federal de Viçosa. A obtenção da curva de retenção foi realizada no software SWRC 3.0, segundo a metodologia de Van Genuchten (1980).

As curvas de estimativas de ajustes foram traçadas com o auxílio do software Microsoft Excel. O mesmo programa foi usado para comparar as diferentes curvas, dos diferentes parâmetros analisados.

Para avaliar o desempenho das equações (modelos) geradas na análise de regressão, durante a calibração, fez-se uso dos critérios utilizados por Rodrigues *et al.* (2007); Batista *et al.* (2006), que se basearam no coeficiente de determinação (r^2), que indica o grau de correlação entre as variáveis independentes e a variável dependente; coeficiente de correlação de Pearson (r , ver Equação 2.4); o índice de concordância (d , ver Equação 2.5), proposto por Willmott (1981), e que indica o grau de precisão da equação, podendo assumir valores que variam de zero, para nenhuma concordância, a um, para concordância perfeita. Por fim, foi analisado o índice de confiança do modelo (c , ver Equação 2.6) o qual reúne as indicações dos dois coeficientes, r e d , conforme proposto por Camargo; Sentelhas (1997).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Tm_i - \overline{Tm})(Te_i - \overline{Te})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Tm_i - \overline{Tm})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Te_i - \overline{Te})^2}} \quad (2.4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Te_i - Tm_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Te_i - \overline{Tm}| + |Tm_i - \overline{Tm}|)^2} \quad (2.5)$$

Em que: Tm_i = valor da tensão medida, kPa; \overline{Tm} = média dos valores de tensão medida, kPa; Te = valor da tensão modelada, kPa; \overline{Te} = média dos valores de tensão modelada e n = número de medições.

$$c = r \times d \quad (2.6)$$

Para a escolha do modelo que melhor represente o ajuste da tensão da água no solo, medida com o tensiômetro de mercúrio, versus a frequência emitida pelo sensor FDR, considerou-se o coeficiente de determinação, escala de correlação de Pearson e o índice de confiança de desempenho (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Escala do coeficiente de determinação, coeficiente de correlação de Pearson e do Índice de Confiança

Escala de Pearson / r^2		Índice de confiança	
Intervalos	Desempenho	Intervalos	Desempenho
$0 \leq r^2 < 0,25$	Fraco	$c \leq 0,40$	Péssimo
$0,25 \leq r^2 < 0,81$	Moderado	$0,40 < c \leq 0,50$	Mau
$0,81 \leq r^2 \leq 1$	Forte	$0,50 < c \leq 0,60$	Sofrível
$0 \leq r < 0,50$	Fraco	$0,60 < c \leq 0,65$	Mediado
$0,50 \leq r < 0,90$	Moderado	$0,65 < c \leq 0,75$	Bom
$0,90 \leq r \leq 1$	Forte	$0,75 < c \leq 0,85$	Muito bom
-	-	$c > 0,85$	Ótimo

Fonte: Produção do próprio autor

Coeficiente de determinação (r^2); coeficiente de correlação de Pearson (r); índice de confiança (c). adaptado de Camargo e Sentelhas (1997)

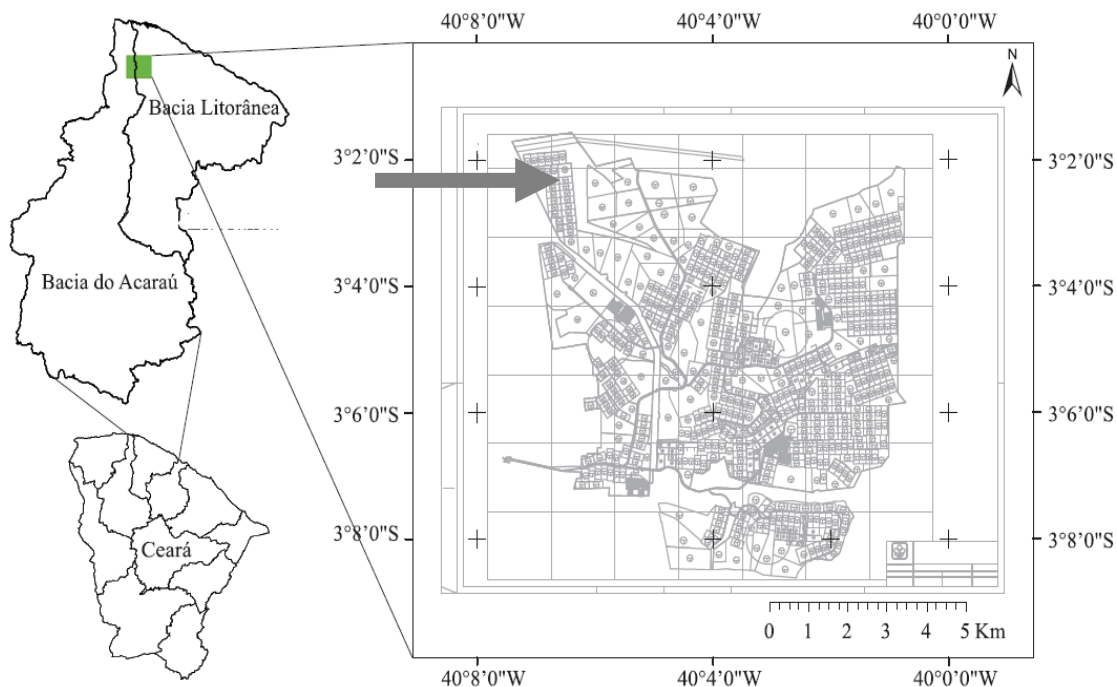
2.2.2 Validação da equação de calibração, a campo, do sensor FDR para tensão.

A validação em campo deu-se através de uma análise comparativa entre as tensões obtidas pelos sensores FDR e pelos tensiômetros, além das umidades, estimadas por ambos os equipamentos.

a) Área de estudo experimental

A área experimental de 1,0 ha foi cultivada com a cultura da melancia cv. Topson Sweet, sendo a mesma implantada no Lote agrícola C70/1/D1 do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú (Figura 2.6) no período de outubro a dezembro de 2009. O Lote em questão pertence ao grupo de pequenos produtores, tendo a área total padronizada em aproximadamente 8,0 ha. Este tipo de Lote possui uma vazão de entrada limitada a $33,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, e que também limita o dimensionamento de seus sistemas de irrigação.

FIGURA 2.6 – Identificação da área experimental.



Fonte: Produção do próprio autor

O solo foi classificado como Neossolo Quartzarênico, de textura arenosa (EMBRAPA, 2006). Os parâmetros de densidade aparente, capacidade de campo (0,01 MPa) e ponto de murcha (1,5 MPa), para as três camadas encontram-se descritos na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2.2 – Densidade, capacidade de campo e ponto de murcha para as diferentes camadas de solo da área experimental.

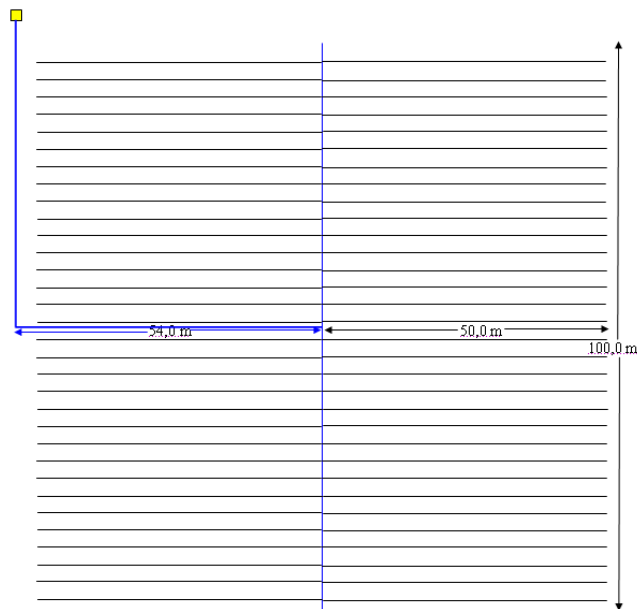
Camada (cm)	Densidade do solo (kg m^{-3})	Capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Ponto de murcha ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
0 – 15	1.558,92	0,1559	0,0245
15 – 30	1.626,71	0,1737	0,0292
30 – 45	1.600,89	0,1880	0,0343

Fonte: Produção do próprio autor

A área experimental contou com 32 linhas de plantio de melancia, sendo as mesmas espaçadas de 3,0 m (Figura 2.7). As covas foram espaçadas a cada 0,9 m, onde foram

semeadas duas sementes a fim de garantir pelo menos uma planta por cova, totalizando aproximadamente 3.500 plantas ha⁻¹.

Figura 2.7 – Croqui da área experimental para validação da equação de calibração.



Fonte: Produção do próprio autor

A área recebeu uma adubação de pré-plantio com nitrogênio, fósforo e potássio nas quantidades de 17,0; 42,0 e 16,0 kg ha⁻¹ respectivamente, oriundos de sulfato de amônio, fosfato super simples e cloreto de potássio. Uma dosagem de micronutrientes foi aplicada com os macronutrientes, através de FTE BR-12, na dosagem de 60 kg ha⁻¹. Durante a condução da cultura a mesma recebeu, via fertirrigação, as seguintes dosagens por hectares: Nitrogênio (N) – 100,0 kg; Fósforo (P) – 80,0 kg; Potássio (K) – 90,0 kg e Cálcio (Ca) – 18,0 kg.

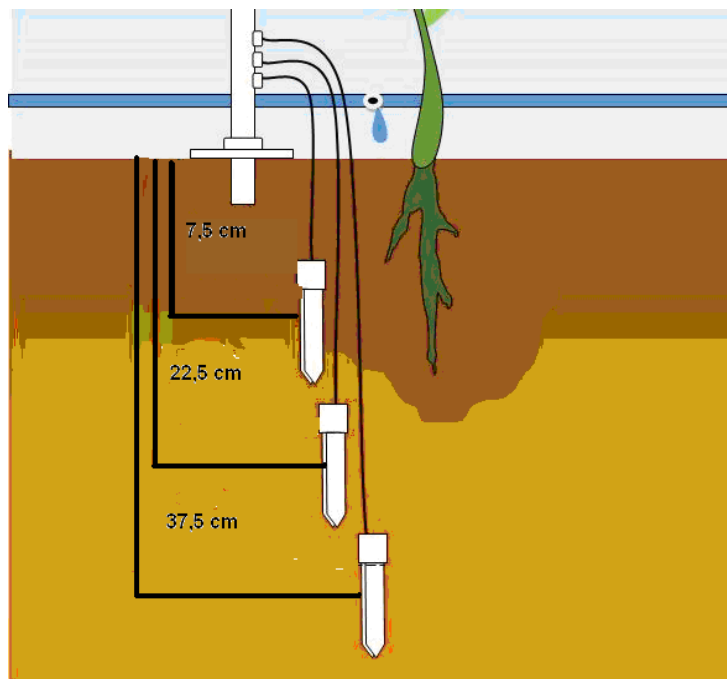
O sistema de irrigação era composto por fita gotejadora, com três emissores por metro linear e uma vazão por emissor da ordem de 1,49 L h⁻¹ a uma pressão de serviço de 0,9 atm.

b) Instalação dos sensores FDR

Os sensores FDR e tensiômetros foram instalados nas profundidades de 7,5; 22,5 e 37,5 cm, representando, portanto as camadas de solo 0 – 15 cm, 15 – 30 cm e 30 – 45 cm

(Figura 2.8). Os equipamentos foram instalados no décimo dia após o plantio, com o estabelecimento da cultura, respeitando uma distância aproximada de 10,0 cm da linha de irrigação.

Figura 2.8 – Perspectiva de instalação dos sensores FDR.



Fonte: Produção do próprio autor

Foram instaladas seis baterias, na área experimental, sendo três de tensiômetros e três de sensores FDR. As baterias foram distribuídas na área de forma que as linhas sorteadas possuíam uma bateria de cada equipamento e com distanciamento máximo de 50 cm entre si.

Os dados para validação foram coletados diariamente, antes da primeira irrigação do dia. Os dados coletados dos sensores FDR eram em frequência (kHz) e os dados dos tensiômetros com mercúrio em centímetro de coluna de mercúrio (cmHg).

Os dados brutos foram lançados em uma planilha do Microsoft Excel, que continham já embutidas as equações de calibração, onde retornaram os dados processados para tensão (kPa) e para umidade ($m^3 m^{-3}$).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Calibração dos sensores

A amostra de solo saturada apresentou uma massa total de 27.850,0 gramas e sua massa após secagem em estufa foi de 22.471,03 g. Portanto, a água equivaleu em massa a 5.378,97 g, ocupando no momento da saturação um volume aproximadamente 5,379 dm³. Pode-se dizer então que a umidade de saturação da amostra, com base em massa (u), foi de 23,94%.

A amostra de solo apresentou um volume de 14,04 dm³ ou 14,04 L, com uma densidade aparente de 1,6 Mg m⁻³ estando, portanto entre os limites de densidades de solos de textura arenosa e franco-arenosas, que variam entre 1,20 até 1,80 g cm⁻³ (Brady, 1989).

$$V_s = \left(3,14 \times \frac{2,55^2}{4}\right) \times 2,75 \approx 14,04 dm^3$$

O resultado para densidade aparente confirma que a amostra não sofreu compactação durante os processos de coleta e saturação.

Com os dados do volume de água contida na amostra e o volume total da mesma encontrou-se uma umidade com base em volume (θ) para a amostra saturada de 0,383 dm³ dm⁻³ ou m³ m⁻³.

$$\frac{V_a}{V_s} = \frac{5,379 dm^3}{14,04 dm^3} = 0,383 dm^3 dm^{-3}$$

A amostra perdeu água, tanto pelo processo de percolação, como por evaporação, o que tornava necessário recalcular a umidade e tomar nota da nova frequência emitida pelo sensor e da nova altura da coluna de mercúrio. O processo se repetiu até a coluna de mercúrio atingir 75,0 kPa, o que representou uma umidade de $\theta = 0,08 m^3 m^{-3}$ (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Frequência, tensão e umidade do solo (Θ) durante o período de calibração dos sensores em laboratório.

FREQ (kHz)	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	FREQ (kHz)	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
548,00	0,58	0,383	1415,00	3,92	0,241
781,00	1,84	0,344	1426,00	3,92	0,237
786,50	1,96	0,340	1432,00	3,95	0,234
789,00	1,96	0,337	1459,33	4,09	0,230
792,00	1,96	0,333	1535,00	4,30	0,226
805,25	2,06	0,330	2091,50	10,93	0,155
833,67	2,17	0,326	2127,00	11,05	0,152
923,50	2,56	0,301	2260,00	12,23	0,145
951,00	2,78	0,298	2402,00	18,86	0,137
989,67	2,85	0,294	2523,00	21,76	0,130
1035,00	3,14	0,290	2676,71	23,84	0,112
1129,00	3,17	0,276	2726,75	33,25	0,109
1134,00	3,23	0,273	2788,00	50,41	0,105
1136,00	3,23	0,269	2854,00	54,06	0,102
1138,67	3,25	0,266	3130,00	67,44	0,084
1163,33	3,33	0,262	3153,75	75,52	0,080
1228,80	3,46	0,258			

Fonte: Produção do próprio autor

a) Análises estatísticas das calibrações

As análises de regressão foram realizadas com os trinta e três dados de frequência, tensão e umidade, apresentados na Tabela 2.4.

A análise de regressão, para umidade em função da frequência apresentou um R^2 ajustado de 0,9973 e um erro padrão de 0,0242, além de um elevado grau de significância (Tabela 2.5) para a seguinte equação exponencial, Equação 2.7.

$$\theta = 0.528873949 * e^{(-0.000579231 \times f)} \quad (2.7)$$

Onde: θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e f é a frequência emitida pelo sensor em kHz.

O uso de equação exponencial discorda com alguns autores como Topp et al. (1980) e Silva et al. (2005), que ao trabalharem com este tipo de instrumento concluíram que a equação de melhor ajuste é a do tipo polinomial do 3º grau. Porém dependendo do intervalo de dados utilizados para a realização da calibração este tipo de equação pode apresentar dados sem consistência no momento da utilização a campo, como por exemplo, superestimar a umidade para valores de frequência elevados, conforme observado na figura 2.9, em de que

quanto maior a frequência, mais superestimado será o valor de umidade pela equação polinomial. Tal fato nos levou a adotar, portanto, a equação de ajuste do tipo exponencial.

Tabela 2.4 – Análise de variância para calibração do sensor, para determinação da umidade com base na frequência emitida pelo mesmo.

R múltiplo	0.9987
R-Quadrado	0.9974
R-quadrado ajustado	0.9973
Erro padrão	0.0242
Observações	33

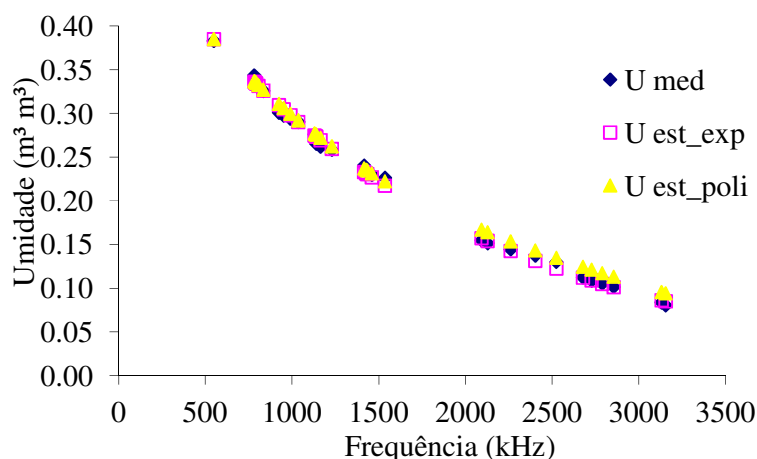
ANOVA	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	6.86357509	6.863575	11759.69916	1.45E ⁻⁴¹ **
Resíduo	31	0.01809322	0.000584		
Total	32	6.881668311			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Constante	0.528873949	0.009432734	-67.5313	3.23576E ⁻³⁵
Expoente	-0.000579231	5.34139E ⁻⁰⁶	-108.442	1.44723E ⁻⁴¹

** Significativo a 1,0%

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 2.9 – Valores de umidade do solo (Θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) medidas e estimadas pelas equações exponencial e polinomial, em função da frequência (kHz).



Fonte: Produção do próprio autor

A análise de regressão, para tensão em função da frequência apresentou um R^2 ajustado de 0,9474 e um erro padrão de 0,2759, além de um elevado grau de significância (Tabela 2.5) para a seguinte equação exponencial:

$$T = 0.557984019 * e^{(0,001465478 \times f)} \quad (2.8)$$

Onde: T é a tensão da água no solo (kPa) e f é a frequência emitida pelo sensor em kHz.

Tabela 2.5 – Análise de variância para calibração do sensor, para determinação da tensão com base na frequência emitida pelo mesmo.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0.9742
R-Quadrado	0.9490
R-quadrado ajustado	0.9474
Erro padrão	0.2759
Observações	33

ANOVA	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	43.93441781	43.93442	577.0195	1.34525E ⁻²¹ **
Resíduo	31	2.360348385	0.07614		
Total	32	46.2947662			

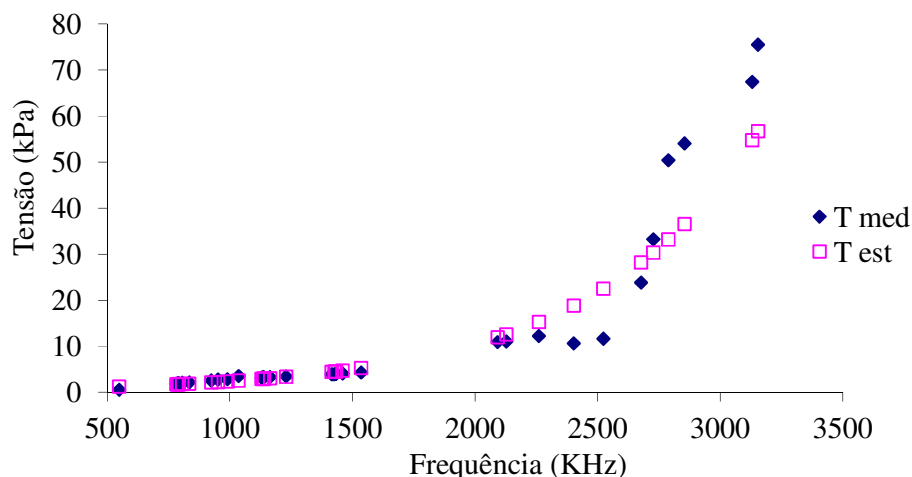
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Constante	0.557984019	0.107737703	-5.41523	6.53E ⁻⁰⁶
Expoente	0.001465478	6.10076E ⁻⁰⁵	24.02123	1.35E ⁻²¹

**Significativo a 1,0%

Fonte: Produção do próprio autor

Apesar do alto erro padrão de 27,59%, verificado, a análise de variância aponta um erro padrão de apenas 10,77%. Tal fato possibilitou uma boa correlação dos dados medidos e estimados para tensão, com as maiores variações a partir dos 30,0 kPa (Figura 2.10). As variações nas leituras do tensiômetro podem estar ligadas ao fato de algumas leituras terem sido executadas em horários com temperaturas elevadas e ao fato da necessidade de fluxagem e o tempo necessário para o sistema retornar ao equilíbrio.

Figura 2.10 – Dados de tensão (kPa), medidos e estimados em função da frequência (kHz).



Fonte: Produção do próprio autor

A comparação entre as tensões medidas e estimadas, pela equação de ajuste, alcançou desempenho forte e/ou ótimo em todos os itens analisados (Tabela 2.1), sendo $r=0,9837$; $d=0,986$ e $c=0,97$. O teste de média (student), entre as tensões medidas e modeladas, não rejeitou a hipótese de nulidade, pois o t calculado ($t=0,1646$) foi menor que o tabelado ($t=2,7362$) com 32 graus de liberdade e $\alpha=0,01$ unilateral.

A análise de regressão, para umidade em função da tensão medida apresentou um R^2 ajustado de 0,9704 e um erro padrão de 0,015, além de um elevado grau de significância (Tabela 2.6) para a seguinte equação exponencial.

$$\theta = 0.4082 * T^{(-0,371)} \quad (2.9)$$

Onde: θ é a umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) e T é a tensão em kPa, calculada com o auxílio do tensiômetro.

Tabela 2.6 – Análise de variância para determinação da umidade do solo com base na tensão calculada por meio do tensiômetro de mercúrio.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0.9862
R-Quadrado	0.9726
R-quadrado ajustado	0.9704
Erro padrão	0.0150
Observações	33

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	0.250477429	0.250477429	1100.696162	$8.74405E^{-26}$ **
Resíduo	31	0.007054445	0.000227563		
Total	32	0.257531873			

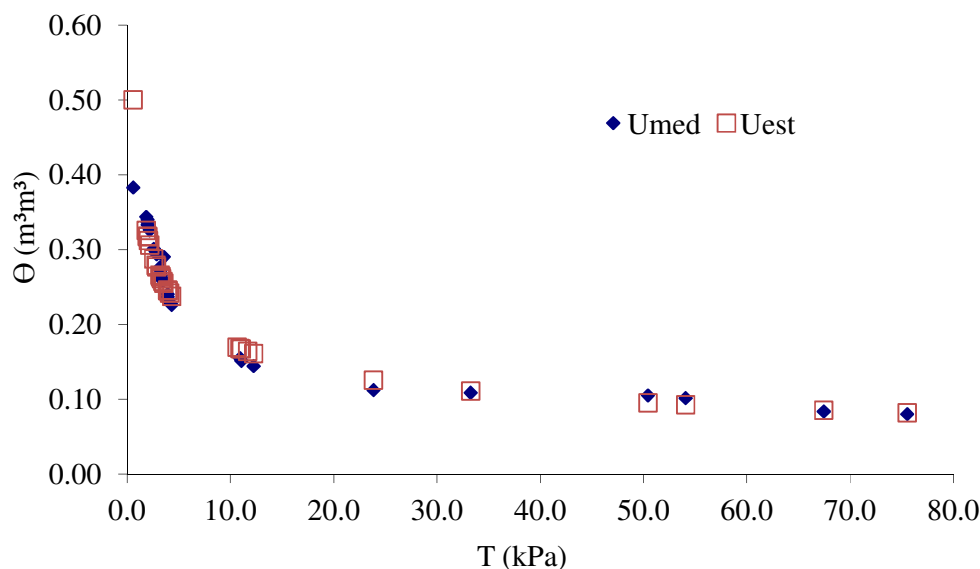
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Constante	0.4082	0.00473854	76.59056693	$6.68382E^{-37}$
Expoente	-0.371	0.00227587	33.17674127	$8.74405E^{-26}$

**Significativo a 1,0%

Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 2.11 apresentada abaixo retrata a disposição da umidade medida e a estimada, para cada tensão, com o auxílio da Equação 2.9.

Figura 2.11 – Dados de umidade do solo (Θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) medidos e estimados em função da tensão.



Fonte: Produção do próprio autor

Pôde-se observar pela Figura 2.11 que a equação de ajuste superestima a umidade solo nas tensões próximas a saturação, no entanto, é perfeitamente aplicável nas demais situações.

No intuito de confirmar a interação entre as variáveis estudadas, aplicou-se índice de correlação de Pearson, com o auxílio do Microsoft Excel, entre frequência e umidade, entre tensão e umidade e entre frequência e tensão, obtendo-se os seguintes resultados respectivamente para r : 0,986; -0,8 e 0,868.

Como o índice de correlação de Pearson (r), apresenta maior correlação entre as variáveis quanto próximos de -1 a 1. Os índices de correlação de Pearson encontrados corroboram para justificar os bons índices de ajuste das curvas, entre as variáveis.

2.3.2 Validação da equação de calibração, a campo, do sensor FDR para tensão.

Os dados para validação da equação de calibração são apresentados nas Tabelas expostas a seguir.

A Tabela 2.7 apresenta os dados brutos dos sensores FDR e a Tabela 2.8 os dados brutos dos tensiômetros de mercúrio.

Tabela 2.7 – Valores de tensão (kPa) e da respectiva umidade (Θ), nas três camadas de solo avaliadas de outubro a novembro de 2009, com base nos sensores FDR.

Período	0 – 15 cm		15 – 30 cm		30 – 45 cm	
	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Outubro	2.91	0.28	4.14	0.24	6.45	0.20
	2.53	0.29	4.30	0.24	6.93	0.20
	2.33	0.30	4.39	0.24	7.83	0.19
	2.10	0.31	3.94	0.25	6.52	0.20
	1.87	0.33	3.69	0.25	6.50	0.20
	2.18	0.31	3.68	0.25	6.14	0.21
	2.53	0.29	3.45	0.26	6.97	0.20
Novembro	2.43	0.30	3.25	0.27	5.03	0.22
	2.16	0.31	4.04	0.24	5.81	0.21
	2.25	0.31	3.61	0.25	4.99	0.23
	2.33	0.30	3.77	0.25	5.69	0.21
	2.52	0.29	3.63	0.25	5.68	0.21
	2.01	0.32	3.76	0.25	5.69	0.21
	2.20	0.31	4.08	0.24	5.53	0.22
	3.59	0.26	3.79	0.25	5.41	0.22
	5.94	0.21	3.78	0.25	5.24	0.22
	2.80	0.28	4.85	0.23	5.74	0.21
2.75	0.28	4.46	0.23	6.24	0.21	
4.12	0.24	3.38	0.26	4.50	0.23	

Fonte: Produção do próprio autor

As tensões com base nos dados dos sensores variaram, no mês de outubro, entre 1,87 a 2,91 kPa (2,1%), na camada de 0 – 15 cm; 3,45 a 4,39 kPa (27,2%), na camada de 15 – 30 cm e de 6,14 a 7,83 kPa (27,5%), na camada de 30 – 45 cm, o que ocasionou uma variação nas umidades de aproximadamente 10,7% (0,28 a 0,31 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), 8,3% (0,24 a 0,26 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 10,5% (0,19 a 0,21 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente. No mês de novembro as variações, nas tensões, foram respectivamente de 2,01 a 5,94 kPa (195,5%), 3,25 a 4,85 kPa (49,23%) e 4,5 a 6,24 kPa (38,7%) para as camadas 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 45 cm, provocando variações para umidades de 0,21 a 0,32 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (52,38%), de 0,23 a 0,27 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (17,39%) e de 0,21 a 0,23 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (9,52%), para as mesmas camadas.

Tabela 2.8 – Valores de tensão (kPa) e da respectiva umidade (Θ), nas três camadas de solo avaliadas de outubro a novembro de 2009, com base nos tensiômetros.

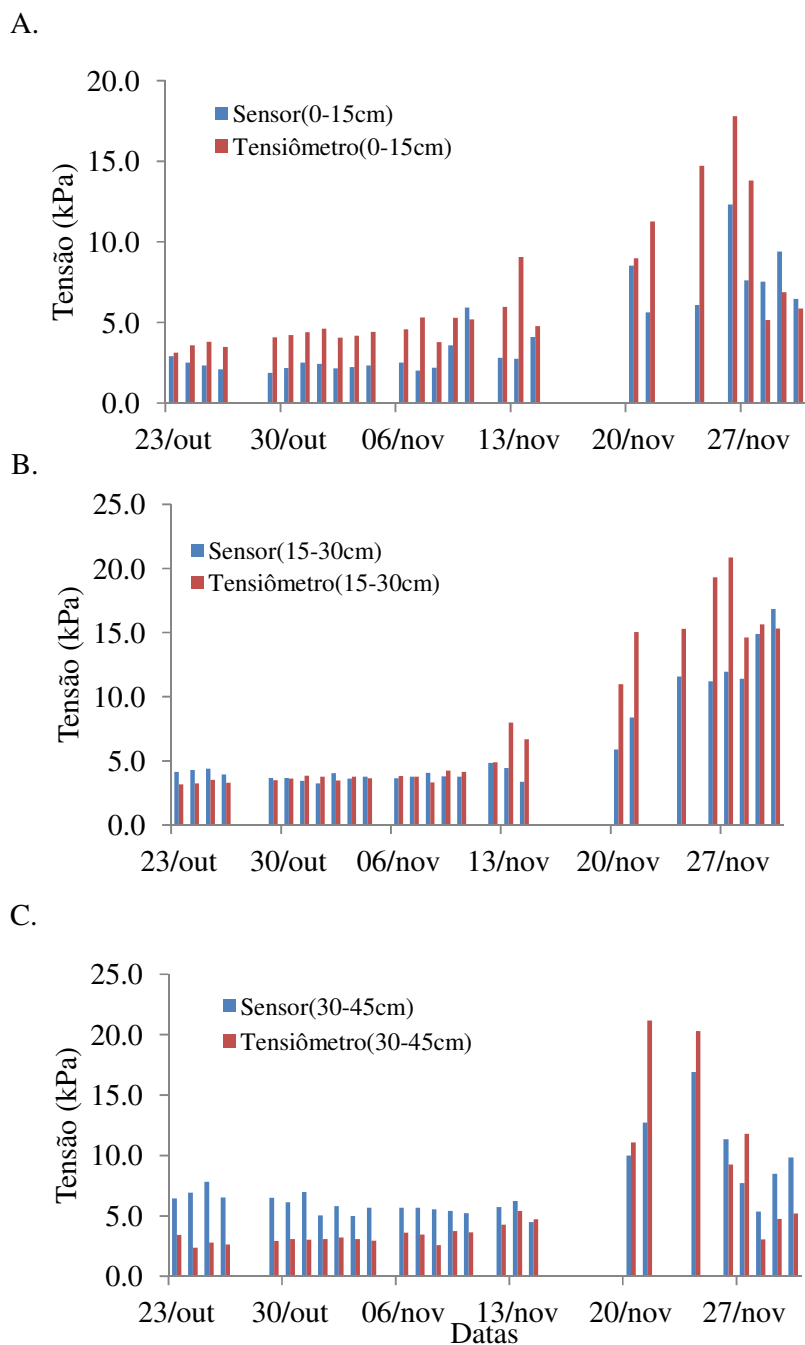
Período	0 – 15 cm		15 – 30 cm		30 – 45 cm	
	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	T (kPa)	Θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Outubro	3.12	0.24	3.17	0.29	3.42	0.27
	3.59	0.23	3.22	0.28	2.38	0.31
	3.81	0.23	3.51	0.27	2.79	0.29
	3.50	0.23	3.30	0.28	2.63	0.30
	4.09	0.22	3.49	0.27	2.92	0.29
	4.22	0.22	3.60	0.27	3.07	0.28
	4.42	0.21	3.84	0.27	3.01	0.28
Novembro	4.62	0.21	3.76	0.27	3.11	0.28
	4.06	0.22	3.48	0.28	3.23	0.28
	4.18	0.22	3.78	0.27	3.07	0.28
	4.44	0.21	3.66	0.27	2.95	0.28
	4.58	0.21	3.82	0.27	3.61	0.27
	5.32	0.20	3.76	0.27	3.45	0.27
	3.79	0.23	3.33	0.28	2.57	0.30
	5.28	0.20	4.25	0.26	3.74	0.26
	5.19	0.20	4.14	0.26	3.64	0.27
	5.98	0.19	4.90	0.24	4.27	0.25
9.08	0.16	7.99	0.20	5.41	0.23	
4.78	0.21	6.68	0.22	4.71	0.24	

Fonte: Produção do próprio autor

Analisando-se de forma semelhante aos sensores FDR, as tensões com base nos dados dos tensiômetros variaram, no mês de outubro, entre 3,12 a 4,42 kPa (41,67%), na camada de 0 – 15 cm; 3,17 a 3,84 kPa (21,14%), na camada de 15 – 30 cm e de 2,38 a 3,42 kPa (43,7%), na camada de 30 – 45 cm, o que ocasionou uma variação de aproximadamente 14,3% (0,21 a 0,24 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), 7,4% (0,27 a 0,29 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 14,81% (0,27 a 0,31 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente na umidade do solo. No mês de novembro as variações, nas tensões, foram respectivamente de 3,79 a 9,08 kPa (139,58%), 3,33 a 7,99 kPa (139,94%) e 2,57 a 5,41 kPa (110,5%) para as camadas 0 a 15, 15 a 30 e 30 a 45 cm, provocando variações para umidades do solo de 0,16 a 0,23 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (43,75%); 0,2 a 0,28 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (40%) e de 0,23 a 0,3 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (30,43%), para as mesmas camadas.

Realizando-se um comparativo entre o comportamento das tensões (Figura 2.12), nota-se que os tensiômetros apresentaram picos maiores de tensão para todas as camadas do solo monitoradas.

Figura 2.12 – Valores de tensão medidos por tensiômetros com mercúrio e sensores, durante o ciclo da cultura da melancia nas camadas de 0 – 15; 15 – 30 e 30 – 45 cm.



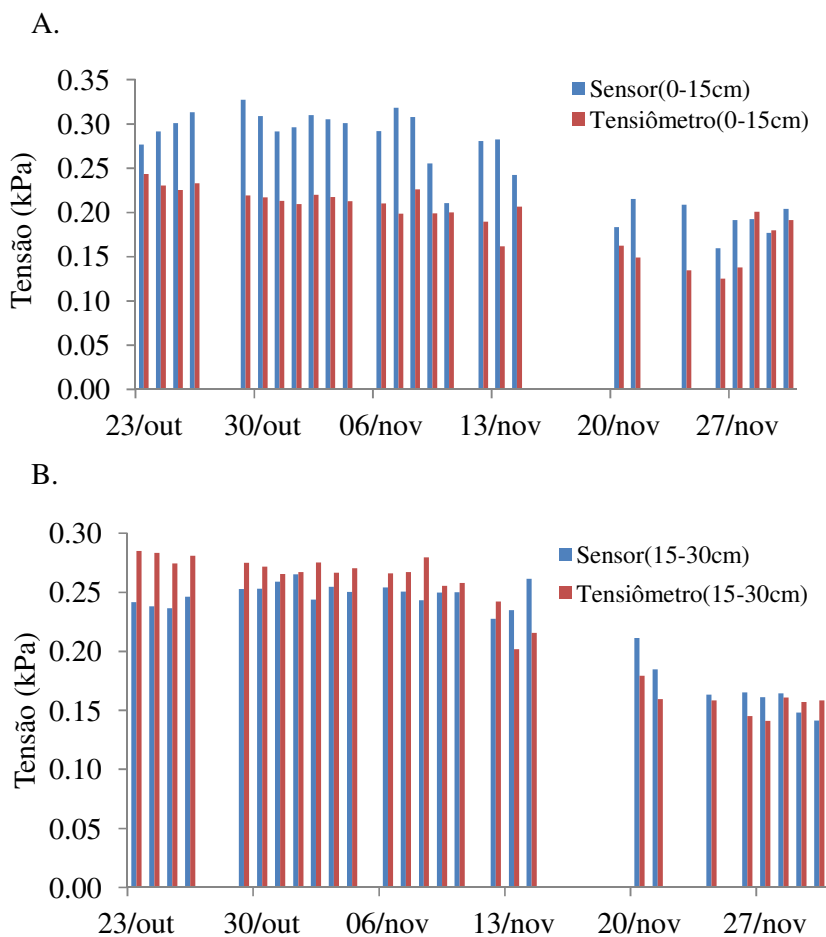
Fonte: Produção do próprio autor

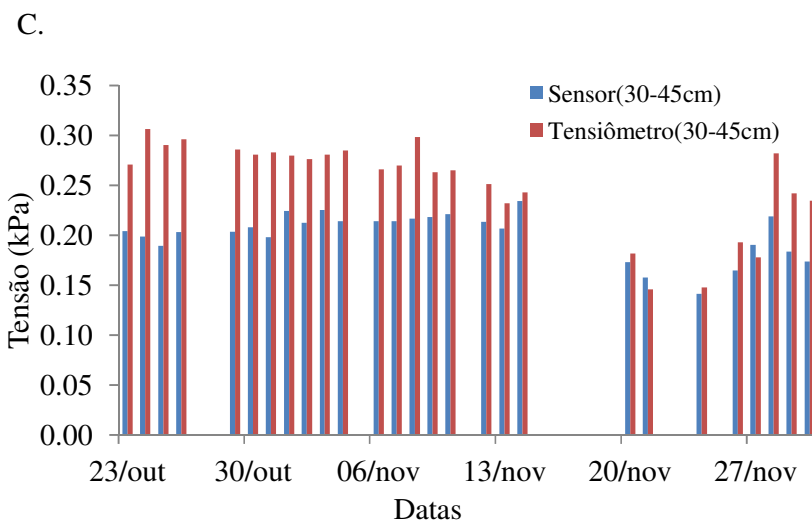
Outro fato observado é que as mudanças nos valores de tensão apresentaram uma menor amplitude entre camadas no monitoramento por sensores, o que pode ser atribuído a maior sensibilidade do mesmo, concordando, desta forma, com Oliveira (2008) ao relatar que o sensor FDR pode realizar monitoramentos em tempo real.

O teste de média (student), entre as tensões medidas em campo, por ambos os equipamentos, para as diferentes camadas de solo não rejeitou a hipótese de nulidade, pois o t calculado 0,0001; 0,0079 e 0,0036 respectivamente para as camadas 0 – 15; 15 – 30 e 30 – 45 cm foram menores que o tabelado ($t=2,779$) com 26 graus de liberdade e $\alpha=0,01$ unilateral.

Já quando se observou as umidades verificou-se que até o período de floração todas as umidades apresentaram-se bem acima da capacidade de campo, 16,0 a 18,0%, para ambas as camadas (Figura 2.13). Tal fato se justifica, provavelmente, pelo fato da ETC ser menor que as lâminas aplicadas para a realização da fertirrigação. Após o período relatado anteriormente, as umidades variaram de forma mais próximas à capacidade de campo sendo considerado o normal, já que a demanda hídrica aumenta consideravelmente.

Figura 2.13 – Valores de umidade do solo, com base nas medidas dos tensiômetros e sensores, nas camadas de 0 – 15; 15 – 30 e 30 – 45 cm, durante o ciclo da cultura da melancia.





Fonte: Produção do próprio autor

Os coeficientes de Pearson, no que diz respeito a comparação de umidades estimadas pelos equipamentos, atingiram valores moderados para a primeira e última camada e forte para a camada intermediária, de acordo com a escala adotada na Tabela 2.1. Os valores de r foram 0,74; 0,90 e 0,75 respectivamente para as três camadas.

Um dos fatores que pode ter contribuído para as diferenças, mesmo não significativa, é o erro associado à equação de ajuste da curva. Outro fator de erro pode está na área de atuação dos equipamentos, visto que enquanto a cápsula porosa possui um tamanho de aproximadamente 5 cm o sensor utilizado possui um tamanho de 10,0 cm.

2.4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir através das análises dos parâmetros estatísticos durante as etapas de calibração em laboratório e validação em campo, que o uso de sensores FDR é perfeitamente aplicável para a substituição dos tensiômetros de mercúrio, no que tange o monitoramento do potencial da água no solo e conseqüentemente a umidade com o auxílio da curva característica de retenção da água no solo.

O sensor FDR não apresenta a necessidade de fluxagem, manutenção periódica requerida pelos tensiômetros de mercúrio e em maior escala em solos arenosos, dificultando o manuseio deste equipamento.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, T. M.; ANDRADE, E. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; MEIRELES, M.; RODRIGUES, J. O. Modelagem da estrutura iônica das águas da bacia hidrográfica do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, p. 1-6, 2006.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1989. 898 p.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: **Embrapa Produção de Informação**, 2006.
- OLIVEIRA, A. D. S. de.; **Avaliação do sensor de umidade FDR no manejo da irrigação**. Fortaleza, CE. 2008. 65 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.
- RENDE, A.; BIAGE, M. **Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils**. J. Braz. Soc. Mech. Sci., vol. 24, no. 3, p. 266-233. 2002.
- RODRIGUES, J. O. ; ANDRADE, E. M. ; CRISOSTOMO, L. A.; TEIXEIRA, A. S. Modelos da Concentração Iônica em águas subterrâneas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, p. 360-365, 2007.
- TOPP, G. C. ; DAVIS, J.L. ; ANNAN, A. P. **Eletromagnetic determination of soil watercontent** : measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, New York, v. 16, p. 574-582, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

CAPÍTULO 3 – Uso do sensor FDR na determinação do coeficiente de cultura da melancia.

RESUMO

O conhecimento dos coeficientes de cultivo de uma cultura durante seu ciclo é de grande importância para o dimensionamento e o manejo de projetos de irrigação, contribuindo para aumentar a produtividade e otimizar a utilização dos equipamentos de irrigação, da energia elétrica e dos recursos hídricos. A determinação da curva característica de retenção de água para cada camada do solo deu-se através do uso de papel filtro do tipo Whatman nº 42. Para a caracterização da condutividade hidráulica do solo, foi inserido verticalmente no solo um tubo de PVC, com diâmetro interno de 25,5 cm e com 70,0 cm de profundidade. No tubo instalou-se uma bateria de sensores FDR e outra de tensiômetros, cada uma com três equipamentos instalados nas mesmas profundidades que foram utilizadas tanto para validar a equação de calibração do sensor, como para posteriormente determinar o k_c da cultura. A área experimental utilizada, para cálculo do coeficiente de cultura, foi cultivada com melancia da variedade Tompson Sweet, totalizando aproximadamente 3.500 plantas, no período de outubro a dezembro de 2010. Os dados climáticos foram organizados no software Microsoft Excel e a partir da equação do método FAO Penman-Monteith obtendo-se os valores de E_{To} em mm dia^{-1} . Os coeficientes de Pearson para correlação entre condutividade hidráulica da água no solo e umidade volumétrica foram de 0,9238; 0,9297 e 0,9372 para as camadas de 0 – 15, 15 – 30 e 30 – 45 cm, respectivamente. Os valores de k_c para a cultura da melancia, cultivada em um Neossolo Quartzarênico, sob gotejamento e com uma irrigação por dia para os dados capturados pelos sensores foram de 0,76 (18 DAP); 0,99 (45 DAP) e 0,77 (59 DAP) enquanto sob manejo com tensiômetros de mercúrio os valores foram de 0,74; 0,98 e 0,67, respectivamente. Os sensores FDR mostraram-se perfeitamente aplicáveis, para a determinação de coeficientes de cultivo pelo método do balanço hídrico. A aplicabilidade dos sensores FDR, abre possibilidades para a informatização da determinação de coeficientes de cultivo.

Palavras-chave: Sensor capacitivo. Agricultura de precisão. Manejo de irrigação.

ABSTRACT

The knowledge of crop coefficients of a culture during its cycle is of great importance for the design and management of irrigation systems, helping to increase productivity and optimize utilization of irrigation equipment, electricity and water resources. Soil water retention curve for each soil layer was determined using the type 42 Whatman paper. To characterize the hydraulic conductivity, a PVC pipe with an internal diameter of 25.5 cm and 70.0 cm deep was inserted vertically into soil. In the tube was installed a battery FDR sensors and another of standard mercury tensiometers. Each battery was comprised of three equipments installed at the same depths as those used both to calibrate and validate the equations, and subsequently to determine crop coefficient (k_c). The experimental area used to calculate the crop coefficient was seeded with the variety Tompson Sweet of Watermelon, in a total standard of 3,500 plants from October to December 2010. Climatic data were organized using Microsoft Excel software and the FAO Penman-Monteith equation for computing values of ETo in $mm\ day^{-1}$. The Pearson correlation coefficients between soil hydraulic conductivity and soil moisture were 0.9238, 0.9297 and 0.9372 for layers 0-15, 15-30 and 30-45 cm, respectively. The values of k_c for the watermelon crop, grown in a Quartzipsament soil under drip irrigation irrigated daily once a day, computed based on the data collected using FDR sensors were 0.76 (18 DAP), 0.99 (45 DAP) and 0, 77 (59 DAP) and k_c computed based on data collect by tensiometers were 0.74, 0.98 and 0.67.respectively. The FDR sensors have proved perfectly applicable to determine crop coefficients by the method of soil water balance. The applicability of FDR sensors opens possibilities for computerized determination of crop coefficients.

Palavras-chave: Capacitance sensor. Precision Agriculture. Irrigation management.

3.1 INTRODUÇÃO

O coeficiente de cultura (k_c) relaciona a necessidade hídrica da cultura em estudo e a necessidade hídrica de uma cultura hipotética. A necessidade hídrica ou demanda hídrica, representa as perdas de água pelo solo (evaporação), assim como as perdas da própria cultura (transpiração) ambas para a atmosfera. A junção destas duas perdas é denominada de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

O k_c é um indicador de grande significado físico e biológico, uma vez que depende da área foliar, arquitetura da planta (parte aérea e sistema radicular), cobertura vegetal e transpiração da planta (FAVARIN et al., 2002).

Segundo Medeiros et al. (2004) o K_c deve, preferencialmente, ser determinado para as condições locais nas quais será utilizado; todavia, sua determinação sob condições de campo exige um grande esforço de pessoal técnico, equipamentos e custos, em virtude da quantidade de informações, controles e monitoramentos necessários ao balanço hídrico em uma área irrigada.

O conhecimento dos coeficientes de cultivo de uma cultura durante seu ciclo é de grande importância para o dimensionamento e o manejo de projetos de irrigação, contribuindo para aumentar a produtividade e otimizar a utilização dos equipamentos de irrigação, da energia elétrica e dos recursos hídricos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Determinação da curva característica de retenção de água do solo.

A determinação da curva característica de retenção de água para cada camada do solo deu-se através do uso de papel filtro do tipo Whatman nº 42, cujas equações de calibração foram obtidas por Chandler *et al.* (1986), onde o potencial é estimado por uma correlação com a umidade do papel filtro (w), segundo as equações abaixo:

$$\text{Para } u > 47\%; \Psi = 10^{(6,05-2,48 \log(u))} \quad (3.1)$$

$$\text{Para } u < 47\%; \Psi = 10^{(4,84-0,0622u)} \quad (3.2)$$

onde: u é a umidade do papel em porcentagem da massa e Ψ é o potencial em kPa.

Foram coletadas 11,0 (onze) amostras, em cada uma das três camadas, com o auxílio de um amostrador de Uhland de volume igual a $97,60 \text{ cm}^3$, e foram levadas ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará.

As amostras foram submetidas à saturação por capilaridade (Figura 3.1) por 48 h.

Figura 3.1 – Amostras submetidas ao processo de saturação por capilaridade.



Fonte: Produção do próprio autor

Após o processo de saturação, as amostras foram submetidas ao processo natural de secagem, a sombra, pelos seguintes tempos: 0,0; 0,5; 1,5; 6,5; 18,5; 43,5; 109,5; 182,0; 280,5; 378,5 e 442,5 h. Para cada tempo foram colocados sobre as amostras dois discos do papel filtro, com os diâmetros exatos da amostra, e depois envolvidos por filme de PVC e papel alumínio por um período de pelo menos sete dias (Figura 3.2 – A e B). Isto se fez

necessário para garantir o equilíbrio da umidade entre as amostras e o papel baseado nas normas da ASTM D 5298-92.

Figura 3.2. A – Detalhe do papel filtro sendo colocado sobre a amostra de solo; B – Amostra envolvida com papel alumínio.



Fonte: Produção do próprio autor

Após o período para equilíbrio entre solo e papel, os mesmos seguiram para pesagens úmidas e secas em estufa, sendo que os papeis foram pesados em balança com precisão de 10^{-4} g e para os solos a precisão foi 10^{-2} g e o tempo para este procedimento foi entre 3 a 5 segundos (ASTM, 2003). Obtidas os pesos aplicou-se as equações para obtenção de potencial (kPa) e umidade ($m^3 m^{-3}$), para análises necessárias.

3.2.2 Avaliação da condutividade hidráulica do solo

Para a caracterização da condutividade hidráulica do solo, foi inserido verticalmente no solo um tubo de PVC, com diâmetro interno de 25,5 cm e com 70,0 cm de profundidade. No tubo instalou-se uma bateria de sensores FDR e outra de tensiômetros (Figura 3.3), cada uma com três equipamentos instalados nas mesmas profundidades que foram utilizadas tanto para validar a equação de calibração do sensor, como para posteriormente determinar o k_c da cultura. No intuito de conservar as características físicas do

solo, o tubo de PVC foi instalado com o solo previamente umedecido, desta forma evitando a desestruturação do mesmo.

Figura 3.3 – Tubo de PVC contendo sensores e tensiômetros, para determinação da condutividade hidráulica do solo.



Fonte: Produção do próprio autor

Após a instalação dos equipamentos a amostra contida dentro do tubo foi saturada e coberta com um plástico preto para evitar as perdas por evaporação (Figura 3.4). De posse das leituras realizadas, da equação de calibração do sensor e do intervalo das leituras foram efetuados os cálculos para a determinação da condutividade hidráulica do solo, por intermédio da equação de Darcy-Buckingham (1.7).

Figura 3.4 – Cobertura do tubo de PVC com plástico preto, para garantir a anulação da evaporação.



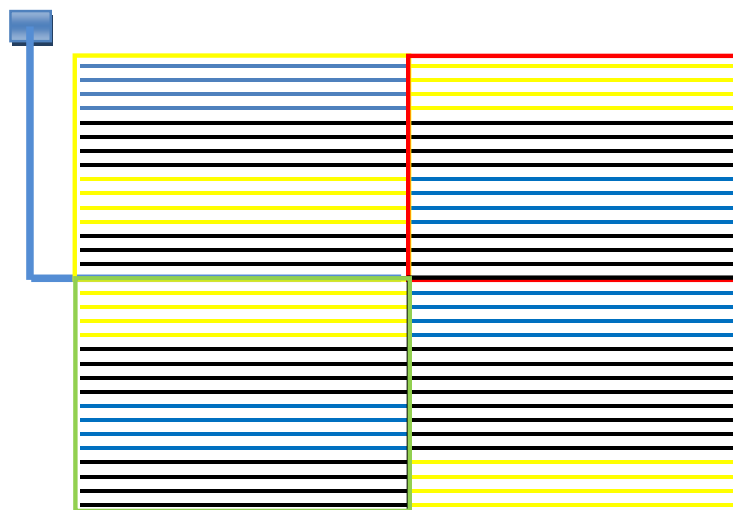
Fonte: Produção do próprio autor

3.2.3 Determinação dos tratamentos

A área experimental utilizada, para cálculo do coeficiente de cultura, foi cultivada com melancia da variedade Thompson Sweet, totalizando aproximadamente 3.500 plantas, no período de outubro a dezembro de 2010.

A área foi dividida em quatro quadrantes de 0,25 ha. Aleatoriamente cada quadrante foi dividido em quatro parcelas, sendo esta última formada por quatro linhas de irrigação (Figura 3.5). Duas parcelas receberam sensores FDR (Tratamento – T1) e duas receberam Tensiômetros (Tratamento – T2).

Figura 3.5 – Croquis da área experimental, com disposição dos tratamentos.



Fonte: Produção do próprio autor

1º quadrante;
 2º quadrante;
 3º quadrante e
 4º quadrante
• T 1 ; • T 2

O tratamento T1 foi estabelecido como sendo uma irrigação por dia, sendo a lâmina determinada pelos tensiômetros de mercúrio, para atingir a capacidade de campo e o tratamento T2 como sendo uma irrigação por dia, sendo a lâmina determinada pelos sensores FDR, para atingir a capacidade de campo.

As leituras, de ambos os instrumentos, foram realizadas todos os dias às 07:00 h. As leituras dos instrumentos a base para o cálculo do tempo de irrigação de cada tratamento.

3.2.4 Avaliação do sistema de irrigação da área experimental com melancia.

A avaliação da uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação foi realizada pela metodologia de Merriam e Keller (1978), sendo tomado para análise quatro linhas laterais, ao longo da linha de derivação (1ª, 1/3, 2/3 e final) e quatro emissores ao longo das linhas laterais (1º, 1/3, 2/3 e final). No intuito de minimizar erros foram realizadas três repetições para cada emissor, sendo cada leitura com um tempo de 5 minutos.

As coletas de água dos emissores foram realizadas com o auxílio de dosadores com capacidade de 0,15 L e os volumes coletados medidos em provetas de 0,25 L.

A uniformidade de distribuição foi realizada com base na fórmula de Christiansen, descrita abaixo, que correlaciona todos os desvios em torno da média para a obtenção do resultado.

$$CUC = \frac{1 - \sum |x - \bar{X}|}{n * \bar{X}} \quad (3.3)$$

onde, x é volume coletado (L), \bar{X} é a média de todos os volumes coletados (L) e n é o número de coletas realizadas.

3.2.5 Manejo cultural e fitossanitário.

A semeadura ocorreu em bandejas de isopor, com 128 células, com substrato comercial para hortícolas. As bandejas foram mantidas em viveiro, com sombrite preto para redução da iluminação solar em 50,0%, até que as mudas iniciassem a emissão do segundo par de folhas definitivas.

A área foi gradeada com dois cortes cruzados e posteriormente o solo foi irrigado até a formação da faixa molhada para facilitar a marcação e o preparo das covas com a incorporação de 2,0 kg de esterco bovino e a adubação de pré-plantio. O preparo das covas foi realizado cinco dias antes do transplante das mudas.

Toda à área recebeu a mesma quantidade de adubo (Tabela 3.1), tanto no que diz respeito ao pré-plantio como as fertirrigações. Com relação aos demais tratamentos culturais, inclusive em relação ao combate as pragas, também houve uniformidade de aplicação, dentre os tratamentos, quando se fez necessário.

Tabela 3.1 – Adubação utilizada na cultura da melancia durante em experimento.

Nutrientes	Pré-plantio kg/ha	Fertirrigação kg/ha	Total kg/ha
N	17,00	123,59	140,79
P	42,00	83,34	125,34
K	36,00	117,80	153,80
Ca		18,24	18,24
Mg		5,00	5,00
Mn	1,20	0,00	1,20
B	1,08	0,00	1,08
Zn	5,40	0,00	5,40
Mo	0,06	0,00	0,06
Fe	1,80	0,00	1,80
Cu	0,48	0,00	0,48

Fonte: Produção do próprio autor

No vigésimo dia após o transplante, colocaram-se três coméias distribuídas na periferia do plantio, com o intuito de melhorar o índice de polinização da área (Figura 3.6), onde permaneceram durante vinte dias no local.

Figura 3.6 – Polinização natural realizada por abelha africanizada.



Fonte: Produção do próprio autor

3.2.6 Obtenção da evapotranspiração de referência pela estação meteorológica automatizada

Os valores da evapotranspiração de referência foram obtidos através dos dados climáticos da estação meteorológica automática, localizada na sede do perímetro, instalada no centro de uma área de aproximadamente 1,0 ha (Figura 3.7), cultivada com grama. Os dados climáticos foram organizados no software Microsoft Excel e a partir da equação do método FAO Penman-Monteith obtendo-se os valores de ETo em $mm\ dia^{-1}$.

Figura 3.7 – Vista da estação meteorológica do Perímetro Irrigado.



Fonte: Produção do próprio autor

A evapotranspiração de referência foi calculada com base nos dados meteorológicos dos dias 23/10, 19/11 e 03/12 de 2010. As referidas datas representaram os dias 18, 45 e 59 após o plantio, contemplando as fases vegetativas, floração/formação dos frutos e maturação, respectivamente.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Determinação da curva característica de retenção de água do solo.

Os valores de densidade, nas distintas camadas, variaram de 1,44 g cm⁻³ a 1,66 g cm⁻³, e estão situados entre os limites de densidades de solos de textura areia e franco-arenosas, que variam entre 1,20 até 1,80 g cm⁻³ (BRADY, 1989).

De acordo com Reichert; Suzuki; Reinert (2007), os valores de densidade do solo estão dentro dos limites considerados adequados para solos arenosos, considerando as boas condições estruturais do ponto de vista da densidade.

Os resultados apresentados nas tabelas 3.2 a 3.4 representam os potenciais, aplicando-se as Equações 3.1 e 3.2, segundo as umidades e os respectivos tempos acumulados de secagem natural das amostras.

Tabela 3.2 – Massa úmida (m_u) e massa seca (m_s) dos cilindros de papel, massa de água ($m_{\text{água}}$) e respectivas porcentagens de água e potencial, para diferentes tempos acumulados (T_{ac}) durante a secagem das amostras de solo camada de 0 – 15 cm.

T_{ac} (h)	Papel				
	m_u (g)	m_s (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	% ÁGUA	Ψ (kPa)
0,0	0,5054	0,1642	0,3412	207,7954	2,01
0,5	0,4764	0,1666	0,3098	185,9544	2,64
1,5	0,4925	0,1727	0,3198	185,1766	2,67
6,5	0,5144	0,1822	0,3322	182,3271	2,77
18,5	0,5000	0,1785	0,3215	180,1120	2,86
43,5	0,5663	0,2107	0,3556	168,7708	3,36
109,5	0,4824	0,1805	0,3019	167,2576	3,44
182,0	0,2837	0,1632	0,1205	73,8358	26,10
280,5	0,1919	0,1744	0,0175	10,0344	16438,42
378,5	0,1850	0,1736	0,0114	6,5668	27011,19
442,5	0,1860	0,1749	0,0111	6,3465	27877,17

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3.3 – Massa úmida (m_u) e massa seca (m_s) dos cilindros de papel, massa de água ($m_{\text{água}}$) e respectivas porcentagens de água e potencial, para diferentes tempos acumulados (T_{ac}) durante a secagem das amostras de solo camada de 15 – 30 cm.

T_{ac} (h)	Papel				
	m_u (g)	m_s (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	% ÁGUA	Ψ (kPa)
0,0	0,4957	0,1851	0,3106	167,8012	3,41
0,5	0,4809	0,1802	0,3007	166,8701	3,46
1,5	0,4821	0,1815	0,3006	165,6198	3,52
6,5	0,5469	0,2105	0,3364	159,8100	3,85
18,5	0,4586	0,1796	0,2790	155,3452	4,13
43,5	0,4548	0,1799	0,2749	152,8071	4,30
109,5	0,4387	0,1748	0,2639	150,9725	4,43
182,0	0,2683	0,1696	0,0987	58,1958	47,11
280,5	0,1980	0,1752	0,0228	13,0137	10728,72
378,5	0,1937	0,175	0,0187	10,6857	14974,37
442,5	0,1860	0,1785	0,0075	4,2017	37901,42

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3.4 – Massa úmida (m_u) e massa seca (m_s) dos cilindros de papel, massa de água ($m_{\text{água}}$) e respectivas porcentagens de água e potencial, para diferentes tempos acumulados (T_{ac}) durante a secagem das amostras de solo camada de 30 – 45 cm.

T_{ac} (h)	Papel				
	m_u (g)	m_s (g)	$m_{\text{água}}$ (g)	% ÁGUA	Ψ (kPa)
0,0	0,4884	0,1797	0,3087	171,7863	3,22
0,5	0,4997	0,1858	0,3139	168,9451	3,35
1,5	0,4659	0,1741	0,2918	167,6048	3,42
6,5	0,4887	0,1843	0,3044	165,1655	3,54
18,5	0,4606	0,1773	0,2833	159,7857	3,85
43,5	0,5269	0,2047	0,3222	157,4011	3,99
109,5	0,4446	0,1739	0,2707	155,6642	4,11
182,0	0,2575	0,1761	0,0814	46,2237	83,39
280,5	0,1997	0,1758	0,0239	13,5950	9871,69
378,5	0,1983	0,1809	0,0174	9,6186	17447,16
442,5	0,1840	0,1722	0,0118	6,8525	25928,34

Fonte: Produção do próprio autor

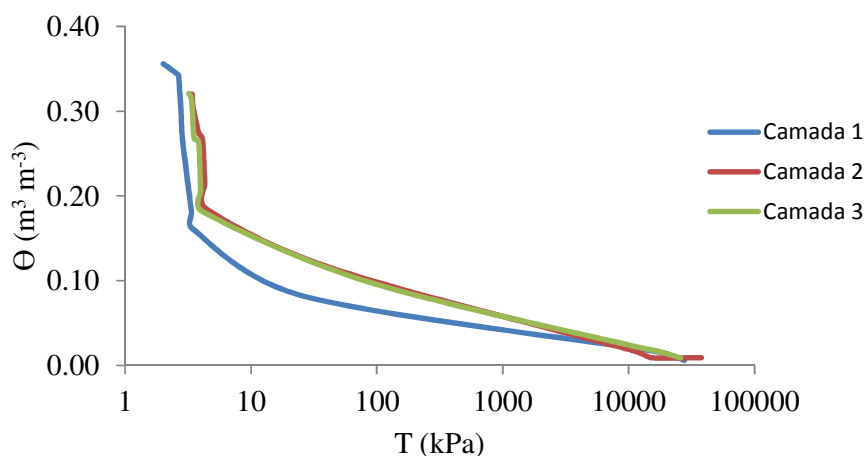
Os dados das tabelas 3.2 a 3.4 mostram que mesmo dentro de uma mesma classificação de solo, fatores como densidade do solo podem contribuir de forma decisiva para diferenciação espacial dos dados, conforme explicitado por Dufranc *et al.* (2004) em relação ao estado de agregação do solo. Entretanto a densidade do solo, por si só, não é capaz de explicar toda variação de potencial e consequentemente de umidade. Tal fato pode ser fundamentado comparando os tempos de secagem natural das amostras, haja vista que os resultados para potencial variaram aleatoriamente entre as camadas.

O potencial teve sua maior variação entre os tempos acumulados de 109,5 e 182,0 h, onde a camada de 30 – 45 cm que saiu de um potencial de 4,11 para 83,39 kPa, ou seja, um

incremento de mais de 1.900,0%. As variações nas camadas de 0 – 15 e 15 – 30 cm foram da ordem de 658,7 e 963,4% respectivamente (Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4).

A Figura 3.8 demonstra o comportamento da umidade do solo, nas três camadas de solo, em função da tensão. Nos extremos, valores acima de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e abaixo de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, as leituras são muito próximas enquanto que na faixa intermediária a camada de 0 – 15 cm se diferencia por ter menos umidade.

Figura 3.8 – Umidades e respectivas tensões, para cada tempo de secagem amostrado.



Fonte: Produção do próprio autor

A camada de 0 – 15 cm é mais arenosa que as demais, pelo fato de ter um menor valor de umidade na capacidade de campo, mensurada a 10,0 kPa. O fato observado também é corroborado pelo visual, do perfil do solo, que facilmente detecta-se uma mudança estrutural aos 15,0 cm de profundidade.

Pela análise de regressão foram obtidas as equações de ajuste das curvas de retenção de água, para cada camada de solo:

$$0 - 15 \text{ cm: } \theta = 0,3843 * T^{-0,381}, \text{ com um } R^2 = 0,9641; \quad (3.4)$$

$$15 - 30 \text{ cm: } \theta = 0,4381 * T^{-0,372}, \text{ com um } R^2 = 0,9851; \text{ e} \quad (3.5)$$

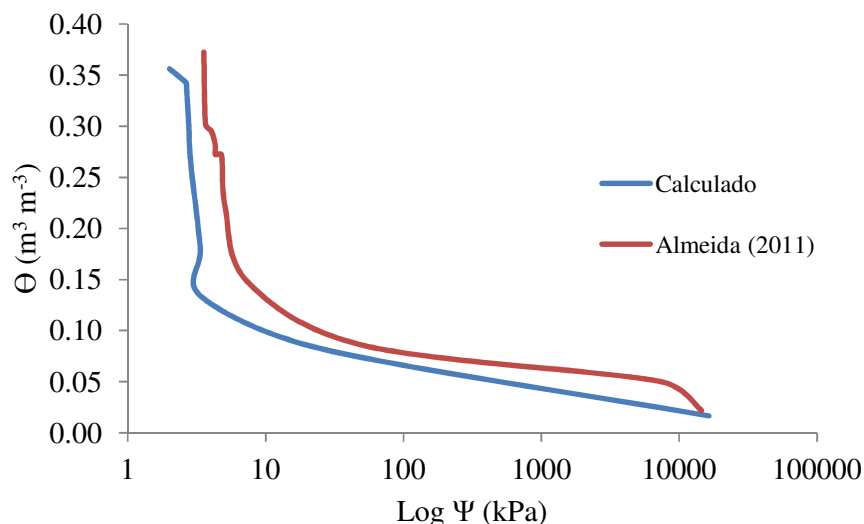
$$30 - 45 \text{ cm: } \theta = 0,4103 * T^{-0,34}, \text{ com um } R^2 = 0,9732. \quad (3.6)$$

O comportamento das curvas é semelhante ao descrito por Moreira (2009), ao determinar as curvas de retenção, em solo com características físicas parecidas, em laboratório, através do funil de Haines e do aparelho de Richards ou câmara de sucção.

Almeida et al. (2011), comparando as curvas de retenção obtidas através de papel filtro e laboratório, também encontraram comportamento semelhante, chegando a tensões maiores que 10.000 kPa.

A Figura 3.9 apresenta os valores de umidade do solo obtidos pelo método do papel filtro encontrados neste trabalho e os apresentados por Almeida et al. (2011).

Figura 3.9 – Curva de retenção de umidade, para a camada de 0 a 15 cm (calculado) e 0 a 30 cm (ALMEIDA et al., 2011), a partir do método do papel filtro.



Fonte: Produção do próprio autor

A curva obtida, neste trabalho, se apresentou com menor potencial de armazenamento devido a dois fatores: A composição granulométrica, que apresentou 92,0% de areia enquanto o solo usado para comparação apresentou 86,6%, além de possuir quase metade da porcentagem de argila, e a faixa de solo monitorada estava mais próxima à superfície, por tanto é plausível para os Neossolos que tenham um menor potencial de retenção de água.

3.3.2 Avaliação da condutividade hidráulica do solo.

O monitoramento para a determinação da condutividade hidráulica durou mais de 800 h. As frequências dos sensores observadas durante o monitoramento, que com o auxílio da Equação 13 foram convertidas em tensão, podem ser observadas na Tabela 3.5 (camada 0 – 15 cm), Tabela 3.6 (15 – 30 cm) e Tabela 3.7 (30 – 45 cm).

Tabela 3.5 – Tempo de monitoramento, frequência observada e tensão estimada na camada de solo de 0 – 15 cm.

Tempo (h)	Frequência (kHz)	Tensão (cm.c.a)	Tempo (h)	Frequência (kHz)	Tensão (cm.c.a)
0,5	650	13,64	219,2	2563	268,64
0,7	740	15,70	257,2	2613	290,53
1,7	1028	24,60	281,2	2641	303,52
4,2	1316	38,54	306,2	2668	316,45
18,2	1780	79,29	401,2	2753	361,26
47,2	2080	126,55	425,2	2771	371,69
50,7	2102	131,07	521,2	2835	410,69
69,7	2202	153,21	545,2	2849	419,85
89,2	2280	172,90	593,2	2876	437,57
166,2	2476	234,56	641,2	2900	454,58
170,5	2484	237,54	713,2	2934	478,91
190,2	2518	250,59	809,2	2974	509,48

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3.6 – Tempo de monitoramento, frequência observada e tensão estimada na camada de solo de 15 – 30 cm.

Tempo (h)	Frequência (kHz)	Tensão (cm.c.a)	Tempo (h)	Frequência (kHz)	Tensão (cm.c.a)
0,5	533	11,37	219,2	2545	261,19
0,7	628	13,19	257,2	2598	283,62
1,7	931	21,15	281,2	2627	296,96
4,2	1234	33,91	306,2	2655	310,28
18,2	1721	72,40	401,2	2745	356,63
47,2	2037	118,37	425,2	2764	367,47
50,7	2060	122,82	521,2	2831	408,11
69,7	2166	144,71	545,2	2846	417,68
89,2	2247	164,34	593,2	2874	436,24
166,2	2453	226,47	641,2	2900	454,09
170,5	2462	229,49	713,2	2935	479,68
190,2	2498	242,77	809,2	2977	511,93

Fonte: Produção do próprio autor

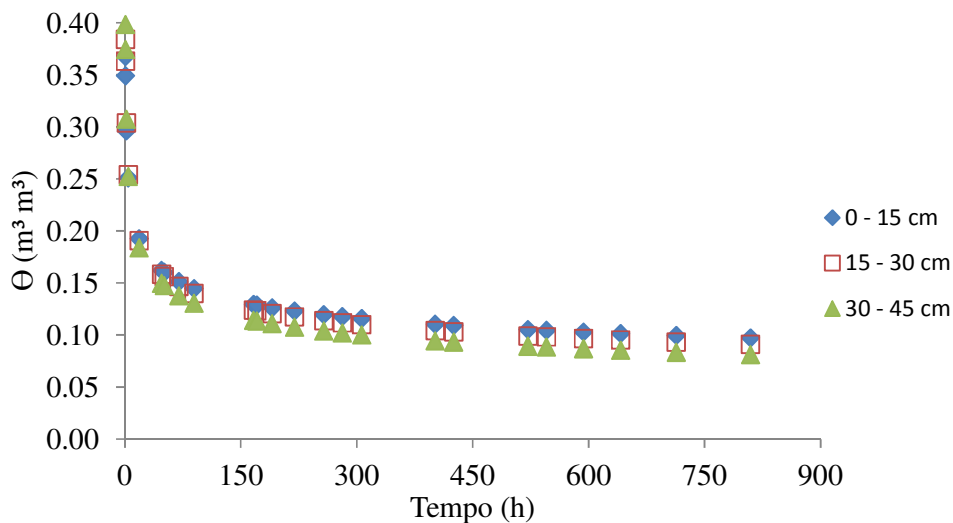
Tabela 3.7 – Tempo de monitoramento, frequência observada e tensão estimada na camada de solo de 30 – 45 cm.

Tempo (h)	Frequência (kHz)	Tensão (cm.c.a)	Tempo (h)	Frequência (kHz)	Tensão (cm.c.a)
0,5	486	10,57	219,2	2657	311,26
0,7	589	12,41	257,2	2714	340,19
1,7	916	20,65	281,2	2746	357,50
4,2	1243	34,38	306,2	2777	374,83
18,2	1769	77,95	401,2	2873	435,61
47,2	2109	132,49	425,2	2894	449,91
50,7	2135	137,87	521,2	2966	503,83
69,7	2248	164,58	545,2	2983	516,60
89,2	2336	188,78	593,2	3013	541,42
166,2	2559	266,85	641,2	3040	565,36
170,5	2568	270,70	713,2	3078	599,82
190,2	2607	287,64	809,2	3123	643,45

Fonte: Produção do próprio autor

As tensões observadas nas tabelas 3.5 a 3.7 foram convertidas em umidade, permitindo assim a análise do comportamento da mesma, em cada camada, ao longo do período de monitoramento, como pode ser observado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Comportamento da umidade do solo, por camada, durante o período de monitoramento de secagem do solo.



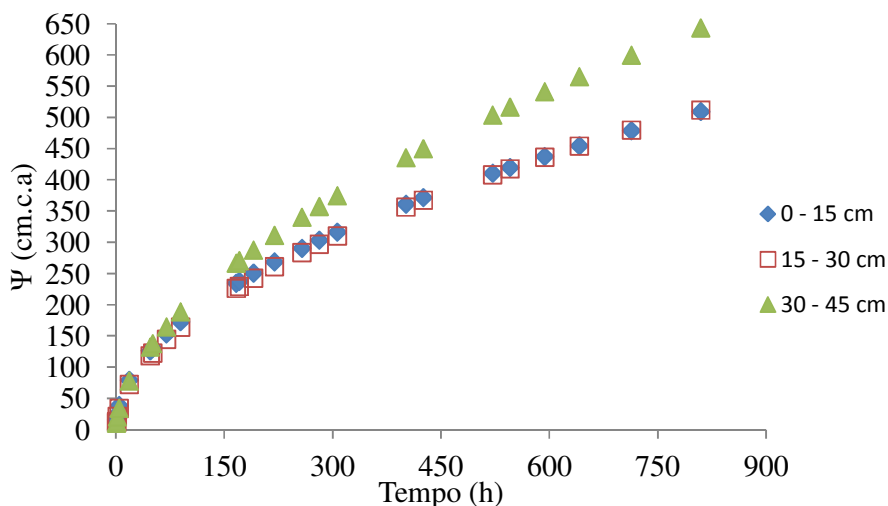
Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 3.10 permitiu-nos encontrar, a partir da derivada das equações de ajuste das curvas, a primeira parte da resolução da equação de Richards para cada camada e nos respectivos tempos amostrados.

Os fluxos variaram de 15,47 para 0,06 mm h⁻¹ na primeira camada, 32,62 para 0,14 mm h⁻¹ na segunda camada e de 51,72 para 0,23 mm h⁻¹ na terceira camada. As variações das densidades de fluxo foram de praticamente 25.800; 23.300 e 22.410%, enquanto as umidades variaram em torno de 378; 422 e 490%, para a primeira, segunda e terceira camada, respectivamente.

Para determinar a segunda parte da equação, derivada do potencial total da água em função da coordenada vertical de posição, foi obtido o comportamento do potencial em relação ao tempo (Figura 3.11). A partir das equações de ajuste, foram estimados os potenciais para os mesmos tempos de comparação das umidades volumétricas.

Figura 3.11 – Potenciais da água no solo, por camada, durante o período de monitoramento de secagem do solo.



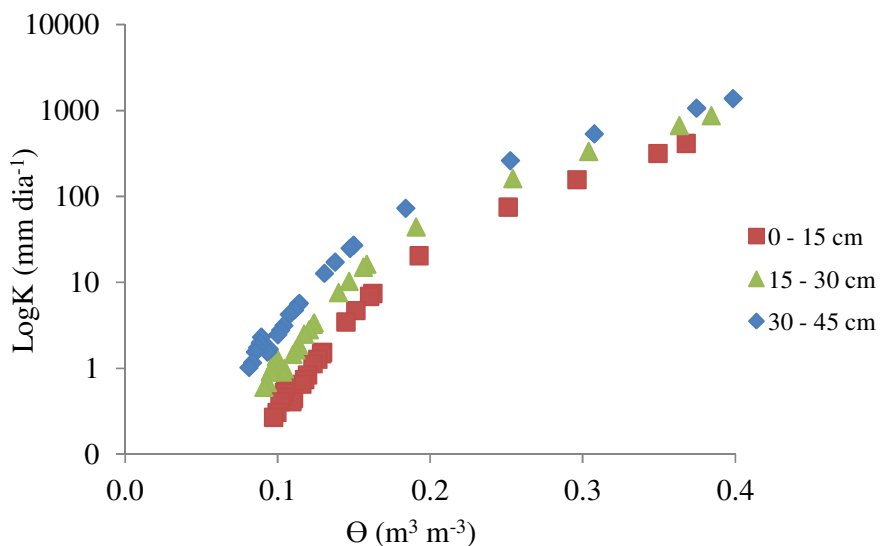
Fonte: Produção do próprio autor

As derivadas das equações do potencial total em função da posição, em relação ao tempo, oscilaram de 0,898 cm cm⁻¹ no tempo de 0,5 h, para 5,466 cm cm⁻¹ no tempo final 809,2 h. Tal variação foi da ordem de 608,7%, sendo esta bem inferior às variações ocorridas nos fluxos de água que são função direta da umidade do solo.

O comportamento dos valores de **K** (mm dia⁻¹), em relação às umidades volumétricas **θ** (m³ m⁻³) estão demonstrados na Figura 3.12. Observa-se a dependência, de

forma direta, da condutividade hidráulica em relação à umidade tendo incrementos exponenciais a cada incremento da umidade.

Figura 3.12 – Valores de condutividade hidráulica, segundo a umidade.



Fonte: Produção do próprio autor

Os coeficientes de Pearson para correlação entre condutividade hidráulica da água no solo e umidade volumétrica foram de 0,9238; 0,9297 e 0,9372 para as camadas de 0 – 15, 15 – 30 e 30 – 45 cm, respectivamente.

Resolvendo as derivadas das equações de ajustes, obtiveram-se as seguintes equações para $K(\theta)$:

$$1^{\text{a}} \text{ Camada: } K(\theta) = 0,0343e^{27,908\theta}; \quad (3.7)$$

$$2^{\text{a}} \text{ Camada: } K(\theta) = 0,1175e^{25,54\theta}; e \quad (3.8)$$

$$3^{\text{a}} \text{ Camada: } K(\theta) = 0,3222e^{23,351\theta} \quad (3.9)$$

Moreira (2009), trabalhando com uma área inundada de aproximadamente 10,0 m², na mesma região, encontrou as seguintes equações para condutividade hidráulica:

$$1^{\text{a}} \text{ Camada: } K(\theta) = 0,089e^{28,53\theta}; \quad (3.10)$$

$$2^{\text{a}} \text{ Camada: } K(\theta) = 0,0469e^{28,773\theta}; e \quad (3.11)$$

$$3^{\text{a}} \text{ Camada: } K(\theta) = 0,0322e^{26,72\theta} \quad (3.12)$$

Comparando os coeficientes de Pearson, entre as equações acima e as obtidas neste trabalho, para valores de umidade do solo de 0,05 a 0,40 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, os resultados se mostraram mais próximos de 1. O intervalo de umidade, utilizado para comparação entre as equações, foi simulado no Microsoft Excel com intervalos de 0,05 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Os resultados da comparação (Tabela 3.8), entre as equações, mostram que a melhor correlação entre umidade e condutividade ocorreu para as equações de ajuste da terceira camada (30 – 45 cm). As maiores diferenças para condutividade foram causadas pelas equações de ajuste para a primeira camada de solo (0 – 15 cm).

Tabela 3.8 – Condutividade hidráulica e fator de correlação de Pearson, em relação a umidades simuladas, de acordo com as equações 3.6; 3.7 e 3.8 e as equações apresentadas por Moreira (2009).

Umidade	Camada 0 – 15 cm		Camada 15 – 30 cm		Camada 30 – 45 cm	
	Moreira (2009)	Encontrado	Moreira (2009)	Encontrado	Moreira (2009)	Encontrado
Θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	K (mm dia^{-1})	K (mm dia^{-1})	K (mm dia^{-1})	K (mm dia^{-1})	K (mm dia^{-1})	K (mm dia^{-1})
0.05	0.37	0.14	0.20	0.42	0.12	1.04
0.10	1.54	0.56	0.83	1.51	0.45	3.33
0.15	6.43	2.26	3.51	5.42	1.66	10.70
0.20	26.76	9.11	14.80	19.43	6.16	34.38
0.25	111.43	36.76	62.40	69.66	22.91	110.52
0.30	464.00	148.38	263.00	249.81	85.22	355.21
0.35	1932.14	598.96	1108.55	895.77	316.94	1141.69
0.40	8045.60	2417.74	4672.56	3212.11	1178.75	3669.52
r	0.70	0.71	0.70	0.73	0.72	0.74

Fonte: Produção do próprio autor

3.3.3 Avaliação do sistema de irrigação da área experimental com melancia

A maior diferença entre os volumes coletados foi de 0,021 L, o que representou uma diferença de 0,0003 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ na vazão.

Resolvendo-se a equação de uniformidade de Christiansen (3.3), a partir dos dados coletados em campo, obteve-se um CUC de 0,96 ou 96,0% de uniformidade de distribuição de água.

O sistema apresentou uma vazão média, por emissor, de $1,514 \times 10^{-3} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$, sendo esta 1,6% maior que a vazão nominal informada pelo fabricante ($1,49 \times 10^{-3} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$).

O sistema, quando da utilização para fertirrigação, apresentou vazão de aproximadamente 40,0% se comparado ao funcionamento somente para irrigação. O tempo

necessário para o processo de fertirrigação era de 0,33 h, o que representava uma lamina de 2,8 mm.

3.3.4 Obtenção da evapotranspiração de referência via estação meteorológica (Eto)

A Tabela 3.9 apresenta os dados meteorológicos dos dias 23/10 (18 DAP), 19/11 (45 DAP) e 03/12 (59 DAP) de 2010 e as respectivas evapotranspiração de referência, com base na equação do método FAO Pennam-Monteith (eq. 1.3).

Tabela 3.9 – Valores dos parâmetros meteorológicos e da evapotranspiração de referência (Eto) para os dias 23/10, 19/11 03/12/2010.

Data	Tmin. (°C)	Tmax. (°C)	Tméd. (°C)	Vel. do Vento (m/s)	U.R Méd. (%)	Rad. solar (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	Eto (mm dia ⁻¹)
23/10	21,50	32,80	27,15	3,47	73,42	20,55	5,54
19/11	23,10	32,70	27,90	3,69	75,42	20,25	5,36
03/12	23,10	33,70	28,40	3,84	71,92	19,03	5,60

Fonte: Produção do próprio autor

Observando os dados, pode-se salientar a importância dos fatores individualmente na composição da Eto. Tomando como referência o dia 03/12 que apresentou uma radiação solar menor que as outras datas, fato explicado pelo aumento da nebulosidade nesta época, apresentou uma menor umidade relativa do ar e uma maior temperatura, fazendo com que este dia apresentasse uma maior Eto.

3.3.5 Cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc).

A ETc foi determinada para um período de 24,0 h, ou seja, de 07:00 h do dia escolhido as 07:00 h do dia posterior se encontra nas Tabelas 3.10 e 3.11. As leituras dos equipamentos, sensores FDR e tensiômetros, foram realizadas no momento anterior a irrigação, sendo esta última realizada apenas uma vez por dia e na quantidade suficiente para repor a umidade do solo à capacidade de campo.

Tabela 3.10 – Valores de lâminas, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os sensores.

Dia	Período (h)	I	(ΔARM)	Fluxo	ETc
		mm			
23/10 a 24/10/2010	24,0	3,46	0,31	1,09	4,24
19/11 a 20/11/2010	24,0	5,96	0,34	-0,30	5,32
03/12 a 04/12/2010	24,0	4,62	0,46	0,17	4,33

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3.11 – Valores de lâminas, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os tensiômetros.

Dia	Período (h)	I	(Δ ARM)	Fluxo	Etc
		mm			
23/10 a 24/10/2010	24,0	3,56	0,03	0,59	4,12
19/11 a 20/11/2010	24,0	5,92	0,44	-0,20	5,28
03/12 a 04/12/2010	24,0	4,66	1,28	0,42	3,79

Fonte: Produção do próprio autor

Comparando-se os dois métodos, se observa variações nos valores de ETC da ordem de 2,91; 0,56 e 12,32% respectivamente para os dias 18; 45 e 59 após o plantio, sendo que a determinação por sensores apresentou maiores valores de ETC. As diferenças podem ser atribuídas a fatores como tempo de resposta dos instrumentos, erro associado a equação de ajuste da calibração, além do possível efeito da temperatura ambiente.

Os valores de ETC determinados com os sensores estão mais próximos dos valores, médios, apresentados por Miranda et al. (2004) em comparação com os valores determinados com os tensiômetros de mercúrio. Observa-se ainda que o valor sugerido pelo último autor para a ETC, da fase intermediária, é 17,14% maior.

O valor da Etc para a fase intermediária, sugerido por Miranda et al. (2004) é 17,14% maior do que o calculado com os sensores, podendo ter havido um déficit hídrico em tal momento.

3.3.6 Cálculo do coeficiente de cultura (kc)

Os valores de kc para a cultura da melancia, cultivada em um Neossolo Quartzarênico, sob gotejamento e com uma irrigação por dia para os dados capturados pelos sensores foram de 0,76 (18 DAP); 0,99 (45 DAP) e 0,77 (59 DAP) enquanto sob manejo com tensiômetros de mercúrio os valores foram de 0,74; 0,98 e 0,67, respectivamente.

Os valores encontrados diferem, por serem pontuais, dos encontrados por Bezerra e Oliveira (1999), Miranda et al. (2004), Carvalho et al. (2007) e os recomendados pela FAO, porém encontram-se dentro das faixas de variação de kc, para os mesmos estádios fisiológicos, observados pelos autores supra citados.

3.4 CONCLUSÕES

Os sensores FDR mostraram-se perfeitamente aplicáveis, para a determinação de coeficientes de cultivo pelo método do balanço hídrico.

A aplicabilidade dos sensores FDR, abre possibilidades para a informatização da determinação de coeficientes de cultivo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma, FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p.
- ALMEIDA; E. L.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA FILHO, F. C.; CRUZ, T. M. L.; LIMA, R. M. M. **Obtenção de curvas características de retenção de água no solo obtidas por diferentes métodos**. IN: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 2011, Uberlândia. 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. 2003, ASTM-D 5298-92.
- BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.173-177, 1999. Campina Grande, PB.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1989. 898 p.
- CARVALHO, L. A. de.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; CRUZ, A. C. R.; Caracterização hidráulica de um latossolo vermelho associado à caracterização pedológica do perfil. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1008 – 1013, julho/agosto 2007.
- CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Geotechnique**, v.36, p.265-268, 1986.
- DUFRANC, G.; DECHEN, S. C. F.; FREITAS, S. S. e CAMARGO, O. A.. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2004, vol.28, n.3, pp. 505-517. ISSN 0100-0683.
- FAVARIN, J.L.; VILLA NOVA, N.A.; ANGELOCCI, L.R.; DOURADO-NETO, D.; BERNARDES, M.S. Estimativa do consumo hídrico do cafeeiro em função de parâmetros climatológicos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p.235-240, 2002.
- MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo. **Acta Scientiarum**, v.26. n.4. p.513-519. Maringá. 2004.
- MERRIAM, J. L., KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271p.
- MIRANDA, F. R.; OLIVEIRA, J. J. G.; SOUZA, F. Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultivo para a cultura da melancia irrigada por gotejamento. CE. **Rev. Ciência Agronômica**. vol. 25 n.1. jan.-jun. p. 36-43. Fortaleza. 2004.

MOREIRA, L. C. J.; **Avaliação do Algoritmo SEBAL na Melancia Irrigada através do monitoramento da evapotranspiração usando Balanço Hídrico e Eddy Correlation.** Fortaleza, CE. 2009. 79 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Orgs.) **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.

CAPÍTULO 4 – Efeito de diferentes potenciais de água no solo, sobre a fisiologia da cultura da melancia

RESUMO

Na agricultura, a disponibilidade hídrica é um dos grandes fatores que condicionam a produtividade e o sucesso de uma cultura. A importância ecológica da água está associada ao fato de que todos os processos fisiológicos das plantas são, direta ou indiretamente, influenciados pelo suprimento hídrico. A resposta das plantas ao potencial de água no solo tem sido estudada por muitos pesquisadores; entretanto, o potencial de água no solo não indica, de maneira geral, as condições de déficit ou excesso de água na profundidade do solo explorado pelo sistema radicular das plantas. Quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam de modo indireto, na conservação da água no solo, como se estivessem economizando para períodos posteriores. O efeito do manejo da irrigação, na fisiologia da cultura, foi analisado com base na condutância estomática (gs), transpiração (E) e assimilação de carbono (A), medidos com o auxílio de um medidor de gás infravermelho portátil (IRGA) da LICOR, em quatro datas distintas, de forma a representar os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, além da determinação de kc e produtividade de água. As medições foram realizadas sempre antes das irrigações, momento no qual foram realizadas medidas do potencial da água no solo. Ao final do ciclo da cultura os tratamentos foram responsáveis pelas seguintes lâminas totais de irrigação: T1 – 331,41 mm, T2 – 311,71 mm, T3 – 343,50 mm e T4 – 372,41 mm. Os referidos tratamentos refletiram em diferentes potenciais da água no solo. Os tratamentos T1 e T2 apresentaram variações intermediárias, de potencial, porém com os potenciais mais elevados, enquanto a maior variação ocorreu no T3, e T4 apresentou um potencial quase que constante, durante as observações. A análise estatística do efeito do tratamento, para os parâmetros transpiração e condutância mostraram-se significante ao nível de 5,0%. Os tratamentos tiveram influência no desempenho produtivo da cultura. No presente trabalho, considerando a produção obtida e a densidade de plantio de 3.500 plantas por hectare, a produção estimada por planta foi de 3,77; 3,72; 4,71 e 7,39 kg para T1, T2, T3 e T4 respectivamente. O uso do sensor permite medir o potencial da água no solo e a umidade em tempo real, possibilitando a tomada de decisões de forma mais segura. A manutenção de diferentes potenciais de água no solo tem influência direta para a formação do kc.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Coeficiente de cultivo. Sensor FDR.

ABSTRACT

In agriculture, water availability is one of the major factors that affect the productivity and success of a culture. The ecological importance of water is associated with the fact that all physiological processes of plants are directly or indirectly influenced by the water supply. The response of plants to soil water potential has been studied by many researchers, however, the potential for soil water does not indicate, in general, the conditions of deficit or excess water in the soil depth explored by the root system of plants. When plants are exposed to situations of water deficit display often physiological responses that result in an indirect way, the conservation of water in the soil, as if they were saving for later periods. The effect of irrigation management, in physiology of culture, was analyzed based on stomatal conductance (gs), transpiration (E) and carbon assimilation (A), measured using a portable infrared gas meter (IRGA) of LICOR on four different dates in order to represent the different stages of crop development, besides the determination of kc and productivity of water. Measurements were performed before irrigations, at which measurements were made of the potential of soil water. At the end of the culture cycle the treatments were responsible for the following total irrigation: T1 - 331.41 mm, T2 - 311.71 mm, T3 - T4 and 343.50 mm - 372.41 mm. These treatments reflected in different soil water potential. The treatments T1 and T2 showed variations intermediate potential, but with the highest potential, while the greatest variation occurred in T3 and T4 showed a potential almost constant during the observations. Statistical analysis of treatments effect for the conductance and transpiration parameters shown to be significant at 5.0%. The treatments influenced the performance of crop yield. In this paper, considering the obtained production and planting density of 3,500 plants per hectare, the estimated production per plant was 3.77, 3.72, 4.71 and 7.39 kg for T1, T2, T3 and T4 respectively. The use of the sensor allows measurement of soil water potential and moisture in real time, enabling the decision-making more safely. The maintenance of different soil water potential has direct influence to the formation of kc.

Palavras-chave: Precision Agriculture. Coefficient of cultivation. Sensor FDR.

4.1 INTRODUÇÃO

Na agricultura, a disponibilidade hídrica é um dos grandes fatores que condicionam a produtividade e o sucesso de uma cultura. A importância ecológica da água está associada ao fato de que todos os processos fisiológicos das plantas são, direta ou indiretamente, influenciados pelo suprimento hídrico (Kramer & Boyer, 1995).

A resposta das plantas ao potencial de água no solo tem sido estudada por muitos pesquisadores; entretanto, o potencial de água no solo não indica, de maneira geral, as condições de déficit ou excesso de água na profundidade do solo explorado pelo sistema radicular das plantas (Carlesso, 1995). Desta forma, Ritchie et al. (1972) e Carlesso (1995) fazem restrição ao uso do potencial de água no solo para caracterizar a intensidade de ocorrência de déficit hídrico.

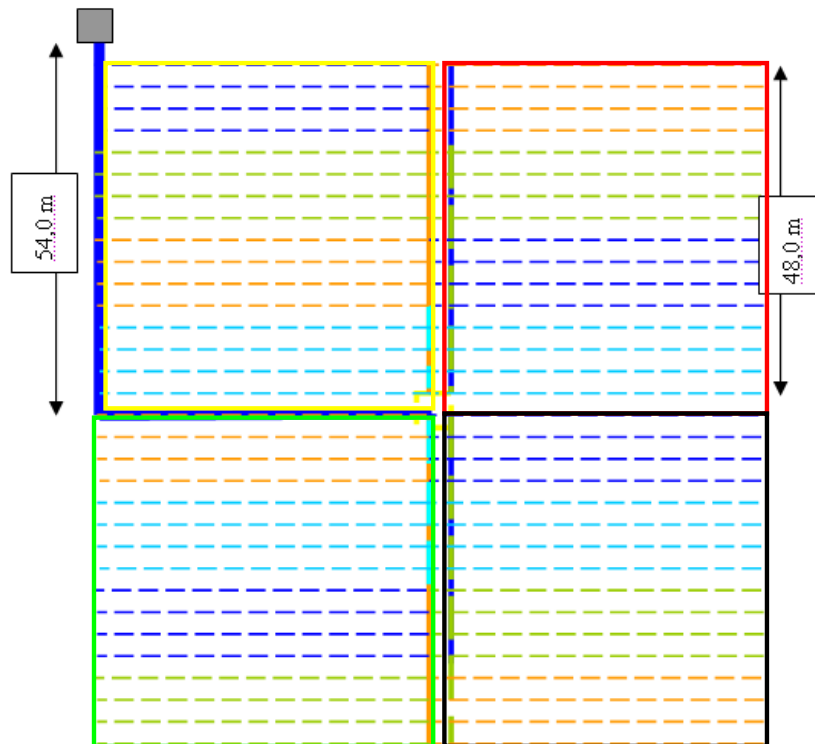
A diminuição do conteúdo de água no solo afeta acentuadamente alguns processos morfofisiológicos, enquanto outros são relativamente insensíveis. Segundo Kelling (1995) o efeito do déficit hídrico sobre a produção das culturas está vinculado ao período de ocorrência durante o desenvolvimento das plantas. A resposta mais proeminente das plantas ao déficit hídrico, segundo McCree e Fernández (1989) e Taiz e Zeiger (1991), consiste no decréscimo da produção da área foliar, do fechamento dos estômatos, da aceleração da senescência e da abscisão das folhas. Quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam de modo indireto, na conservação da água no solo, como se estivessem economizando para períodos posteriores.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliação do efeito do manejo de irrigação foi introduzido à área experimental, para determinação do coeficiente de cultivo, dois tratamentos com diferentes manejos de irrigação. O tratamento intitulado T3 era responsável por elevar a umidade do solo à capacidade de campo, com até três irrigações por dia, a partir das leituras de sensores FDR. O tratamento T4 era responsável por elevar a umidade do solo a 1,3 da capacidade de campo.

Assim como os tratamentos 1 e 2, para determinação do k_c , os tratamentos 3 e 4 também foram distribuídos de forma aleatória (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Croquis da área experimental, com disposição dos tratamentos.



Fonte: Produção do próprio autor

1º quadrante;
 2º quadrante;
 3º quadrante e
 4º quadrante
• T 1 ;
 • T 2 ;
 • T 3 e
 • T 4

O sistema de irrigação da área experimental era controlado por um cavalete com quatro válvulas e seus respectivos solenóides (Figura 4.2), sendo uma válvula por tratamento. Cada saída do cavalete possuía ainda, tomadas de pressão, para assegurar a pressão de serviço do sistema.

Figura 4.2 – Foto do cavalete e respectivas válvulas de controle



Fonte: Produção do próprio autor

O efeito do manejo da irrigação, na fisiologia da cultura, foi analisado com base na condutância estomática (g_s), transpiração (E) e assimilação de carbono (A), medidos com o auxílio de um medidor de gás infravermelho portátil (IRGA) da LICOR (Figura 4.3), em quatro datas distintas, de forma a representar os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, além da determinação de k_c e produtividade de água.

Figura 4.3 – Medidor de gás infravermelho a ser utilizado na pesquisa.



Fonte: Produção do próprio autor

Nas datas para medição dos parâmetros escolhidos, as leituras foram realizadas em quatro horários ao longo do dia, para que pudessem representar os horários de maior e menor demanda atmosférica. Desta forma ficaram estabelecidos os seguintes horários: 6,0; 7,0; 11,0 e 15,0 h.

As medições foram realizadas sempre antes das irrigações (Figura 4.4), momento no qual foram realizadas medidas do potencial da água no solo, nos quatro tratamentos.

Figura 4.4 – Realização de leitura com o IRGA, na área experimental.



Fonte: Produção do próprio autor

4.2.1 Distribuição e instalação dos sensores e tensiômetros no campo

Doze sensores foram distribuídos em seis pontos de instalação, sendo três pontos com baterias de três sensores e três pontos com um sensor cada, em linhas escolhidas de forma aleatória, porém de modo que cada um dos três tratamentos conduzidos por sensores possuisse duas repetições para a primeira camada. As baterias de três sensores cobriram a camada de solo de 0,0 a 45,0 cm, enquanto os outros três pontos com um sensor cada cobriram a camada de 0,0 a 15,0 cm.

Os tensiômetros foram instalados em número de doze, divididos em quatro baterias, representando as mesmas camadas de solo que os sensores, e sua distribuição foi de maneira a ter uma bateria para cada repetição do tratamento.

Todos os equipamentos foram instalados no emissor localizado no primeiro terço da linha lateral (Figuras 4.5A e B), partindo-se da linha de derivação, por representar o ponto médio de pressão na linha de irrigação.

FIGURA 4.5A – Sensores instalados



FIGURA 4.5B – Tensiômetros de mercúrio



Fonte: Produção do próprio autor

4.2.2 Conversão dos dados

Para facilitar o manejo do sistema de irrigação, realizou-se a transformação dos dados obtidos tanto pelos sensores como pelos tensiômetros em um mesmo parâmetro. O parâmetro escolhido foi o do tempo de funcionamento do sistema de irrigação. Para tanto se elaborou uma planilha, no software Microsoft Excel, que convertia a vazão do sistema de irrigação em lâmina e as leituras dos sensores e tensiômetros em umidade atual e posteriormente em necessidade de irrigação também em lâmina. A relação entre a necessidade de irrigação (mm) e a lâmina que o sistema podia aplicar (mm h^{-1}) retratava o tempo de funcionamento do mesmo.

4.2.3 Obtenção da evapotranspiração de referência pela estação meteorológica automatizada

Os valores da evapotranspiração de referência para os tratamentos 3 e 4 foram obtidos através da mesma metodologia do item 3.2.6 do Capítulo 3, contemplando as fases vegetativas, floração/formação dos frutos e maturação, respectivamente.

4.3 RESULTADOS

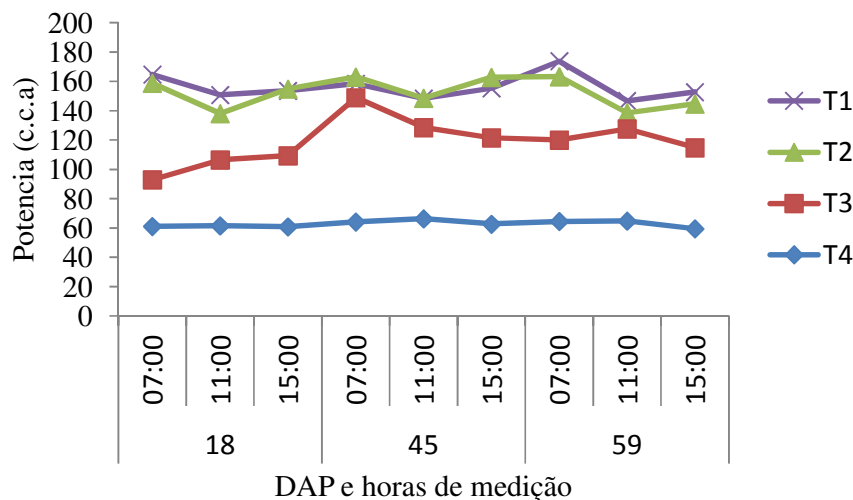
Ao final do ciclo da cultura os tratamentos foram responsáveis pelas seguintes lâminas totais de irrigação: T1 – 331,41 mm, T2 – 311,71 mm, T3 – 343,50 mm e T4 – 372,41 mm.

Os valores totais de lâminas de irrigação dos quatro tratamentos foram abaixo da recomendação de Dorenbos e Kassam (1979), ao relatarem uma variação de 400 a 600 mm como necessidade hídrica da cultura da melancia, para um período total de crescimento em torno de 100 dias e o citado por Miranda et al. (2004) ao relatar uma lâmina total de 408 mm.

As diferenças nos valores encontrados, neste trabalho, em comparação aos de Dorenbos e Kassam (1979) deve-se ao fato do ciclo ter sido 36,0% menor, já em comparação com Miranda et al. (2004), provavelmente o número de plantas por hectare (13.333) deve ter sido o fator principal.

Os referidos tratamentos refletiram em diferentes potenciais da água no solo. Os T1 e T2 apresentaram variações intermediárias, de potencial, porém com os potenciais mais elevados, enquanto a maior variação ocorreu no T2, e T4 apresentou um potencial quase que constante, durante as observações (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Potencial da água no solo, no momento das leituras com o IRGA.



Fonte: Produção do próprio autor

Os valores medidos para condutância estomática (gs), transpiração (E) e assimilação de carbono (A), medidos com o auxílio do IRGA, estão dispostos nas Tabelas 4.1 a 4.4.

No 18º dia após o plantio a maior transpiração (E) ocorreu no T3 no horário de 11:00 h, a maior condutância (gs) observado foi observada no T1 no horário de 06:00 h e a maior fotossíntese (A) ocorreu no T3 às 06:00 h (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Valores de gs, E e A, medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 18 dias após o plantio.

DAP	TRATAMENTO	HORA	E (mmol m ⁻² s ⁻¹)	gs (mol m ⁻² s ⁻¹)	A (mmol m ⁻² s ⁻¹)
18	1	06:00	2,767	3,567	23,853
		07:00	4,593	0,510	19,370
		11:00	12,283	0,723	23,723
		15:00	5,850	0,340	17,220
	2	06:00	2,147	0,600	27,793
		07:00	5,510	0,463	14,157
		11:00	10,633	0,400	16,823
		15:00	6,357	0,387	15,460
	3	06:00	2,560	1,113	29,073
		07:00	5,530	0,573	17,213
		11:00	12,347	0,570	17,480
		15:00	7,543	0,517	18,943
	4	06:00	3,730	1,603	27,783
		07:00	6,573	0,423	19,747
		11:00	9,443	0,420	17,247
		15:00	8,030	0,587	20,530

Fonte: Produção do próprio autor

No 32º dia após o plantio a maior transpiração ocorreu no T2 no horário de 11:00 h, a maior condutância observada foi no T1 às 06:00 h e a maior fotossíntese ocorreu no T2 às 11:00 h (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Valores de gs, E e A, medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 32 dias após o plantio.

DAP	TRATAMENTO	HORA	E (mmol. m ⁻² s ⁻¹)	gs (mmol. m ⁻² s ⁻¹)	A (mmol. m ⁻² s ⁻¹)
32	1	06:00	2,595	2,945	1,800
		07:00	4,517	0,657	22,603
		11:00	9,393	0,520	17,847
		15:00	6,657	0,330	15,103
	2	06:00	2,400	2,505	7,510
		07:00	3,923	0,360	14,440
		11:00	10,193	0,727	28,103
		15:00	7,290	0,467	23,873
	3	06:00	2,303	1,403	2,767
		07:00	4,363	0,483	18,020
		11:00	9,157	0,510	19,953
		15:00	7,170	0,380	19,990
	4	06:00	2,315	1,41	1,395
		07:00	3,993	1,010	23,737
		11:00	8,687	0,753	23,537
		15:00	5,430	0,260	14,413

Fonte: Produção do próprio autor

No 45º dia após o plantio a maior transpiração ocorreu no T3 no horário de 15:00 h, a maior condutância observada foi no T4 às 06:00 h e a maior fotossíntese observada foi também no T4 às 07:00 h (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Valores de gs, E e A, medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 45 dias após o plantio.

DAP	TRATAMENTO	HORA	E (mmol m ⁻² s ⁻¹)	gs (mol m ⁻² s ⁻¹)	A (mmol m ⁻² s ⁻¹)
45	1	06:00	2,910	1,900	2,563
		07:00	1,857	0,203	17,527
		11:00	2,130	0,200	9,647
		15:00	3,203	0,170	12,763
	2	06:00	1,393	0,700	2,420
		07:00	2,893	0,347	16,537
		11:00	1,527	0,103	6,023
		15:00	2,860	0,133	11,627
	3	06:00	2,150	1,710	2,033
		07:00	2,800	0,403	10,083
		11:00	3,073	0,323	6,103
		15:00	4,160	0,303	12,763
	4	06:00	3,470	2,777	2,080
		07:00	3,197	0,783	19,383
		11:00	2,053	0,170	6,327
		15:00	3,127	0,180	10,527

Fonte: Produção do próprio autor

No 59º dia após o plantio a maior transpiração ocorreu no T3 no horário de 11:00 h, a maior condutância foi observada no T1 às 06:00 h e a maior fotossíntese ocorreu no T2 às 07:00 h (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Valores de g_s , E e A, medidos com IRGA em diferentes DAP's, na cultura da melancia com 59 dias após o plantio.

DAP	TRATAMENTO	HORA	E ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	A ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
59	1	06:00	2,757	2,804	9,406
		07:00	2,220	0,310	5,573
		11:00	5,600	0,380	17,160
		15:00	3,693	0,193	9,967
	2	06:00	1,980	1,268	12,574
		07:00	5,890	0,820	25,530
		11:00	5,370	0,273	10,590
		15:00	4,300	0,207	12,777
	3	06:00	2,338	1,409	11,291
		07:00	2,373	0,237	13,537
		11:00	6,280	0,480	16,097
		15:00	3,757	0,193	12,073
	4	06:00	3,172	1,930	10,419
		07:00	2,237	0,277	7,700
		11:00	2,957	0,263	13,423
		15:00	3,587	0,157	11,247

Fonte: Produção do próprio autor

A análise estatística do efeito do tratamento, do horário e dos dias após o plantio e as respectivas interações para o parâmetro transpiração, mostra haver significância para todos os fatores e praticamente todas as interações (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Análise de variância para transpiração, na cultura da melancia.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DAP	3	533,912	177,972	147,12	0,0000**
Tratamento	3	12,511	4,170	3,45	0,0187*
Tratamento*DAP	9	20,419	2,269	1,88	0,0612
HORA	3	453,886	151,295	125,07	0,0000**
Tratamento*Hora	9	36,172	4,019	3,32	0,0011**
DAP*Hora	9	352,698	39,189	32,40	0,000**
Tratamento*Hora*DAP	27	47,057	1,743	1,44	0,0922
erro	128	154,840	1,209		

Fonte: Produção do próprio autor

* Significativo a 5,0%

** Significativo a 1,0%.

Como a análise de variância mostrou-se significativa para o tratamento, foi realizado o teste de média (Tukey) entre os tratamentos (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Teste de média, para transpiração, entre os tratamentos.

Tratamentos	Médias	Resultado do teste*
2	2,675	a1
1	3,658	a2
3	5,649	a3
4	6,618	a4

Fonte: Produção do próprio autor

*Significativo a 5,0%

O teste de Tukey indica que o T4 permitiu as plantas, sob este tratamento, manterem seus estados normal de transpiração. Tal fato foi proporcionado pelo baixo potencial de água no solo, provocado por uma manutenção da umidade elevada.

A análise estatística do efeito do tratamento, do horário e dos dias após o plantio e as respectivas interações para o parâmetro de condutância estomática, está disposta na Tabela 4.7 a seguir.

Tabela 4.7 – Análise de variância para condutância estomática, na cultura da melancia.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DAP	3	2,042	0,681	2,19	0,0922
Tratamento	3	4,078	1,359	4,38	0,0057**
Tratamento*DAP	9	5,027	0,559	1,80	0,0744
HORA	3	74,800	24,934	80,31	0,0000**
Tratamento*Hora	9	11,292	1,255	4,04	0,0002**
DAP*Hora	9	1,226	0,136	0,44	-----
Tratamento*Hora*DAP	27	11,102	0,411	1,32	0,1520
erro	128	39,738	0,310		

Fonte: Produção do próprio autor

* Significativo a 5,0%

** Significativo a 1,0%.

Como a análise de variância mostrou-se significativa para o tratamento, foi realizado o teste de média (Tukey) entre os tratamentos (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Teste de média, para condutância estomática, entre os tratamentos.

Tratamentos	Médias	Resultado do teste*
2	0,649	a1
1	0,700	a2
4	0,799	a3
3	0,921	a4

Fonte: Produção do próprio autor

*Significativo a 5,0%

Comparando-se os testes de média para transpiração e condutância, pode-se observar uma inversão de posição entre os tratamentos 4 e 3. Os dados contrariam as expectativas, pois se esperava que o tratamento com maior condutância também apresentasse a maior transpiração. Tal fato nos mostra que a transpiração é dependente de outros fatores fisiológicos, como Ψ_w e condutividade hidráulica da planta.

A Tabela 4.9 demonstra os dados da análise estatística do efeito do tratamento, do horário e dos dias após o plantio e as respectivas interações para o parâmetro fotossíntese.

Tabela 4.9 – Análise de variância para fotossíntese, na cultura da melancia.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DAP	3	3535,749	1178,583	29,09	0,0000**
Tratamento	3	2,466	0,822	0,02	-----
Tratamento*DAP	9	255,682	28,409	0,70	-----
HORA	3	717,237	239,079	5,90	0,0008**
Tratamento*Hora	9	192,539	21,393	0,53	-----
DAP*Hora	9	3828,939	425,438	10,50	0,0000**
Tratamento*Hora*DAP	27	1034,774	38,325	0,95	-----
erro	128	5186,275	40,518		

Fonte: Produção do próprio autor

*Significativo a 5,0%

** Significativo a 1,0%.

Apesar da análise de variância não ter apresentado significância, entre os tratamentos, para o fator fotossíntese, foi realizado o teste de média (Tukey) entre os mesmos para averiguar quem alcançou maior valor (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Teste de média, para fotossíntese, entre os tratamentos.

Tratamentos	Médias	Resultado do teste*
1	14,194	a1
3	14,215	a1
4	14,365	a1
2	14,469	a1

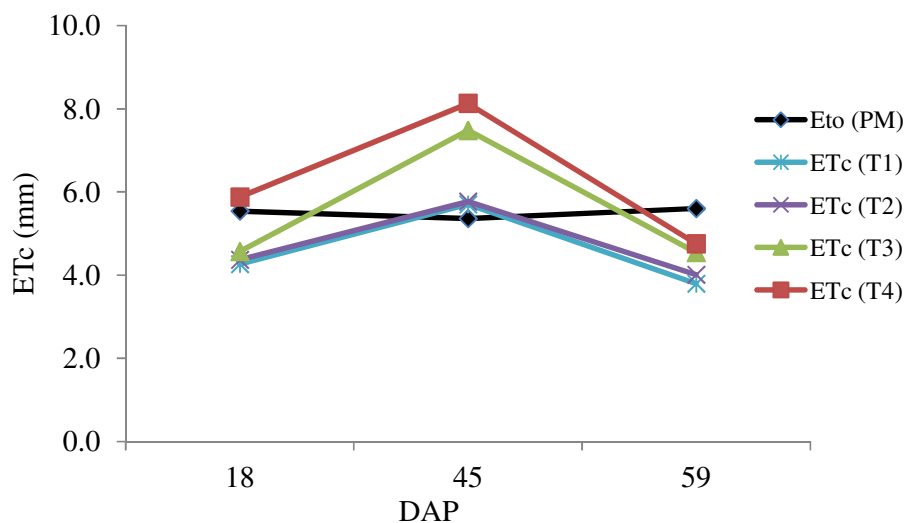
Fonte: Produção do próprio autor

A leitura realizada no 59° DAP às 07:00 h, para fotossíntese, onde o T2 apresentou um valor de $25,530 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ver Tabela 4.4), pode ter influenciado para que o maior valor dentre os tratamentos fosse alcançado pelo T2. O valor da referida leitura foi 88,59% maior que a segunda maior leitura no mesmo horário, elevando a média deste tratamento.

O conjunto dos efeitos fisiológicos associado a um maior tempo com a superfície do solo úmida fez com que os valores de Etc, entre os tratamentos, também apresentassem diferenças tendo influência direta na determinação dos coeficientes de cultivo.

A Figura 4.7 apresenta os valores de Etc, para os quatros tratamentos, em comparação a Eto (PM). O 45° DAP apresentou os valores máximos de Etc para a cultura, independente do tratamento aplicado.

Figura 4.7 – Valores de Etc, para os tratamentos aplicados.



Fonte: Produção do próprio autor

O dia após o plantio, que se atingiu a maior ETC, foi 45; 46 e 39 respectivamente para Bezerra e Oliveira (1999), Miranda (2004) e Carvalho (2007). Em todos os trabalhos a maior demanda de evapotranspiração aconteceu na fase intermediária (enchimento dos frutos), o que também ocorreu no presente trabalho.

As Tabelas 4.11 e 4.12 demonstram os valores encontrados, para os componentes da equação do balanço hídrico, referentes aos tratamentos T3 e T4, para os mesmos dias escolhidos na determinação do kc com uma irrigação por dia.

Tabela 4.11 – Valores de laminas para atingir a capacidade de campo, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os sensores.

Dia	Período (h)	I	(Δ ARM)	Fluxo	Etc
		mm			
23/10/2010	07:00 as 11:00	2,98	-2,50	-0,16	5,31
23/10/2010	11:00 as 15:00	0,00	-0,47	-0,57	-0,11
23/10 a 24/10/2010	15:00 as 07:00	0,21	0,90	0,05	-0,64
Total	24,0	3,19	-2,07	-0,68	4,57
19/11/2010	07:00 as 11:00	4,39	2,38	-0,11	1,90
19/11/2010	11:00 as 15:00	2,06	0,94	-0,20	0,92
19/11 a 20/11/2010	15:00 as 07:00	0,54	-4,24	-0,12	4,66
Total	24,0	6,99	-0,92	-0,43	7,48
02/12/2010	07:00 as 11:00	3,34	-1,03	-0,61	3,76
02/12/2010	11:00 as 15:00	2,05	1,79	-0,22	0,04
02/12 a 03/12/2010	15:00 as 07:00	0,00	-0,96	-0,22	0,75
Total	24,0	5,39	-0,20	-1,04	4,54

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.12 – Valores de laminas para atingir 1,3 da capacidade de campo, variação de armazenamento, fluxo e evapotranspiração da melancia determinado com os sensores.

Dia	Período (h)	I	(Δ ARM)	Fluxo	Etc
		mm			
23/10/2010	07:00 as 11:00	1,50	-0,12	-0,86	0,77
23/10/2010	11:00 as 15:00	1,56	0,23	-1,23	0,10
23/10 a 24/10/2010	15:00 as 07:00	1,45	-4,55	-0,99	5,01
Total	24,0	4,51	-4,44	-3,08	5,87
19/11/2010	07:00 as 11:00	2,56	-0,69	-0,73	2,52
19/11/2010	11:00 as 15:00	2,89	1,19	-0,60	1,10
19/11 a 20/11/2010	15:00 as 07:00	2,30	-3,04	-0,82	4,52
Total	24,0	7,75	-2,54	-2,15	8,13
02/12/2010	07:00 as 11:00	2,70	-0,10	-0,73	2,07
02/12/2010	11:00 as 15:00	2,43	1,85	-0,65	-0,07
02/12 a 03/12/2010	15:00 as 07:00	0,64	-2,95	-0,84	2,75
Total	24,0	5,76	-1,20	-2,22	4,75

Fonte: Produção do próprio autor

Considerando a Eto (PM) de 5,54; 5,36 e 5,60 mm, para os DAP's 18; 45 e 59 respectivamente, O T3 apresentou valores de kc da ordem de 0,82; 1,40 e 0,81 nas fases de crescimento, intermediária e final. Já o T4 apresentou valores de kc de 1,06; 1,52 e 0,85 para as mesmas fases fenológicas (Tabela 4.13).

Tabela 4.13 – Valores de kc dos tratamentos 1 e 2 em comparação aos relatados por outros autores para os mesmos dias após o plantio da melancia.

Trabalho	Dias após plantio		
	18	45	59
T1	0,74	0,98	0,67
T2	0,76	0,99	0,77
T3	0,82	1,40	0,81
T4	1,06	1,52	0,85
Bezerra e oliveira (1999)	0,68	1,35 – 1,40	0,92
Miranda et al. (2004)	0,6	1,40	1,00
Carvalho et al. (2007)	0,52	1,15 – 1,20	0,59

Fonte: Produção do próprio autor

Os valores de kc de todos os tratamentos, para o 18° DAP, foram maiores que os relatados pelos outros autores, provavelmente pelo fato das lâminas aplicadas para a realização da fertirrigação serem maiores que a necessidade para atender a demanda de evapotranspiração, além do fracionamento das lâminas nos tratamentos 3 e 4 o que proporcionou um maior tempo de umedecimento da superfície do solo e por consequência maior perda por evaporação.

No 45° dia após o plantio apenas o T4 apresentou kc superior aos relatados pelos autores. Neste caso pode-se imputar o resultado ao maior nível de transpiração alcançado por este tratamento (ver Tabela 4.3), já o T3 apresentou valor equiparado aos dos autores com exceção de Carvalho et al. (2007). Os tratamentos 1 e 2 atingiram valores de kc inferiores aos relatados por Bezerra e Oliveira (1999) e Miranda et al. (2004), o que pode ter sido causado pelo nível de potencial da água no solo, reduzindo a disponibilidade de água para a planta.

Todos os tratamentos apresentaram valores menores de kc para o 59° DAP, podendo este fato ser atribuído ao fator adicional do surgimento de doença fúngica (Cercosporiose) que diminuiu bastante a área foliar no estágio final da cultura.

Os tratamentos tiveram influência no desempenho produtivo da cultura, conforme observado na Tabela 4.14, em que os frutos foram classificados em 1ª (peso igual ou maior que 8,0 kg), 2ª (peso entre 6,0 e 8,0 kg) e 3ª (peso entre 4,0 e 6,0 kg).

Tabela 4.14 – Valores de produção (Mg ha^{-1}), segundo a classificação dos frutos, alcançada pelos tratamentos aplicados.

Tratamento	Classificação dos frutos			
	1 ^a (Mg ha^{-1})	2 ^a (Mg ha^{-1})	3 ^a (Mg ha^{-1})	Total (Mg ha^{-1})
T1	5,733	4,107	3,360	13,200
T2	6,027	3,605	3,387	13,019
T3	9,797	5,040	1,680	16,517
T4	10,747	13,733	1,387	25,867

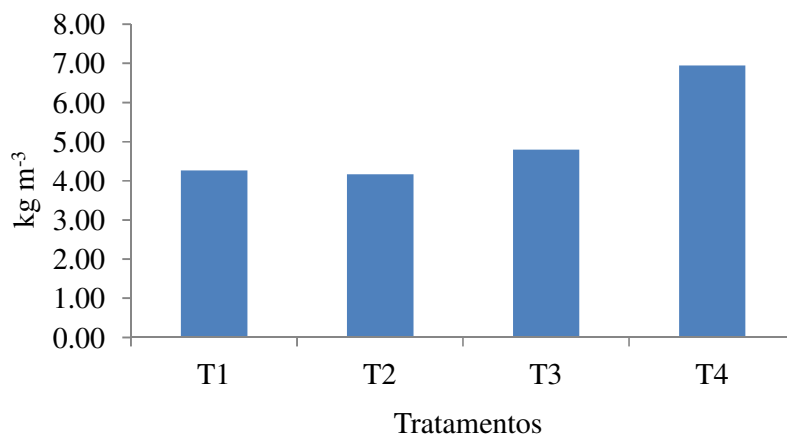
Fonte: Produção do próprio autor

A produção alcançada por Miranda et al. (2004) foi de 57,7 Mg, com um número de plantas por hectare superior a 13.000, ou seja, aproximadamente 4,33 kg por planta. Já Carvalho et al. (2007) conseguiu uma produção de 21,667 Mg, com uma densidade de plantio de 5.000 plantas por hectare, o que representaria uma produção por planta equivalente a alcançada por Miranda et al. (2004).

No presente trabalho, considerando a produção obtida e a densidade de plantio de 3.500 plantas por hectare, a produção estimada por planta foi de 3,77; 3,72; 4,71 e 7,39 kg para T1, T2, T3 e T4 respectivamente. Considerando estes dados, apenas os tratamentos 1 e 2 ficaram abaixo dos encontrados pelos autores citados, o que poderia ser explicado tanto pelo fato da ocorrência da doença fúngica, como pela prática de realizar apenas uma irrigação por dia.

A conversão de água em alimento, alcançada pelos tratamentos aplicados à cultura da melancia apresentou padrão semelhante à produção (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Produção de melancia por m^3 de água utilizada.



Fonte: Produção do próprio autor

De forma análoga a discussão sobre a produção alcançada, a eficiência do uso da água neste trabalho ficou abaixo da relatada por Miranda et al. (2004) que foi de $21,6 \text{ kg m}^{-3}$. É importante relatar que os trabalhos utilizados para comparação foram realizados em áreas demonstrativas, de pequeno porte, onde é mais fácil de controlar fatores adversos.

4.4 CONCLUSÕES

O uso do sensor permite medir o potencial da água no solo e a umidade em tempo real, possibilitando o monitoramento e a tomada de decisões de forma mais segura.

A manutenção de diferentes potenciais de água no solo tem influência direta na transpiração e condutância estomática da cultura, contribuindo de forma direta para a formação do kc.

A utilização da metodologia de uma irrigação por dia, em solos extremamente arenosos, contribui para a obtenção de valores de kc baixos devido principalmente a menor quantidade de água disponível sob baixo potencial.

A eficiência do uso da água aumentou com a elevação do kc.

4.5 RECOMENDAÇÕES

Realizar um estudo com intervalos de potencial da água no solo mais curtos, para avaliar o melhor potencial para o pleno desenvolvimento da cultura, com medições dos parâmetros fisiológicos mais frequentes.

Realizar experimento com diferentes texturas de solo e culturas, afim de observar se as conclusões deste trabalho podem ser aplicadas em outras situações.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.3, n.2, p.173-177, 1999. Campina Grande, PB.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**. v.25. n.1. p.183-188. 1995. Santa Maria.
- CARVALHO, L. A. de.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; CRUZ, A. C. R.; Caracterização hidráulica de um latossolo vermelho associado à caracterização pedológica do perfil. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1008 – 1013, julho/agosto 2007.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).
- KELLING, C.R.S. **Efeito da disponibilidade de água no solo sobre os componentes do balanço hídrico e o rendimento do feijoeiro**. Santa Maria: UFSM, 1995. 91p. Dissertação Mestrado.
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. Academic Press: 1995. 495p.
- McCREE, K.J.; FERNÁNDEZ, C.J. Simulation model for studying physiological water stress responses of whole plants. **Crop Science**. v.29. p.353-360. Madison. 1989.
- MIRANDA, F. R.; OLIVEIRA, J. J. G.; SOUZA, F. Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultivo para a cultura da melancia irrigada por gotejamento. **CE. Rev. Ciência Agrônômica**. vol. 25 n.1. jan.-jun. p. 36-43. Fortaleza. 2004.
- RITCHIE, J.T.; BURNETT, E.; HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. 3. Soil water influences. **Agronomy Journal**. v.64, p.168-173, Madison. 1972.
- TAIZ, L.; ZEIGER. **Plant Physiology**. California: The Benjamin/ Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, 1991.